

УДК 536.46

МАКРОКИНЕТИКА ГОРЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ И ГРАНУЛИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ ТИТАНА С РАЗНЫМИ АЛЛОТРОПНЫМИ ФОРМАМИ УГЛЕРОДА

Б. С. Сеплярский, Р. А. Кочетков, Т. Г. Лисина, Н. И. Абзалов

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН
142432 Черноголовка, seplb1@mail.ru

В процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза даже незначительное изменение содержания примесных газов может привести к изменению режима горения и характеристик целевых продуктов. В данной работе впервые определена зависимость скорости горения гранулированных смесей $Ti + C$ от размера частиц титана и исследовано влияние примесного газовыделения при использовании различных аллотропных модификаций углерода (графит/сажа). Экспериментальные результаты анализировались с применением конвективно-кондуктивной модели горения, объясняющей сильное влияние примесного газовыделения на скорость фронта. Для гранулированных смесей, где влияние примесных газов нивелировано, определяющим становится скорость взаимодействия компонентов. Эксперименты показали, что скорости горения гранулированных смесей титана с сажей заметно превышают скорости горения смеси титана с графитом. Кривые, аппроксимирующие зависимость скорости горения гранулированной смеси титан — графит от размера частиц титана, соответствуют линейному закону взаимодействия исходных компонентов, а в смеси титан — сажа взаимодействие происходит по параболическому закону.

Ключевые слова: СВС, макрокинетика, скорость горения, порошковые смеси, гранулы, примесное газовыделение, размеры частиц титана, сажа, графит.

DOI 10.15372/FGV20220311

ВВЕДЕНИЕ

Стабильность свойств металлокерамических материалов, получаемых методом высокотемпературного самораспространяющегося синтеза (СВС) [1], зависит от воспроизводимости параметров горения. При температурах горения порядка нескольких тысяч градусов часто наблюдается выделение примесных газов из порошков одного или более компонентов [1–3]. Даже незначительное изменение содержания примесных газов может привести к изменению режима горения и характеристик целевых продуктов. Для объяснения сильного влияния примесного газовыделения (ПГ) на скорость фронта была разработана конвективно-кондуктивная модель горения (ККМГ) [4]. Такие способы стабилизации процессов СВС, как термовакуумная обработка исходных образцов, представляют собой довольно длительные и энергоемкие процессы [5, 6]. Другой подход заключается в гранулировании исходной порош-

ковой смеси [7]. Особенностью гранулированных смесей является отличная от порошковых структура пористой среды. В соответствии с ККМГ это позволяет объяснить нивелирование влияния ПГ на скорость горения и фазовый состав продуктов синтеза [4, 7–9].

Исследование составов на основе $Ti-C$ ($Ti + C + TiC$, $Ti + xC$, $Ti-C-Ni$, $Ti-C-Cr$) с углеродом в виде сажи [8, 10–12] показало, что скорость горения гранулированных смесей, как правило, выше скорости горения порошковых смесей того же состава. Сажа является хорошим адсорбентом благодаря высокой удельной поверхности. Поскольку в ПГ в зоне прогрева волны горения вносят вклад водород, растворенный в титане, и газы, адсорбированные на поверхности сажи, отделить влияние ПГ из титана на скорость горения невозможно. Из работы [2] известно, что выделение газов из смеси $Ti + 2B$ с аморфным бором не зависит от размера частиц титана, а при замене аморфного бора кристаллическим вклад бора в ПГ становится несущественным. Авторы [2] считали, что особого изучения требует вопрос, почему в

некоторых случаях примесные газы увеличивают скорость горения СВС-смесей, а в других — нет.

Цель настоящей работы — определить, как замена аморфной сажи кристаллическим графитом повлияет на изменение скорости горения при переходе от порошковых к гранулированным смесям Ti + C с частицами титана разного размера. Другой целью было выяснение природы такого изменения с позиций конвективно-кондуктивной модели горения, а также установление зависимости скорости горения гранулированных шихт от размера частиц титана при различных аллотропных модификациях углерода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Используемые в данной работе исходные вещества и их краткие характеристики приведены в табл. 1. В экспериментах применялись порошки титана ПТМ двух размеров. Для приготовления смеси с графитом использовались узкие фракции, отсеянные из крупнодисперсного титана, с размерами частиц $d < 40$ мкм, $40 \div 80$, $90 \div 125$ и $125 \div 200$ мкм. Для приготовления смеси с сажей отсеяны узкие фракции с размерами частиц $d < 63$ мкм, $63 \div 90$, $90 \div 125$ и $125 \div 160$ мкм. Плотности порошковых смесей ρ с различными фракциями титана приведены в табл. 2.

