

# СТАБИЛИЗАЦИЯ СКОРОСТИ И РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ПУТЕМ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ИСХОДНОЙ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ

Б.С. Сеплярский, Р.А. Кочетков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, Черноголовка, Россия  
\*[sepl@ism.ac.ru](mailto: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, 2]. Однако, закономерности горения и, соответственно, состав и структура продуктов синтеза, зависят как от внешних условий (например, влажности воздуха), так и от марки и чистоты реагентов, используемых в экспериментальных исследованиях и в полупромышленной СВС технологии [3, 4]. Поэтому актуальной задачей исследований в области СВС является разработка методов, позволяющих снизить влияние вышеупомянутых факторов на процесс горения и состав продуктов. В данной работе обобщены наши результаты по стабилизации скорости и режимов горения путем гранулирования исходной порошковой смеси.

Ранее, для быстрогорящих порошковых СВС-систем ( $Ti+C$ ,  $Ti+0.5C$ ,  $Ni+Al$  и др. [5–7]) нами было показано, что в них реализуется конвективно-кондуктивный механизм горения (ККМГ) [8]. В соответствии с этим механизмом, конвективный перенос тепла вызван течением слоя расплава легкоплавкого реагента под действием капиллярных сил и перепада давлений примесных газов перед и за слоем расплава, причем скорость проникновения расплава в исходную шихту и есть видимая скорость распространения волны горения [8]. Важно отметить, что именно наличием слоя расплава с большим гидравлическим сопротивлением в рамках ККМГ объясняется сильное влияние примесного газовыделения на скорость горения. В соответствии с конвективно-кондуктивной моделью горения наличие влаги в составе исходной смеси можно рассматривать как источник примесных газов, сильно влияющих на скорость горения. Можно предположить, что изменение скорости горения при использовании различных марок сажи в смесях  $Ti+xC$  связаны с различной способностью сажи адсорбировать примесные газы [4].

Грануляция исходной смеси, в свою очередь, позволяет исключить образование плохо проницаемого слоя расплава в процессе горения шихты, который обеспечивает конвективный перенос тепла и сильное влияние примесного газовыделения на скорость

горения [9–11]. В этом случае процесс растекания расплава под действием капиллярных сил ограничен размерами одной гранулы, т.к. искусственно изменена структура пористой среды. Такой прием обеспечивает высокую проницаемость исходной шихты, как в процессе горения, так и после ее остывания, что, в соответствии с представлениями ККМГ, должно уменьшить влияние выделяющихся примесных газов, в т.ч. паров воды, на скорость горения [2].

Гранулирование составов проводилось следующим образом: порошковая смесь перемешивалась в течение 30 минут в смесителе типа «пьяная бочка», к полученной смеси добавляли 4-х процентный по массе раствор поливинилбутирала в этиловом спирте. Полученная после смешения жидкой и твердой фазы масса перемешивалась и протиралась через сито. Затем полученные гранулы окатывались на горизонтальной поверхности для придания им сферической формы и высушивались на воздухе. Для экспериментальных исследований использовалась фракция с размером гранул от 0,63 до 2 мм.

Горение образцов проводилось в оригинальной экспериментальной установке, которая позволяет сжигать смесь при продуве газовым потоком, измерять расход и давление газа в процессе горения, а также получать видеозаписи процесса горения [3]. Иницирование процесса горения осуществлялось с верхнего торца засыпки с помощью электрического импульса, подаваемого на спираль. На основании покадровой обработки видеозаписей процесса горения определялась видимая скорость горения.

Данные по изменению линейных скоростей горения  $Ti+0.5C$  за счет потока инертного газа при различном содержании влаги в исходной смеси для порошковой и гранулированной смесей представлены на рис. 1. Из приведенных данных видно, что, если для порошковой смеси наличие или отсутствие влаги и продува газом оказывает сильное влияние на скорости горения (они меняются в несколько раз!), то для гранулированной – минимальное, изменение скоростей не превышает 28%! Также, согласно рентгенофазовому анализу, если в случае порошковой смеси фазовый состав продуктов реакции сильно отличался в зависимости от количества влаги в смеси и наличия продува инертным газом, то для гранулированной смеси фазовый состав продуктов синтеза был одинаковым вне зависимости от того, из «сухой» или «влажной» смеси они были сделаны и наличия или отсутствия продува аргоном.

