

**МАКРОКИНЕТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ
И ГРАНУЛИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ 5Ti + 3Si: ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСНОГО
ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ И РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ТИТАНА**

© 2022 г. Б. С. Сеплярский^{а,*}, Р. А. Кочетков^а, Т. Г. Лисина^а, Н. И. Абзалов^а, Д. С. Васильев^а

^аИнститут структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН,
Черноголовка, Россия

*e-mail: sep1b1@mail.ru

Поступила в редакцию 25.10.2021 г.

После доработки 05.12.2021 г.

Принята к публикации 07.12.2021 г.

Синтез карбида титана и металлокерамики на его основе методом СВС показал, что переход от порошковой смеси к гранулированной уменьшает влияние примесного газовойделения из частиц компонентов и обеспечивает стабильность режима горения без изменения фазового состава целевых продуктов. Впервые сравнивается горение порошковых и гранулированных смесей 5Ti + 3Si при использовании частиц титана разных размеров. Скорость горения порошковой смеси из крупнодисперсного титана была выше, чем из мелкодисперсного, что, в соответствии конвективно-кондуктивной моделью горения, определяется влиянием примесного газовойделения. Сформулированные условия прогрева компонентов порошковых смесей перед фронтом горения дали возможность объяснить увеличение скорости горения после гранулирования смеси для мелкодисперсного титана и уменьшение для крупнодисперсного титана. В отличие от порошковой, скорость горения гранулированной смеси из мелкодисперсного титана была выше, чем из крупнодисперсного. Следовательно, для гранулированных смесей, где влияние примесных газов на процесс горения существенно снижено, определяющим фактором, влияющим на скорость горения, становится размер частиц исходных компонентов. Варьируя размеры гранул от 0.6 до 1.7 мм, по экспериментальной скорости горения авторы рассчитали скорости сгорания вещества гранул и время передачи горения от гранулы к грануле. Предложенные критерии локализации примесного газовойделения позволяют выявить, является ли необходимой грануляция порошковой смеси при масштабировании процесса высокотемпературного синтеза.

Ключевые слова: макрокинетика, СВС, 5Ti–3Si, примесное газовойделение, размер гранул, размер частиц титана

DOI: 10.31857/S0044453722050272

В процессах СВС при температурах горения порядка нескольких тысяч градусов, как правило, наблюдается выделение примесных газов, от количества которых во многом зависит режим горения. Так, нагрев шихты, содержащей титан, сопровождается значительной десорбцией примесных газов [1–3]. Порошки металлов разных марок и даже отдельные партии одной и той же марки могут обладать разной способностью к адсорбции/десорбции газифицирующихся примесей [4]. Неметаллические компоненты тоже могут вносить заметный вклад в газовойделение, причем вклад их кристаллических модификаций не высок по сравнению с аморфными аналогами [3, 4]. Сильное влияние примесного газовойделения (ПГ) на скорость фронта в порошковых средах объясняет конвективно-кондуктивная модель горения (ККМГ) [5, 6]. Для стабилизации процес-

сов СВС используется гранулирование исходной порошковой смеси, при котором изменение структуры пористой среды на порядки увеличивает газопроницаемость засыпки. Продукты синтеза, полученные из гранулированной шихты, представляют собой гранулы того же размера, которые практически не спекаются друг с другом. Поэтому высокая газопроницаемость гранулированной шихты практически не изменяется в процессе горения, что в сочетании с небольшими размерами гранул обеспечивает быстрый отвод примесных газов из зоны реакции [7, 8].

При анализе литературы по горению смеси 5Ti + 3Si обращает на себя внимание то, что основным объектом исследования были прессованные образцы из порошковой смеси [1, 9–15]. Эта система считается модельной для изучения процесса так называемого “безгазового горения” [1,