В расчетах в качестве характерных размеров d частиц Ti исходных порошков принимались значения максимума распределения по размерам: $d = 35$ мкм для мелкодисперсного и

Таблица 1
Характеристики исходных компонентов

Компонент	Марка	Размеры частиц, мкм	
		до 50 % (мас.)	до 90 % (мас.)
Титан	ПТМ	<34	<54
	ПТМ	<105	<169
Углерод (сажа)	П-803	<1	<2
Углерод (графит)	Aldrich	<5	<14
Поливинилбутираль			
Спирт этиловый технический 95 %			

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчетов параметров L , t , t_h для порошковой смеси Ti + C (сажа/графит)

d , мкм (Ti)	ρ , г/см ³	u , мм/с	t_h , мкс (Ti)	L , мкм	t , мс
Ti + C (сажа)					
31.5	1.10	12	31	83	7
76.5	1.11	8	183	125	6
107.5	1.08	7	361	143	20
120	1.15	11	450	91	8
142.5	1.10	5	635	200	40
Ti + C (графит)					
20	1.25	25	13	40	1.6
35	1.22	20	38	50	2.5
60	1.20	10	113	100	10
107.5	1.3	7.5	361	133	18
120	1.20	10	450	100	10
162	1.3	6	820	167	28

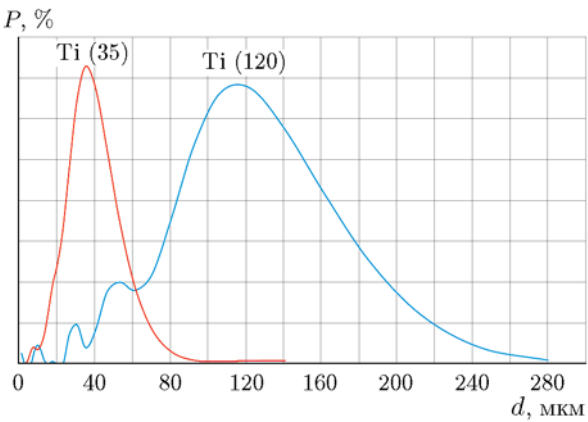


Рис. 1. Распределение по размерам частиц титана исходных фракций

$d = 120$ мкм для крупнодисперсного титана. На рис. 1 показано распределение по размерам частиц титана исходных фракций. Характерные размеры частиц узких фракций определялись как среднее арифметическое верхней и нижней границ фракции.

Экспериментальная установка и методика гранулирования смесей описаны в [11]. В данной работе использовались гранулы фракции $0.6 \div 1.6$ мм, плотность гранулированных смесей с графитом составляла $0.7 \div 0.73$ г/см³, а с сажей — $0.7 \div 0.8$ г/см³.

Распределение частиц компонентов по размерам определяли на лазерном анализаторе Microsizer-201C. Видеозапись горения выполнялась камерой SONY FDR AX-700 (скорость съемки $100 \div 250$ кадр/с). Фазовый состав конечного продукта изучали с помощью дифрактометра ДРОН-3М с использованием монохроматического $\text{Cu } K_\alpha$ -излучения. Съемку дифрактограмм проводили в режиме шагового сканирования в интервале углов $2\theta = 20 \div 80^\circ$ с шагом съемки 0.2° . Полученные данные анализировали с использованием базы данных PDF-2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Видеосъемка показала, что горение как порошковых, так и гранулированных смесей $\text{Ti} + \text{C}$ (сажа/графит) происходит в стационарном режиме. Фронт горения плоский, что позволяет достоверно определить скорость горения. На рис. 2 приведены кадры горения порошковой и гранулированной шихты $\text{Ti} + \text{C}$ (графит). Фронт волны горения смеси $\text{Ti} + \text{C}$ (сажа) выглядит подобным образом. Настройки видеокамеры менялись в ходе экспериментов с разными шихтами для получения наиболее четкого изображения, поэтому в данном случае отличие в яркости образцов на фотографиях не свидетельствует о разной температуре горения.

