

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ И ГРАНУЛИРОВАННЫХ СОСТАВОВ $Ti+xC$ ($0.5 < x < 1$) НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ

Б.С. Сеплярский, Р.А. Кочетков, С.Г. Вадченко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, Черноголовка, Россия
*sepl@ism.ac.ru

Горение порошков переходных металлов в атмосфере активного газа или их смесей с неметаллами (углерод, бор) является эффективным способом синтеза различных керамических и композиционных материалов [1]. Особый интерес представляет система $Ti-C$, продукты горения которой (карбид, карбонитрид титана) могут иметь как самостоятельное применение, так и быть основой для широкого спектра композиционных материалов. В данной работе проводилось исследование закономерностей горения гранулированных и порошковых смесей $Ti+xC$ ($0.5 < x < 1$), помещенных в кварцевую трубку. Проведенные ранее нами исследования закономерностей горения гранулированной смеси $Ti+0.5C$ [2] показали, что скорость горения гранулированной смеси в несколько раз выше порошковой того же состава. Однако, было неясно, сохраняются ли полученные изменения скорости горения при увеличении доли углерода в системе до стехиометрического соотношения $Ti+C$. В работе [3] исследовались закономерности горения порошковых смесей $Ti+0.5C$ и $Ti+C$ в спутном потоке инертного газа. Проведенные эксперименты подтвердили основные выводы конвективно-кондуктивной модели горения гетерогенных конденсированных систем [4], а также показали, что при изменении состава от $Ti+0.5C$ к $Ti+C$, возрастает скорость горения порошковых смесей. Поэтому авторы статьи решили выяснить, возрастет ли синхронно скорость горения гранулированных смесей или же останется прежней. Этот вопрос представляет научный интерес для выяснения механизмов распространения волны горения в гранулированных смесях. С теоретической точки зрения, интерес к изучению горения гранулированных смесей вызван тем, что в этом случае существует отличная от «традиционных» представлений иерархия масштабов [1, 2, 5, 6]. Так, если для порошковой смеси рассматриваются обычно два характерных масштаба: размер реакционной ячейки, с которым сопоставляют размер самого крупного реагента (микро) и размер всей засыпки (макро), то при горении гранулированных смесей таковых масштабов уже три: микро, макро и мезо. Другим

фактором отличия гранулированных смесей от порошковых является другой механизм передачи тепла в волне горения. Так, для порошковых смесей было показано, что в них реализуется конвективно-кондуктивный механизм горения (ККМГ) [4]. Согласно ККМГ основной перенос тепла в волне горения происходит за счет течения расплава наиболее легкоплавкого компонента (в данном случае титана) под действием сил поверхностного натяжения и перепада давлений примесных газов перед и за фронтом реакции, причем скорость течения расплава и есть видимая скорость горения. В гранулированных же смесях искусственно изменена структура пористой среды, поэтому течение расплава там ограничено размерами отдельных гранул (порядка 1мм в условиях наших экспериментов). Скорость горения таких смесей зависит как от времени сгорания отдельных гранул, так и от времени передачи тепла от гранулы к грануле, в т.ч. за счет лучистого теплообмена. Сравнение закономерностей горения порошковых и гранулированных составов позволит сделать обоснованные выводы о влиянии гранулирования на механизм распространения волны горения в смесях $Ti+xC$. Можно ожидать, что грануляция приведет к уменьшению скорости горения из-за ухудшения условий теплопередачи от сгоревшего слоя гранул к несгоревшему, вызванному уменьшением площади контактов, и отсутствием конвективного теплопереноса.

Гранулирование проводилось путем протирания исходной порошковой смеси, смешанной с 4% раствором поливинилбутираля в этиловом техническом спирте, через сито с размером ячейки 1,25мм. Затем частицы высушивались на воздухе в течение 10 ч и рассеивались на вибросите. В данной работе использовались полученные гранулы с размерами, лежащими в диапазоне 0,63–1,6мм.