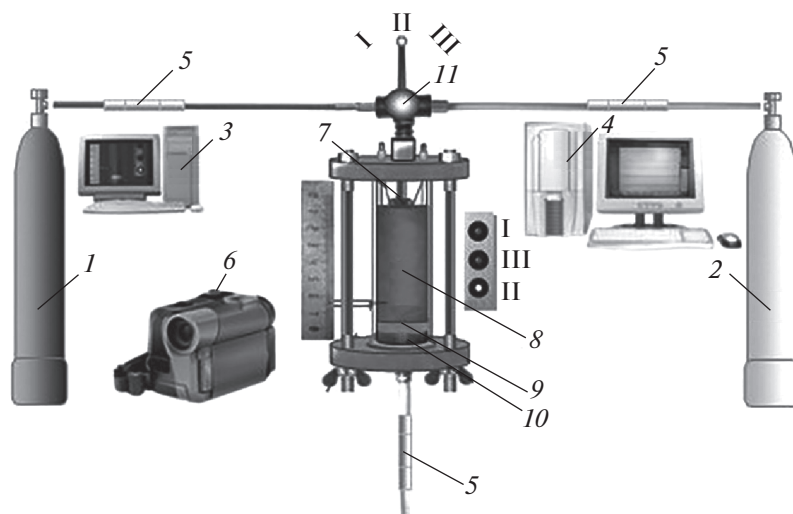


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – баллон с азотом, 2 – баллон с аргоном, 3 – компьютер для записи видеосигнала, 4 – компьютер для записи показаний датчиков через АЦП, 5 – датчики расхода и давления, 6 – цифровая видеокамера, 7 – электрическая спираль, 8 – шихта, 9 – слой минеральной ваты, 10 – металлическая сетка, 11 – переключатель газа (положение I – азот; II – аргон; III – подача газа перекрыта).

9], а в экспериментах зачастую используется дегазация образцов. Так, например, в работе [10] синтез силицидов титана методом теплового взрыва с использованием частиц Ti разных размеров оказался возможным только после дегазации образцов. Авторы [11] исследовали, как изменение размера частиц Ti в дегазированной смеси 5Ti–3Si влияет на проницаемость продуктов синтеза. В других экспериментальных работах предварительная дегазация образцов не проводилась. В работе [12] при сравнении скорости и температуры горения образцов разного стехиометрического состава возможное влияние примесных газов не рассматривалось. В статье [13], где измеренные температуры и скорости фронта горения компактных образцов 5Ti + 3Si использовались для численного моделирования кинетики СВС, в уравнении теплового баланса учитывался только кондуктивный перенос тепла и конвективные и радиационные потери, без влияния газа. В работах [14, 15] получены качественно разные зависимости скорости горения смеси 5Ti+3Si от размера частиц Ti, при этом авторы обеих работ считали горение данной смеси “безгазовым”. При интерпретации данных статьи [15] авторы не сопоставляли их с результатами более ранней работы [14].

Таким образом, в настоящее время остается открытым вопрос, необходимо ли учитывать влияние ПГ при интерпретации экспериментальных результатов и при масштабировании синтеза силицидов титана.

Цель настоящей работы – выявить механизм влияния ПГ на горение порошковой смеси 5Ti + 3Si, используя гранулирование как инструмент нивелирования влияния примесного газовыделе-

ния. Другой целью было объяснение природы изменения скорости горения при переходе от порошковых к гранулированным смесям с позиций конвективно-кондуктивной модели горения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Изучение закономерностей горения выполнялось на оригинальной экспериментальной установке (рис. 1). Эксперименты проводились по следующей схеме: исследуемая смесь (8) засыпалась в вертикально установленную прозрачную кварцевую трубку (внешний диаметр – 19 мм, высота – 90 мм, толщина стенок – 2 мм), на подложку из минеральной ваты (основа Al₂O₃) (9) (см. рис. 2). Сигналы от датчиков (5) и светодиодов, информирующих о положении переключателя подачи газа (11), через АЦП в режиме реального времени поступали в компьютер (4). Иницирование процесса горения осуществлялось с верхнего торца засыпки с помощью теплового импульса от вольфрамовой спирали (7). Видеозапись горения выполнялась с использованием камеры SONY FDR AX-700 (скорость съемки 100–250 кадров/с) (6). На основании покадровой обработки видеозаписей рассчитывалась скорость фронта горения. Для исключения усадки несгоревшей части засыпки в процессе горения и получения стабильных результатов перед каждым экспериментом образец продували потоком аргона при перепаде давления 1 атм. Высота засыпки исходной смеси (как порошковой, так и гранулированной) после продува была равна 40 ± 5 мм.

Распределение частиц компонентов по размерам определяли на лазерном анализаторе Microsiz-

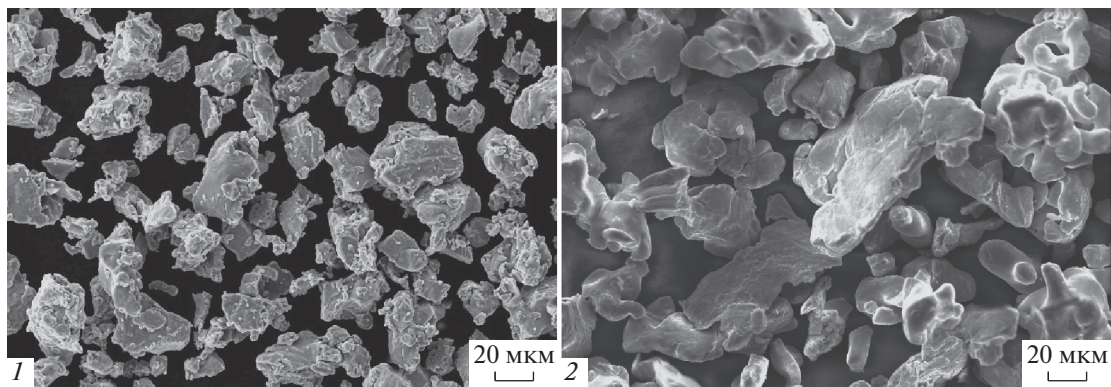


Рис. 2. Фотографии SEM исходных порошков титана: 1 – мелкодисперсного и 2 – крупнодисперсного.