На рис. 3, 4 приведены экспериментальные значения скорости горения порошковых и гранулированных смесей $\text{Ti} + \text{C}$ (сажа) и $\text{Ti} + \text{C}$ (графит) в зависимости от среднего размера частиц титана и аппроксимирующие кривые, построенные по данным для узких фракций. Отклонение экспериментальных данных от средних значений не превышает 10 %.

При анализе данных, представленных на рис. 3, 4, в первую очередь обращает на себя

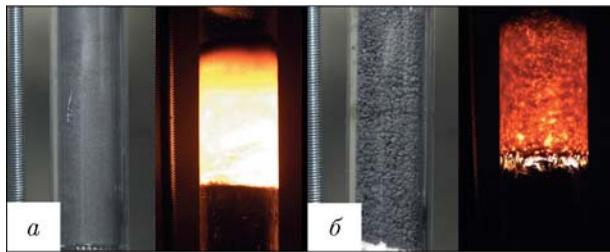


Рис. 2. Внешний вид исходных смесей и кадры видеосъемки горения порошковой (а) и гранулированной (б) шихты $\text{Ti} + \text{C}$ (графит)

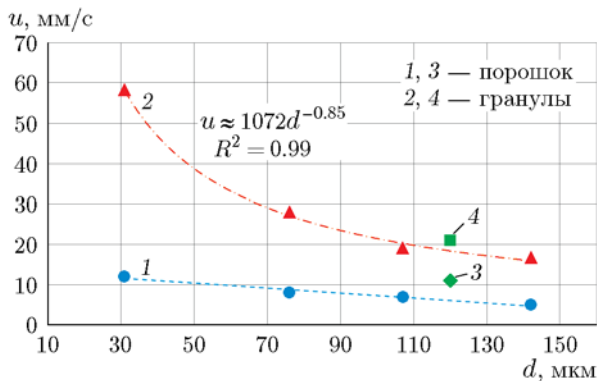


Рис. 3. Скорость горения порошковых (1, 3) и гранулированных (2, 4) смесей $\text{Ti} + \text{C}$ (сажа) в зависимости от размера частиц титана:

аппроксимирующие кривые 1, 2 построены по скорости горения титана узких фракций; точки 3, 4 — значения скорости для исходной широкой фракции $d = 120$ мкм

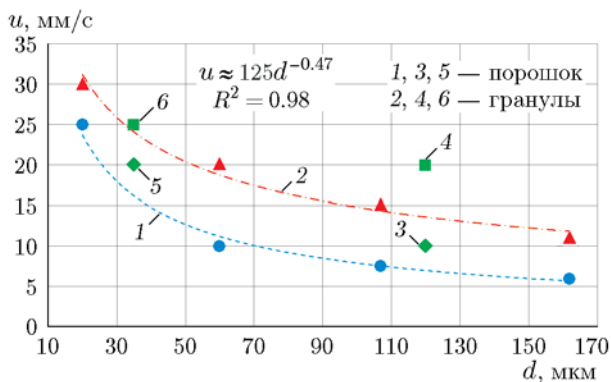


Рис. 4. Скорость горения порошковых (1, 3, 5) и гранулированных (2, 4, 6) смесей $\text{Ti} + \text{C}$ (графит) в зависимости от размера частиц титана:

аппроксимирующие кривые 1, 2 построены по скорости горения титана узких фракций; точки 3, 4 — значения скорости для исходной фракции $d = 35$ мкм, точки 5, 6 — для фракции $d = 120$ мкм

внимание тот факт, что скорости горения гранулированных составов превышают скорости горения порошковых смесей во всем диапазоне размеров частиц титана. Для объяснения наблюдаемых результатов используем ККМГ [4]. В соответствии с этой моделью распространение фронта волны горения в порошковой смеси представляет собой движение расплава легкоплавкого компонента под действием капиллярных сил и перепада давления примесных газов перед и за слоем расплава. Увеличение давления примесных газов перед фронтом ре-