Также были проведены эксперименты по исследованию влияния различных марок сажи (отличающихся своей способностью адсорбировать влагу) и титана на скорости горения (рис. 2).

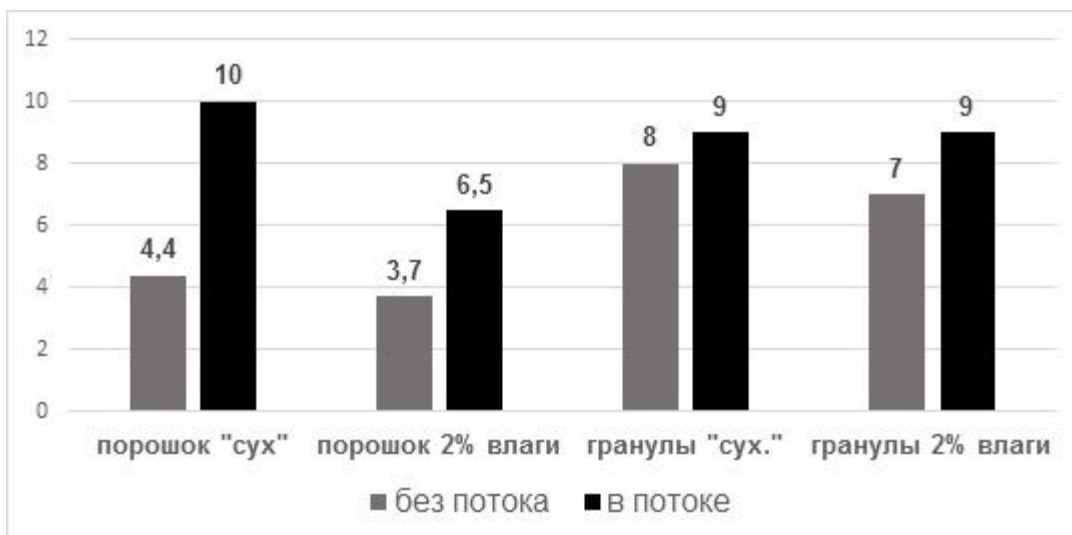


Рис. 1. Скорости горения порошковых и гранулированных смесей  $Ti+0.5C$  в зависимости от условий синтеза и количества влаги в исходной смеси.

Как видно из данных, приведенных на рис. 2, скорости горения порошковых смесей из разных марок сажи как без продува, так и при продуве аргоном различаются в несколько раз, в то время как скорости горения гранулированных смесей из этих же порошков оставались практически постоянными как без продува, так и при продуве аргоном. Таким образом, грануляция действительно позволяет нивелировать влияние различных марок сажи на скорость фронта горения, и тем самым, позволяет стабилизировать условия синтеза и состав получаемых продуктов!

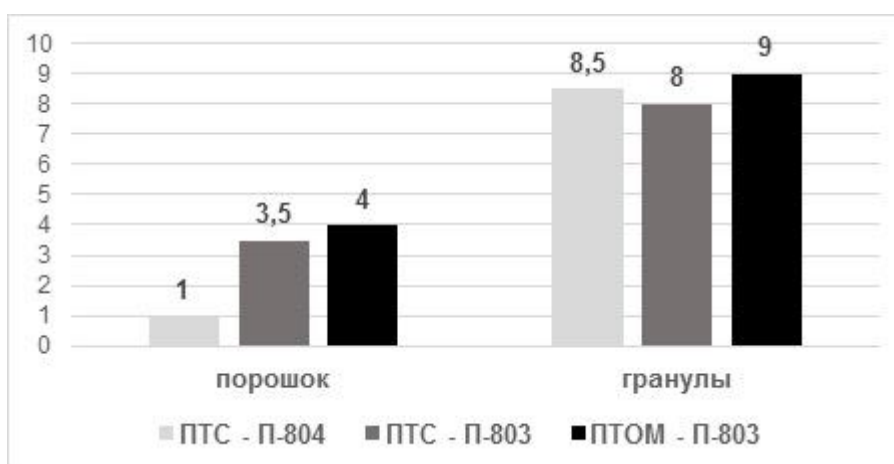


Рис. 2. Скорости горения порошковых и гранулированных смесей  $Ti+0.5C$  в зависимости от применяемых марок компонентов, мм/с.