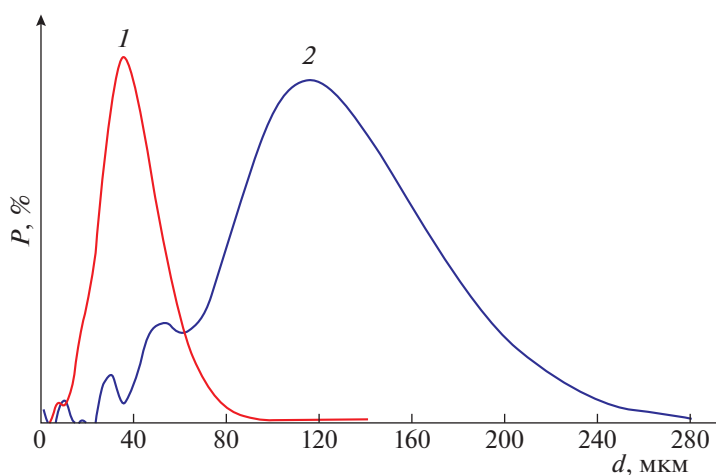


Рис. 3. Распределение частиц 1 – мелкодисперсного и 2 – крупнодисперсного титана.

eg-201С. Фазовый состав конечного продукта изучали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М с использованием монохроматического CuK_α -излучения. Съемку дифрактограмм проводили в режиме шагового сканирования в интервале углов $2\theta = 20\text{--}80^\circ$ с шагом съемки 0.2° . Полученные данные анализировали с использованием базы данных PDF-2. Микроструктура порошков титана исследовалась методом SEM на микроскопе Ultra Plus фирмы Carl Zeiss.

Для приготовления исходных смесей использованы российские порошки Ti промышленного производства марки ПТМ с чистотой 99% различного фракционного состава: мелкодисперсный (<54 мкм), крупнодисперсный (<169 мкм); порошок полупроводникового Si (<2.1 мкм, чистота 99.99%) и 4%-й спиртовой раствор поливинилбутирала для гранулирования. Для краткости изложения будем называть исходные смеси на основе мелкодисперсного титана смесями I, а на основе крупнодисперсного – смесями II. На рис. 2 пред-

ставлены фотографии SEM исходных порошков титана.

Рисунок 3 показывает массовое распределение по размерам частиц титана исходных порошков.

Гранулирование составов проводилось следующим образом. Предварительно исходная порошковая смесь перемешивалась в течение 4 ч в гравитационном смесителе. Затем к полученной смеси добавляли 4%-й (мас.) раствор поливинилбутирала в этиловом спирте до образования пастообразной массы, которая после смешения протиралась через сито. Полученные частицы окатывались на вращающейся горизонтальной поверхности для придания им сферической формы, затем высушивались на воздухе в течение 10 ч и рассеивались на вибросите. На рис. 4 приведены фотографии исходной порошковой и гранулированной смесей $5\text{Ti} + 3\text{Si}$ с характерным размером гранул $D = 0.6$ и 1.7 мм.

В экспериментах использовались гранулы фракций: $0.4\text{--}0.8$, $0.8\text{--}1.2$, $1.4\text{--}2$ мм, а также широкой фракции $0.6\text{--}1.6$ мм. При расчетах за раз-