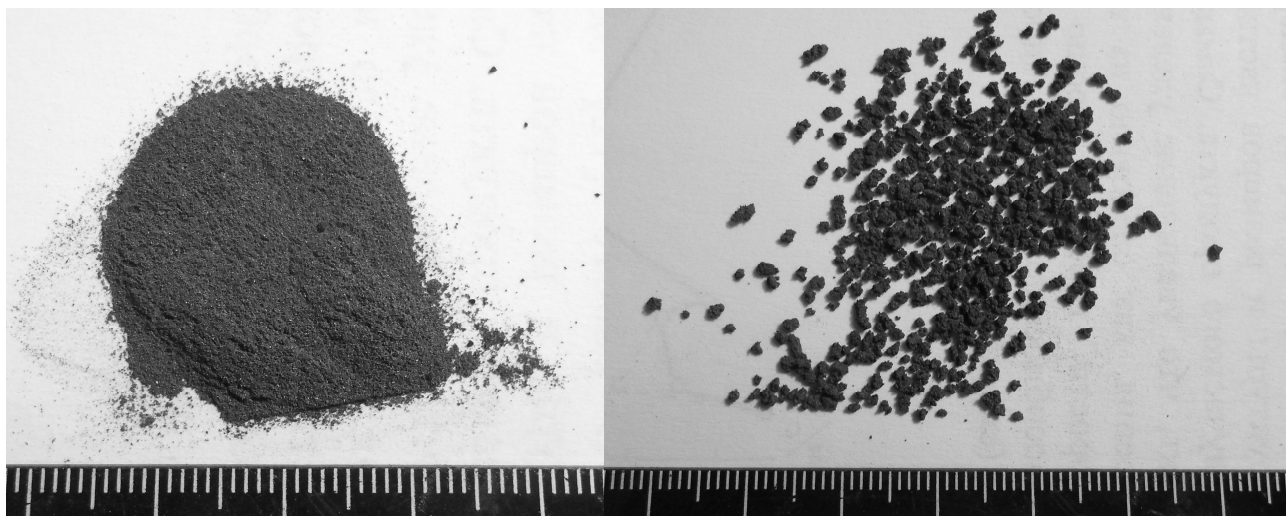


Рис. 1. Фотографии смеси до и после грануляции.

Исследование закономерностей горения выполнялось на оригинальной экспериментальной установке [2]. Данная установка позволяет сжигать смеси как без продува, так и при продуве газовым потоком, измерять расход и давление газа в процессе горения, а также получать видеозаписи процесса горения. Скорость горения определяется на основании покадровой обработки видеозаписей процесса горения.

Предварительно были измерены насыпные плотности и коэффициенты газопроницаемости используемых смесей. Полученные данные приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Насыпные плотности смесей, г/см³.

Состав смеси	порошок	гранулы
Ti+0,5C	1	0,77
Ti+0,75C	1	0,7
Ti+C	0,9	0,68

Таблица 2. Коэффициенты газопроницаемости, Дарси.

Состав смеси	порошок	гранулы
Ti+0,5C	3	22
Ti+0,75C	3	23
Ti+C	2,5	24

Как видно из данных таблицы 2, увеличение содержания углерода практически не влияет на проницаемость смесей. При этом коэффициент газопроницаемости гранулированных смесей почти на порядок выше, чем у порошковых.

В ходе проведенных исследований было установлено, что скорость горения порошковых смесей насыпной плотности при изменении состава смеси возрастает в 4 раза с 4мм/с (Ti+0.5C) до 16мм/с (Ti+C) (рис. 2). Увеличение скорости горения насыпных порошковых составов может быть вызвано как увеличением температуры горения (рассчитанные в программе «Thermo» адиабатические температуры горения для составов Ti+0.5C, Ti+0.75C, Ti+C соответственно равны 2200К, 2930К, 3300К), так и улучшением условий растекания титана по саже при увеличении ее содержания в смеси. Как показали эксперименты, скорость горения гранулированных смесей превышает скорость горения порошковых смесей того же состава в 2,5 – 3 раза (рис. 2) и меняются в пределах 10 мм/с (Ti+0.5C) – 50 мм/с (Ti+C). Несмотря на более низкую

насыпную плотность гранулированных смесей (табл. 1), их массовые скорости горения более чем в 2 раза превышают массовые скорости горения для аналогичных по составу порошковых смесей.