В работе [9] было проведено исследование закономерностей горения порошковых и гранулированных смесей  $Ni+Al$  (никель ПНЭ-1 и алюминий АСД-4)

насыпной плотности в условиях спутного потока газа. Показано, что эквимольная смесь этих порошков горит нестационарно, продув засыпки аргоном не приводит к изменению скорости и характера распространения фронта горения, который оставался нестационарным. Продув же азотом привел к увеличению средней скорости горения почти в два раза и изменению (увеличению) частоты колебаний. Такой характер горения нашел отражение во внешнем виде продуктов синтеза: полученный цилиндрический образец состоит из чередующихся светлых и темных полос.

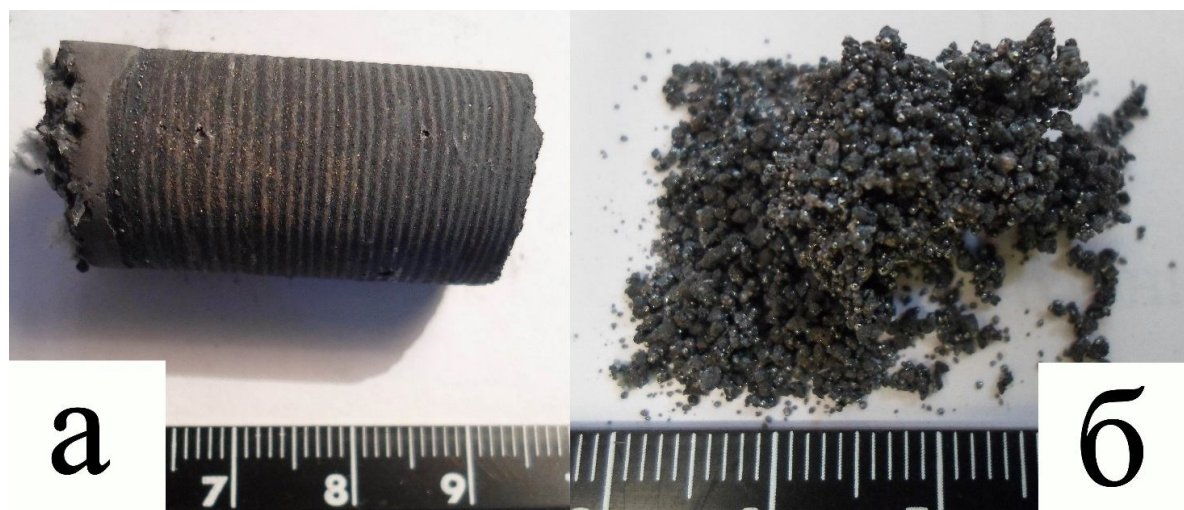


Рис. 3. Внешний вид порошковой (а) и гранулированной (б) смесей Ni+Al после горения.

Грануляция исходной смеси Ni+Al привела к кардинальному изменению режима горения – пульсации исчезли, горение распространяется в виде единого фронта. Такое принципиальное изменение режима горения, по-видимому, связано с тем, что для гранулированных смесей процесс растекания расплава под действием капиллярных сил был ограничен размерами одной гранулы. Эти же причины, скорее всего, обуславливают тот факт, что гранулы сохраняют свои размеры в процессе горения и не спекаются друг с другом (после синтеза гранулированная шихта рассыпается на отдельные гранулы).