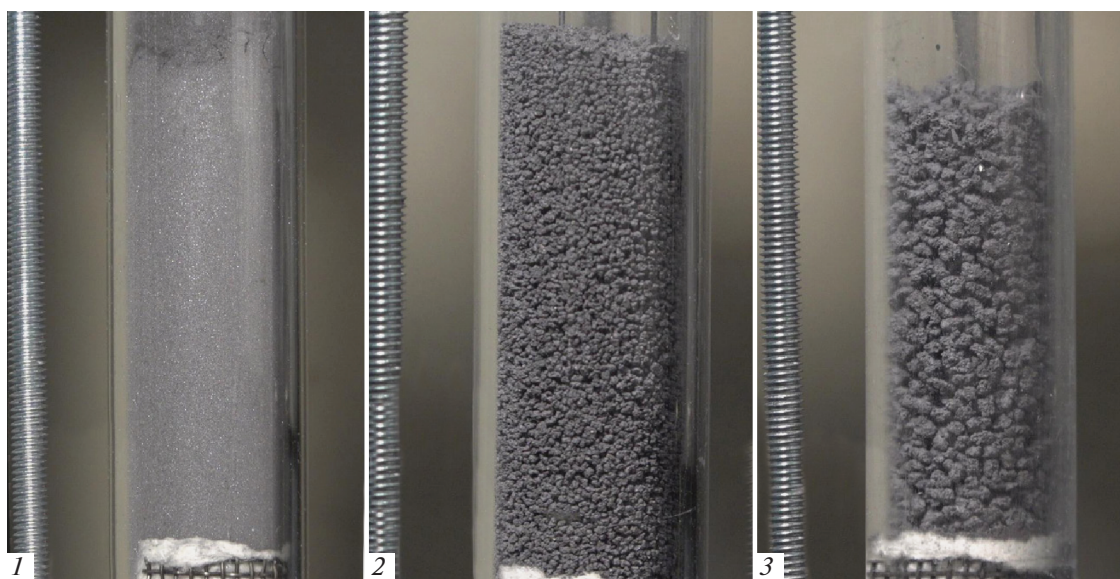


Рис. 4. Фотографии смеси $5\text{Ti} + 3\text{Si}$: 1 – исходная порошковая смесь, 2 – гранулированная смесь с гранулами размером $D = 0.6$ мм, 3 – гранулированная смесь с гранулами размером $D = 1.7$ мм.

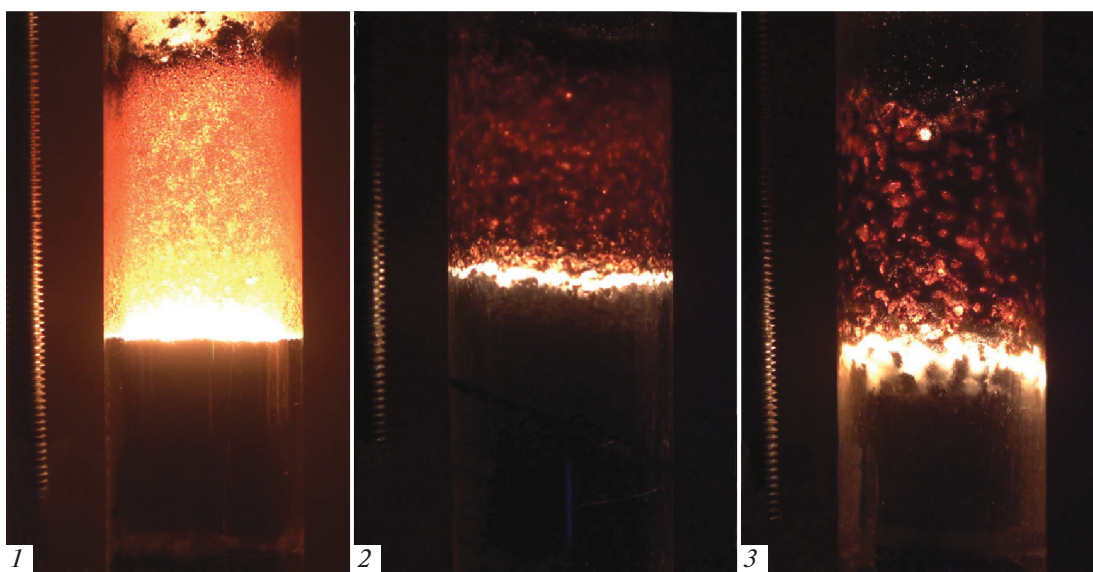


Рис. 5. Кадры горения смеси $5\text{Ti}-3\text{Si}$: 1 – порошковой; 2 – гранулированной с гранулами размером $D = 0.6$ мм, 3 – гранулированной с гранулами размером $D = 1.7$ мм.

мер гранул принималось среднее значение размера в каждой фракции: $D = 0.6, 1, 1.7$ мм и $D = 1.1$ мм соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 5 приведены кадры горения порошковой смеси $5\text{Ti}-3\text{Si}$ и гранулированной смеси с гранулами размером $D = 0.6$ и 1.7 мм.

На рис. 6 приведена зависимость значений скоростей распространения фронта горения для гра-

нулированных составов **I**, **II** от размера гранул, а также значения скорости горения порошковых смесей **I**, **II**. Приведенные значения скоростей горения являются средними из 3–4 экспериментов, разброс значений составлял не более 10%.