акции приводит к снижению скорости горения, а за фронтом — к ее увеличению. Поэтому важно определить, успевают ли частицы исходных компонентов прогреться и выделить примесные газы 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 $L = a_c/u$ (где u — экспериментальная скорость горения, a_c — температуропроводность гетерогенной порошковой смеси):

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

Во-вторых, время тепловой релаксации частицы $t_h = d^2/4a$ (a — температуропроводность вещества частицы) должно быть меньше характерного времени ее нахождения в зоне прогрева $t = L/u = a_c/u^2$ [1]:

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

При вычислениях использованы следующие значения теплофизических характеристик компонентов: $a_c = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [13], a (Ti) = $8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [14], a (графит) = $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [15], a (сажа) = $2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [16].

Результаты расчета параметров L , t , t_h для порошковой смеси титана разных фракций с сажей и графитом приведены в табл. 2. Жирным шрифтом в таблице выделены данные для смеси с исходным порошком титана (широкая фракция).

Видно, что условие (1) не выполняется только для смесей с титаном исходной широкой фракции $d = 120 \text{ мкм}$. Это может свидетельствовать о том, что использование характерного размера d , определенного по максимуму распределения размеров частиц широкой фракции, является некорректным, что и подтверждается данными экспериментов и расчетами, приведенными ниже. Поэтому для корректного сравнения зависимостей скоростей горения гранулированных и порошковых смесей при построении аппроксимирующих кривых (см. рис. 3, 4) использованы только данные для узких фракций. Условие (2) выполняется для всех смесей (см. табл. 2): время прогрева частиц титана всех фракций (t_h) значительно меньше времени (t) их нахождения в зоне прогрева волны горения.

Для углерода (сажа, графит) условие прогрева (1) выполняется во всех исследованных смесях. Действительно, в этих смесях размеры частиц сажи $1 \div 2 \text{ мкм}$ и графита 5 мкм намного меньше ширины зоны прогрева L (см. табл. 2). Время тепловой релаксации частиц сажи не превышает $5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, графита — $3.1 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Сравнивая эти значения t_h с результатами расчета времени t , приведенными в табл. 2, видим, что условие (2) для углерода также всегда выполняется. Таким образом, необходимые и достаточные условия для выделения примесных газов из этих компонентов перед фронтом реакции выполнены для всех порошковых смесей. В соответствии с ККМГ это снижает скорость распространения фронта горения.

Известно, что гранулирование порошковых СВС-составов способствует нивелированию влияния примесных газов на процесс горения [7]. В таких смесях искусственно изменена структура пористой среды и течение расплава ограничено размерами отдельных гранул. Скорость горения гранулированных смесей 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, процесс сгорания отдельной гранулы можно считать аналогичным процессу горения порошковой смеси. Однако характерный размер гранул составляет всего 1 мм , поэтому в грануле созданы лучшие условия для отвода газов из зоны горения по сравнению с порошковой засыпкой. Это уменьшает влияние ПГ и на процесс горения самих гранул [7]. Если для порошковых смесей ПГ в зоне прогрева отсутствует, гранулирование приведет к снижению скорости горения образца, что связано с наличием стадии передачи горения от гранулы к грануле. Для исследованных составов, где ПГ в зоне прогрева присутствует, гранулирование, напротив, должно приводить к увеличению скорости горения, что и подтверждается экспериментом.

Возрастание скорости горения при переходе от порошковой смеси Ti + C (сажа) к гранулированной с исходным титаном размером $d = 120 \text{ мкм}$ (условие (1) прогрева титана в порошковой смеси не выполняется) свидетельствует о

заметном ПГ из сажи в зоне прогрева.

Наряду с ПГ, сильное влияние на скорость горения оказывает кинетика взаимодействия титана с углеродом. Для гранулированных смесей, где влияние ПГ нивелировано, определяющим фактором становится скорость взаимодействия компонентов. Следовательно, возрастание скорости горения гранулированных смесей с уменьшением размера частиц Ti является следствием увеличения скорости взаимодействия компонентов. Из сравнения данных для гранулированных смесей на рис. 3, 4 видно, что скорости горения в смеси Ti + C (сажа) заметно выше, чем в смеси Ti + C (графит). Это свидетельствует о более высокой скорости взаимодействия титана с сажой.