Значения скоростей горения порошковых и гранулированных смесей Ni+Al (никель ПНЭ-1 – алюминий АСД-4, никель ПНК-1 – алюминий АСД-4) по результатам работ [9, 10] показаны на рис. 4. Скорости горения порошковых смесей из разных марок никеля различаются в несколько раз, в то время как скорости горения гранулированных смесей из этих же порошков оказались практически одинаковыми.

Таким образом, грануляция действительно позволила нивелировать влияние различных марок никеля на скорость фронта горения, и тем самым, позволяет стабилизировать условия синтеза и фазовый состав получаемых продуктов!

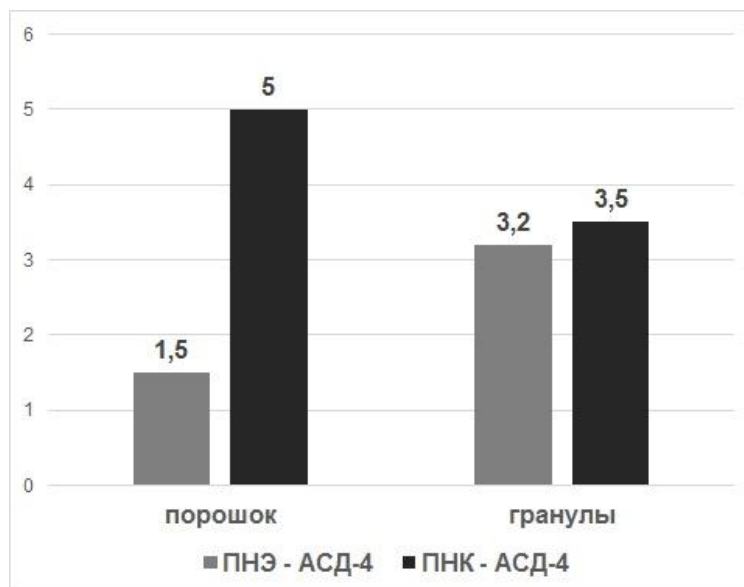


Рис. 4. Влияние марки никеля на скорости горения (мм/с) порошковых и гранулированных смесей Ni+Al.

Обобщая полученные данные можно сделать вывод, что для порошковых СВС смесей, горящих по конвективно-кондуктивному механизму, грануляция позволяет стабилизировать скорость горения смесей, режимы распространения зоны реакции и состав продуктов синтеза. Эти результаты открывают новые направления исследований и новые широкие возможности для разработки и усовершенствования технологий получения материалов путем СВС.

### Литература

- [1] А.Г. Мержанов, А.С. Мукасян, Твердопламенное горение, Торус Пресс, Москва, 2007, стр. 336.
- [2] А.Г. Мержанов, Твердопламенное горение, Черноголовка, ИСМА, 2000, стр. 238.
- [3] Ю.С. Найбороденко, Н.Г. Касацкий, Г.В. Лавренчук и др. Горение конденсированных и гетерогенных систем, Матер. VI Всес. Симп. по горению и взрыву, Черноголовка, 1980, 74 – 77.
- [4] В.М. Шкиро, И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов, Порошковая металлургия, 3, (1979) 6-9.
- [5] Б.С. Сеплярский, С.Г. Вадченко, ДАН, 399, 1, (2004) 72-76.

- [6] Б.С. Сеплярский, С.Г. Вадченко, С.В. Костин, Г.Б. Брауэр, ФГВ, 45, 1, (2009) 30-37.
- [7] Б.С. Сеплярский, С.Г. Вадченко, Г.Б. Брауэр, С.В. Костин, Хим. Физ. и Мезоск., 10, 2, (2008) 135-145.
- [8] Б.С. Сеплярский, ДАН, 396, 5, (2004) 640-643.
- [9] B.S. Seplyarskii, R.A. Kochetkov, N.M. Rubtsov, Inter. Jour. of SHS, 24, 3, (2015) 174-175.
- [10] B.S. Seplyarskii, N.A. Kochetov, R.A. Kochetkov, Inter. Jour. of SHS, 24, 2, 95-97.