При анализе результатов, приведенных на рис. 6, в первую очередь обращает на себя внимание факт, что для состава **I** на основе мелкодисперсного титана скорость горения порошковой смеси (линия 3) ниже, чем гранулированной. В то же время для состава **II** с крупнодисперсным тита-

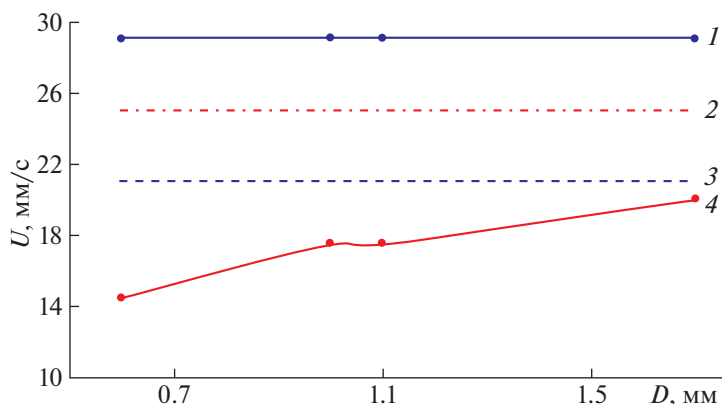


Рис. 6. Зависимости скорости горения от размера гранул D для гранулированных смесей 5Ti–3Si: (1) состав I с мелкодисперсным титаном; (4) состав II с крупнодисперсным титаном. Пунктирными линиями (2), (3) показаны значения скорости горения порошковой смеси II и I соответственно.

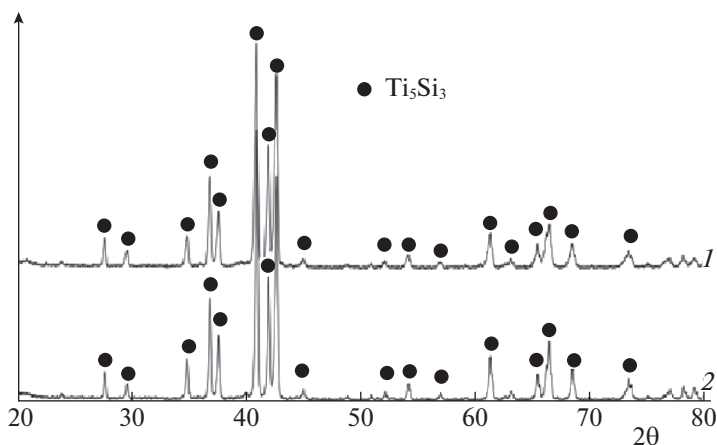


Рис. 7. Результаты рентгенофазового анализа продуктов горения смеси 5Ti + 3Si для фракций с гранулами среднего размера 0.6 (1) и 1.7 (2) мм.

ном скорость горения уменьшалась при переходе от порошковой к гранулированной смеси. В отличие от порошковой смеси, для всех фракций гранул скорость горения гранулированной смеси I (линия 1) была выше, чем смеси II (линия 4). При увеличении среднего размера гранул D с 0.6 до 1.7 мм скорость горения смеси I $U = 29$ мм/с не изменялась, а для смеси II эксперименты показали увеличение скорости фронта горения с 14.5 до 20 мм/с.

По данным РФА, фазовый состав продуктов горения для гранулированных смесей I и II не изменялся при увеличении размера гранул с 0.6 до 1.7 мм. Как и для порошковых смесей, рентгенограммы содержат только пики фазы Ti_5Si_3 (рис. 7).

Таким образом, несмотря на один и тот же состав исходной смеси и фазовый состав продуктов горения, для смеси I на основе мелкодисперсного Ti скорость горения увеличивается при переходе от порошковых к гранулированным смесям, а для

смеси II с крупнодисперсным Ti — уменьшается. В рамках теории распространения фронта пламени в гетерогенной конденсированной среде [16], основанной на кондуктивном механизме переноса тепла в волне горения, объяснить различие в изменении скорости горения после гранулирования для смесей I, II невозможно.

Для объяснения полученных результатов обратимся к конвективно-кондуктивной модели горения (ККМГ) [5, 6]. В рамках данной модели скорость перемещения слоя расплава под действием капиллярных сил и разности давлений примесных газов перед и за слоем расплава и есть видимая скорость распространения фронта горения. Согласно ККМГ, в порошковой смеси увеличение давления примесных газов перед фронтом реакции (слоем расплава) приводит к снижению скорости горения, а за фронтом — к ее увеличению. Поэтому необходимо определить, успевают ли частицы исходных компонентов

Таблица 1. Время тепловой релаксации t_h частиц Ti с характерным размером d , а также L , t для порошковых смесей I, II

Смесь	d , мкм	t_h , мс	U_p , мм/с	L , мкм	t , мс
I	35	38	21	48	2300
II	120	450	25	40	1600

прогреться и выделить часть примесных газов перед фронтом горения.

Будем считать, что в порошковой смеси частицы исходных компонентов успевают прогреться перед фронтом горения при одновременном выполнении двух условий. Во-первых, характерный размер частиц d должен быть меньше ширины зоны прогрева $L = a/U_p$, где U_p – экспериментальная скорость горения порошковой смеси, a – ее коэффициент температуропроводности:

$$d < L. \quad (1)$$

Во-вторых, время тепловой релаксации частицы $t_h = d^2/(4a_1)$ (a_1 – коэффициент температуропроводности вещества частицы) меньше характерного времени ее нахождения в зоне прогрева волны горения $t = L/U_p = a/(U_p)^2$ [1]:

$$t_h < t. \quad (2)$$

В таблице 1 приведены результаты расчета t_h для частиц Ti разного размера, а также L , t , для смесей I, II.