Скорость горения гранулированной смеси аппроксимируется зависимостью от размера частиц титана: для состава Ti + C (графит) — $u \sim d^{-0.5}$, для состава Ti + C (сажа) — $u \sim d^{-0.9}$ (см. рис. 3, 4).

Полученные аналитические зависимости позволяют для исходных порошков титана поиному определить характерный размер его частиц d , используемый при расчетах времени t_h и при изучении зависимостей $u(d)$. Будем считать, что экспериментальное значение скорости горения гранулированных смесей с титаном широких фракций u должно соответствовать аппроксимационной кривой, полученной с использованием узких фракций. Размер частиц титана, определенный по аналитической зависимости, обозначим d^* . Для гранулированной смеси Ti + C (сажа) при $d = 120$ мкм $u = 21$ мм/с; точке 21 мм/с на аппроксимационной кривой (см. рис. 3) соответствует $d^* = 102$ мкм. Для гранулированной смеси Ti + C (графит) при $d = 35$ мкм $u = 25$ мм/с; точке 25 мм/с на аналитической кривой (см. рис. 4) соответствует $d^* = 32$ мкм. Для гранулированной смеси Ti + C (графит) при $d = 120$ мкм $u = 20$ мм/с; точке 20 мм/с на аналитической кривой (см. рис. 4) соответствует $d^* = 52$ мкм. Таким образом, на примере смесей Ti с углеродом разных аллотропных модификаций показано, что для корректного определения зависимости скорости горения от размера частиц необходимо пользоваться узкими фракциями порошков.

Достоверность аппроксимирующих зависимостей (близкий к 1 коэффициент детерминации) обеспечивается использованием для их построения экспериментальных значений ско-

рости горения узких фракций порошков в широком диапазоне размеров.

Обычно для объяснения закономерностей распространения фронта пламени в гетерогенной конденсированной среде используется теория, которая основана на кондуктивном механизме переноса тепла в волне горения и не учитывает эффекты плавления и растекания реагентов [17]. Сделанные в [17] при формулировке модели допущения фактически реализуются при горении гранулированных смесей. Действительно, в этом случае структура пористой среды не меняется [8, 10–12], в роли реакционных ячеек выступают гранулы близкого размера, растекание расплава ограничено размерами гранулы. Кроме того, примесные газы мало влияют на горение, а теплоперенос между гранулами определяется кондукцией [18]. В соответствии с [17] зависимость скорости горения от размера частиц титана $u \sim d^{-0.5}$, наблюдаемая для смеси Ti + C (графит), соответствует линейному закону взаимодействия исходных компонентов, когда скорость реакции не зависит от толщины слоя образовавшегося продукта. Для гранулированной смеси Ti + C (сажа) скорость горения описывается зависимостью $u \sim d^{-0.9}$, что близко к параболическому закону $u \sim d^{-1}$ взаимодействия компонентов.

Вернемся к анализу горения порошковых смесей Ti + C (см. рис. 3, 4). Из сравнения скоростей горения гранулированных смесей (скорость горения смеси Ti с сажой заметно выше, чем у смеси с графитом) следует, что в отсутствие тормозящего действия ПГ порошковая смесь Ti с сажой горела бы быстрее, чем смесь с графитом. Однако из результатов экспериментов, приведенных на рис. 3, 4, видно, что это не так. Значит, в порошковой смеси давление в зоне прогрева, создаваемое ПГ от графита, меньше создаваемого сажой.

На рис. 5 показаны зависимости разности скоростей горения гранулированной и порошковой смесей титана узких фракций с сажой и графитом. Видно, что с уменьшением размера частиц титана разность скоростей возрастает в смесях титана с сажой. Это означает, что с уменьшением размера частиц Ti увеличивается количество водорода, выделяющегося из титана в зоне прогрева, что приводит к торможению волны горения в порошковых смесях. Для смеси с графитом уменьшение размера частиц Ti не ведет к существенному увеличению раз-