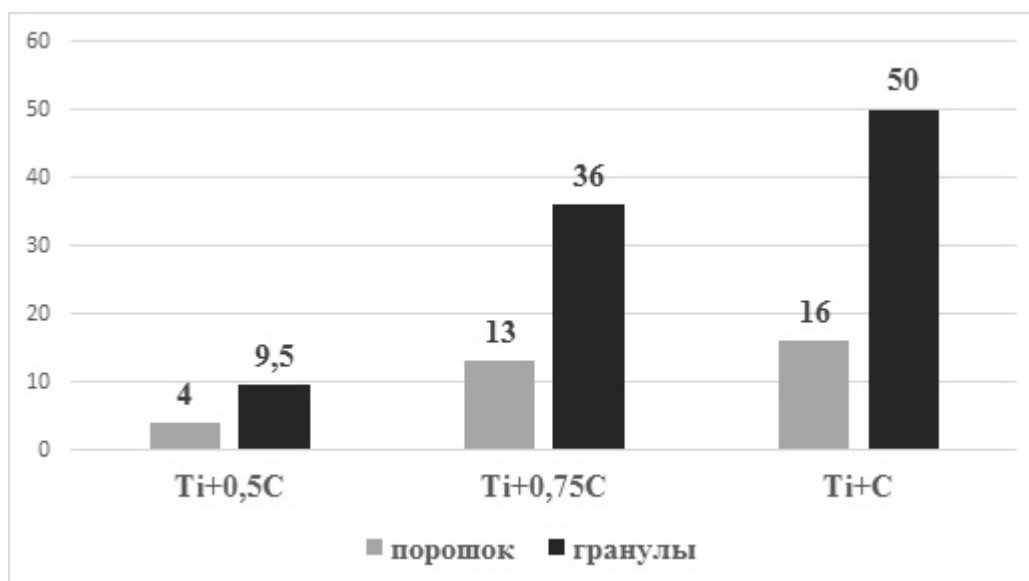


Рис. 2. Измеренные скорости горения порошковых и гранулированных смесей $Ti+xC$.

Выше были приведены факторы, которые должны способствовать уменьшению скорости горения при переходе от порошковых к гранулированным смесям. Однако, проведенные эксперименты показали, что скорость горения у гранулированных смесей выше, чем у порошковых. В чем же причина увеличения скорости горения? Первая причина такого увеличения – лучшие условия для отвода примесных газов из зоны горения: размер гранул (длина фильтрации) составляет примерно 1мм, и такая засыпка обладает высокой газопроницаемостью (табл. 2), которая сохраняется как во время, так и после процесса горения [2, 5, 6]. В соответствии с конвективно-кондуктивной моделью [4] эти особенности гранулированных смесей должны приводить к увеличению скорости горения как самих гранул и, как следствие, всей засыпки. Также, за счет увеличения характерного размеров частиц, из которых состоит пористая среда, с нескольких десятков микрон (порошковая смесь) до миллиметра (в гранулированных смесях) на порядки увеличивается эффективная длина проникновения излучения и, следовательно, роль лучистого теплообмена в механизме распространения полны горения. Для проверки гипотезы о ведущей роли излучения в механизме распространения полны горения в гранулированных смесях было проведено сопоставление возрастания мощности излучения и скоростей горения гранулированных шихт при изменении содержания углерода в смеси. Относительное возрастание

мощности излучения можно представить, как отношение рассчитанных температур горения (T_i) в четвертой степени. Эти отношения и, соответствующее им отношение линейных (v_i) и массовых (U_i) скоростей горения приведены ниже:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = 3.15, \quad \frac{v_2}{v_1} = 3.6, \frac{U_2}{U_1} = 3.4 \quad (1)$$

$$\left(\frac{T_3}{T_1}\right)^4 = 5, \quad \frac{v_3}{v_1} = 5, \frac{U_3}{U_1} = 4.7 \quad (2)$$

Из (1) и (2) видно, что относительная скорость горения возрастает во столько же число раз, что и мощность излучения!

Проведенное сопоставление относительного изменения лучистого потока и скорости горения при изменении состава смеси позволяют сделать вывод о ведущей роли излучения в механизме распространения волны горения для гранулированных смесей. Однако расчеты времени воспламенения несгоревшего слоя гранул лучистым потоком от ближайшего сгоревшего слоя гранул показал, что лучистый механизм теплообмена не может обеспечить наблюдаемую в экспериментах скорость горения.

Поэтому можно считать, что распространения фронта пламени в гранулированных смесях обеспечивается комбинацией лучистого и кондуктивного механизмов передачи тепла в волне горения.

Литература

- [1] А.Г. Мержанов, А.С. Мукасян, Твердопламенное горение, Торус Пресс, Москва, 2007, стр. 336.
- [2] Б.С. Сеплярский, А.Г. Тарасов, Р.А. Кочетков, ФГВ, 49, 5, (2013) 55-63.
- [3] Б.С. Сеплярский, С.Г. Вадченко, С.В. Костин, Г.Б. Брауэр, ФГВ, 45, 1, 30-37.
- [4] Б.С. Сеплярский, ДАН, 396, 5, (2004) 640-643.
- [5] B.S. Seplyarskii, R.A. Kochetkov, N.M. Rubtsov, Inter. Jour. of SHS, 24, 3, (2015) 174-175
- [6] Б.Ш. Браверман, Ю.М. Максимов, Ю.В. Цыбульник, ФГВ, 48, 6, (2012) 87-88.