За характерные размеры d частиц Ti принимались значения максимума распределения по размерам: $d = 35$ мкм для мелкодисперсного и $d = 120$ мкм для крупнодисперсного титана (рис. 3). При расчете использованы следующие значения параметров: $a = 10^{-6}$ м²/с [17], $a_1(\text{Ti}) = 8 \times 10^{-6}$ м²/с [18], $a_1(\text{Si}) = 5 \times 10^{-5}$ м²/с [19]. Для частиц Si с характерным размером около 2 мкм величина $t_h = 2 \times 10^{-8}$ с на порядки ниже, чем для титана, и условия прогрева (1), (2) выполняются. Поэтому ПГ из Si (если оно есть) происходит перед фронтом горения для обеих порошковых смесей и должно оказывать одинаковое влияние на скорость распространения фронта горения в них. Однако, ПГ из частиц кремния находится на уровне образцов Ti + C после термовакуумной обработки [3] и, следовательно, не оказывает заметного влияния на скорость распространения фронта.

Результаты расчетов показали, что условие (2) выполняется для использованных в экспериментах порошков титана. Условие прогрева (1) выполнено только для титана с $d = 35$ мкм (смесь I). Следовательно, при горении порошковой смеси I, в отличие от смеси II с $d = 120$ мкм, ПГ из титана происходит в зоне прогрева волны горения и замедляет ее распространение. Поэтому для смеси I

скорость горения порошковой смеси U_p меньше, чем для смеси II (рис. 6).

В соответствии с широко используемой теорией [16], уменьшение размера частиц исходных реагентов должно приводить к увеличению скорости горения. Экспериментальные результаты для порошковых смесей противоречат выводам работы [16], а для гранулированных смесей – ей соответствуют.

Чтобы объяснить, почему при переходе от порошковой к гранулированной для смеси I скорость горения увеличивается, а для смеси II – уменьшается (рис. 6), необходимо рассмотреть особенности распространения фронта горения в гранулированных системах. Гранулированная смесь состоит из отдельных ячеек (гранул), содержащих перемешанные реагенты и способных к самостоятельному горению, а также порового пространства между ними, занятого газом. Именно из-за дискретности гранулированных смесей и разности размеров гранул и зерен образующегося продукта силы поверхностного натяжения препятствуют вытеканию расплава за пределы отдельных гранул. Поэтому высокая газопроницаемость такой шихты практически не меняется в процессе горения. Скорость горения гранулированной смеси определяется как скоростью сгорания отдельных гранул, так и скоростью передачи тепла от гранулы к грануле, которая зависит от площади контактов и эффективности кондуктивного теплообмена между гранулами. Поскольку размер гранул намного больше размеров применяемых в эксперименте исходных компонентов, то процесс сгорания отдельной гранулы можно считать аналогичным процессу горения порошковой смеси. Однако в грануле созданы лучшие условия для отвода ПГ из зоны горения по сравнению с порошковой засыпкой, так как длина зоны фильтрации по грануле до пористого пространства между гранулами не превышает половину ее диаметра. В сочетании с высокой газопроницаемостью всей засыпки это приводит к незначительному влиянию ПГ как на процесс горения самих гранул, так и всего образца [8]. Если в порошковой смеси ПГ в зоне прогрева отсутствует, то гранулирование приведет к снижению скорости горения образца. Это связано с наличием стадии передачи горения от гранулы к грануле. Такие условия реализуются в смеси II с крупнодисперсным титаном. Для состава, где примесные газы выделяются в зоне прогрева и оказывают тормозящее влияние, гранулирование, напротив, приводит к увеличению скорости горения. Этим условиям отвечает горение порошковой смеси II с мелкодисперсным титаном.

Самостоятельный интерес представляет исследование параметров горения физически выделенных ячеек дисперсной смеси – отдельных гра-

нул. В процессе горения гранулы смесей **I**, **II** сохраняли свои размеры и не спекались друг с другом, поэтому можно предположить, что передача тепла между ними происходит, в основном, в местах контакта гранул и определяется кондуктивным механизмом теплопередачи [20]. Тогда, следуя [21], можно рассчитать такие характеристики, как скорость сгорания вещества гранулы v_{com} и время передачи горения от гранулы к грануле t_{ig} . Необходимым условием для применения такого подхода является выполнение неравенства:

$$h < D, \quad (3)$$

где D – размер гранулы, h – глубина прогрева гранулы к моменту воспламенения

$$h = (at_b)^{1/2}, \quad (4)$$

a – коэффициент температуропроводности гранулы равный 10^{-6} м²/с [17], и

$$t_b = D/U, \quad (5)$$

где t_b – время сгорания гранулы, рассчитанное по данным экспериментов. Используя экспериментальные скорости горения (рис. 6), по формулам (4), (5) получаем (оценка сверху), что глубина прогрева гранул h для смеси **I** при изменении размера гранулы от 0.6 мм до 1.7 мм возрастает с 0.14 мм до 0.24 мм, а для смеси **II** – с 0.2 до 0.29 мм. Поскольку $h < D$ для гранул всех размеров, то их прогрев до момента воспламенения можно описать моделью полубесконечного тела. Следовательно, время передачи горения от одной гранулы к другой можно считать равным для гранул разных размеров.

В кондуктивном режиме в образце из большого количества гранул время сгорания гранулы t_b (5) равно сумме времени сгорания вещества гранулы t_{com} и времени передачи горения от гранулы к грануле t_{ig} :

$$t_b = t_{\text{com}} + t_{\text{ig}}. \quad (6)$$

Полагая, что скорость сгорания вещества смеси v_{com} одинакова для гранул разных размеров, можно рассчитать v_{com} и t_{ig} .

После подстановки (5) в формулу (6) и замены $t_{\text{com}} = D/v_{\text{com}}$ получаем выражение, связывающее экспериментальное значение скорости горения гранулированной смеси U в кондуктивном режиме с v_{com} и t_{ig} :

$$U = v_{\text{com}}/(1 + v_{\text{com}}t_{\text{ig}}/D) = v_{\text{com}}/(1 + t_{\text{ig}}/t_{\text{com}}). \quad (7)$$

При последовательной подстановке в (7) значений D и U для двух фракций гранул имеем систему двух уравнений с двумя неизвестными, решая которую получаем значения v_{com} и t_{ig} . Подставляя полученные значения v_{com} и t_{ig} в (7), можно вы-

числить скорость горения смеси из гранул другого размера.

Как уже отмечалось выше, скорость горения смеси **I** не зависела от размера гранул и равнялась $U = 29$ мм/с. Из выражения (6) видно, что скорость горения для гранул разных размеров будет одинаковой при условии, если $t_{\text{ig}} \ll t_{\text{com}}$. Таким образом, для гранулированной смеси **I** скорость распространения фронта практически равна скорости горения вещества гранулы $U = v_{\text{com}}$. Отметим, что значение $v_{\text{com}} = 29$ мм/с заметно выше скорости горения исходной порошковой смеси $U_p = 21$ мм/с.

Для смеси **II** решение уравнений, полученных из (7) при подстановке данных для фракций гранул с $D = 0.6$ и 1.7 мм дает $t_{\text{ig}} = 0.0176$ с, $v_{\text{com}} = 25.2$ мм/с. Для верификации полученных данных рассчитаем, используя полученные значения t_{ig} и v_{com} , значение скорости горения смеси средней фракции с $D = 1$ мм. Получаем 18 мм/с, что практически не отличается от среднего экспериментального значения $U = 17.5$ мм/с. Аналогичный расчет по скоростям горения для фракций с $D = 0.6$ и 1 мм дает $t_{\text{ig}} = 0.0177$ с, $v_{\text{com}} = 25.4$ мм/с. Рассчитанная по этим данным скорость горения гранулированной смеси с $D = 1.7$ мм $U = 20$ мм/с, что совпадает со средним значением, полученным в экспериментах. Видно, что значения v_{com} , t_{ig} , рассчитанные на основе экспериментальных данных для разных гранул, практически совпадают. Обращаем внимание читателя, что для смеси **II** значение $v_{\text{com}} = 25.3$ мм/с практически совпадает со скоростью горения исходной порошковой смеси $U_p = 25$ мм/с. Расчеты подтвердили правильность предположения о кондуктивном режиме горения гранулированной смеси **II** для всех исследованных фракций гранул: время воспламенения гранул не зависит от их размера, скорость горения вещества гранул для всех фракций одинакова.

В соответствии с результатами экспериментов, время сгорания отдельной гранулы t_{com} при изменении размера гранулы от 0.6 мм до 1.7 мм возрастает с 0.021 до 0.051 с для смеси **I** и с 0.024 до 0.067 с для смеси **II**. В отличие от случая гранулированных смесей **Ti + C** [21], для гранул всех фракций время сгорания вещества гранулы больше максимального времени передачи горения от гранулы к грануле $t_{\text{ig}} \approx 0.0177$.

Таким образом, проведенные исследования показали, что порошковую смесь 5Ti + 3Si нельзя считать “безгазовой”, поскольку моделью горения удалось объяснить необычную (с точки зрения классической безгазовой теории горения [16]) зависимость скорости горения от размеров частиц

компонентов и изменение скорости горения при переходе от порошковых к гранулированным смесям. Впервые сформулированные в работе критерии для области локализации ПГ позволяют выяснить, является ли существенным влияние примесных газов на режим горения порошковой смеси, а значит, принять аргументированное решение, есть ли необходимость в гранулировании исходной порошковой смеси при масштабировании процесса высокотемпературного синтеза.

ВЫВОДЫ

1. Выяснена причина более высокой скорости горения порошковой смеси $5\text{Ti}+3\text{Si}$ с крупнодисперсным порошком титана, по сравнению с мелкодисперсным.

2. Экспериментально-расчетным путем определена скорость сгорания вещества гранул и время передачи горения от гранулы к грануле для смесей с титаном разных фракций.

3. С позиций конвективно-кондуктивной модели горения объяснен механизм изменения скорости горения при переходе от порошковых к гранулированным смесям.

4. Впервые сформулированы и экспериментально подтверждены необходимые и достаточные условия для прогрева компонентов порошковых смесей в зоне прогрева волны горения.

5. Установлено, что разное влияние размеров частиц титана на скорость горения как для порошковых, так и для гранулированных смесей не связаны с различием в фазовом составе конденсированных продуктов и полнотой превращения исходных реагентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rogachev A.S., Mukasyan A.S.* Combustion for material synthesis. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. P. 398.
2. *Мукасян А.С., Шугаев В.А., Киртяков Р.М.* // ФГВ. 1993. Т. 2. № 1. С. 9.
<https://doi.org/10.1007/BF00755319>
3. *Мержанов А.Г., Рогачев А.С., Умаров Л.М., Кирьяков Н.В.* // ФГВ. 1997. Т. 33. № 4. С. 55.
4. *Вершинников В.И., Филоненко А.К.* // ФГВ. 1978. Т. 14. № 5. С. 42.
<https://doi.org/10.1007/BF00789716>
5. *Сеплярский Б.С.* // Докл. АН. 2004. Т. 396. № 5. С. 640.
6. *Rubtsov N.M., Seplyarskii B.S., Alymov M.I.* Ignition and Wave Processes in Combustion of Solids, Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2017, Chapter 4, The Convective–Conductive Theory of Combustion of Condensed Substances. P. 117–171.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-56508-8_4
7. *Amosov A.P., Makarenko A.G., Samboruk A.R. et al.* // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2010. V. 19. P. 70.
<https://doi.org/10.3103/S10613862100101274>
8. *Seplyarskii B.S., Kochetkov R.A.* // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2017. V. 26. № 2. P. 134.
<https://doi.org/10.3103/S106138621702011X>
9. *Вадченко С.Г.* // ФГВ. 2002. Т. 38. № 1. С. 55.
<https://doi.org/10.1023/A:101400590093>
10. *Trambukis J., Munir Z.A.* // J. Amer. Ceram. Soc. 1990. V. 73. № 5. P. 1240.
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05186.x>
11. *Мазной А.С., Кирьяшкин А.И.* // ФГВ. 2014. Т. 50. № 1. С. 69.
<https://doi.org/10.1134/s0010508214010079>
12. *Yeh C.L., Wang H.J., Chen W.H.* // J. Alloys Compd. 2008. V. 450. № 1–2. P. 200.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.10.074>
13. *Yeh C.L., Hwang P.W., Chen Y.L.* // J. Alloys Compd. 2017. V. 714. P. 567.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.283>
14. *Саркисян А.Р., Долуханян С.К., Боровинская И.П., Мержанов А.Г.* // ФГВ. 1978. Т. 14. № 3. P. 49.
<https://doi.org/10.1007/BF00740494>
15. *Рогачев А.С., Мукасян А.С.* // ФГВ. 2015. Т. 51. № 1. С. 66.
<https://doi.org/10.1134/S0010508215010050>
16. *Алдушин А.П., Мартемьянова Т.М., Мержанов А.Г. и др.* // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 8. № 2. С. 202.
<https://doi.org/10.1007/BF00740444>
17. *Зенин А.А., Мержанов А.Г., Нерсисян Г.А.* // ФГВ. 1981. Т. 17. № 1. С. 79.
18. *Slezak T., Zmywaczyk J., Koniorczyk P.* // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2170. P. 020019.
<https://doi.org/10.1063/1.5132738>
19. *Abeles B., Beers D.S., Cody G.D., Dismukes J.P.* // Phys. Rev. (USA). 1962. V. 125. P. 44.
20. *Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А., Вадченко С.Г.* // ФГВ. Т. 52. № 6. С. 51.
<https://doi.org/10.15372/FGV20160606>
21. *Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А., Лисина Т.Г., Абзалов Н.И.* // ФГВ. 2021. Т. 57. № 1. С. 65.
<https://doi.org/10.15372/FGV20210107>