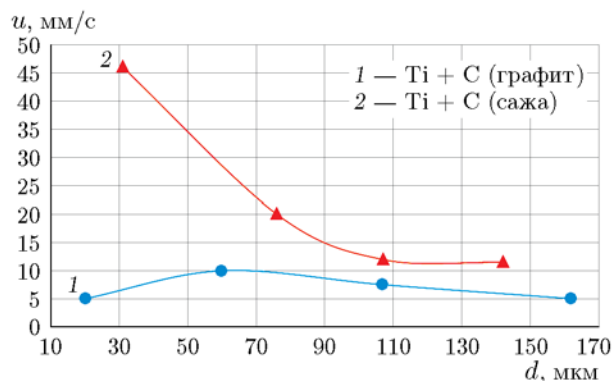


Рис. 5. Зависимость разности скоростей горения гранулированной и порошковой смесей от размера частиц титана

ницы скоростей горения порошковых и гранулированных смесей. Поскольку в экспериментах использовались одни и те же порошки титана, логично предположить, что этот результат обусловлен уменьшением выхода примесных газов из графита перед фронтом, компенсирующим тормозящее действие ПГ от титана. Действительно, количество газа, выделившегося перед и за фронтом горения, зависит от времени нахождения графита в зоне прогрева, которое согласно [1] обратно пропорционально квадрату скорости горения: $t = a/u^2$. Поэтому для быстрогорящих составов, где степень газификации графита перед слоем расплава меньше, основное газовыделение происходит за слоем расплава, что приводит к увеличению скорости горения.

Несмотря на принципиальные различия в механизме и закономерностях горения порошковых и гранулированных смесей, по данным рентгенофазового анализа фазовый состав продуктов синтеза идентичен, не зависит от раз-

меров частиц титана и представляет собой одну фазу TiC . На рис. 6 приведены рентгенограммы продуктов горения порошковой и гранулированной шихты $Ti + C$ (графит). Данные рентгенофазового анализа продуктов горения смеси $Ti + C$ (сажа) имеют такой же вид.

Следовательно, разные зависимости скорости горения смесей $Ti + C$ от размеров частиц титана и от аллотропной формы углерода не связаны с различной полнотой превращения исходных реагентов в волне горения, а объясняются влиянием примесного газовыделения и изменением скорости взаимодействия исходных компонентов.

ВЫВОДЫ

Впервые определена зависимость скорости горения гранулированных смесей $Ti + C$ от размера частиц титана при различных аллотропных модификациях углерода (графит/сажа).

Увеличение скорости горения при переходе от порошковых к гранулированным смесям объяснены с позиций конвективно-кондуктивной модели горения.

Показано, что при одинаковых размерах частиц титана скорость горения гранулированных смесей с сажей больше, чем смесей с графитом, и разность значений возрастает при уменьшении размеров частиц титана.

Получены аппроксимационные зависимости скорости горения гранулированных шихт от размера частиц титана: $u \sim d^{-0.5}$ для смеси $Ti + C$ (графит) и $u \sim d^{-0.9}$ для смеси $Ti + C$ (сажа), соответствующие линейному и параболическому законам взаимодействия исходных реагентов согласно теории распространения фронта пламени в конденсированной гетерогенной среде.

Установлено, что разные зависимости скорости горения от размеров компонентов для различных аллотропных модификаций углерода как в порошковых, так и в гранулированных смесях не связаны с различием в фазовом составе конденсированных продуктов и полнотой превращения исходных реагентов.

Показано, что при уменьшении размера частиц титана увеличение скорости горения порошковых смесей $Ti + C$ (графит) вызвано действием разнонаправленных факторов: уменьшением выделения примесных газов из графита в зоне прогрева волны горения и уве-

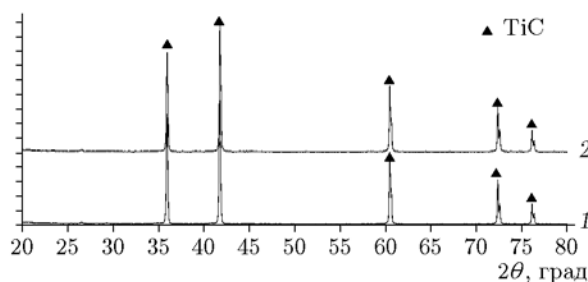


Рис. 6. Данные рентгенофазового анализа продуктов горения порошковой (1) и гранулированной (2) смесей $Ti + C$ (графит)

личением примесного газовыделения от титана.

Показано, что для гранулированных смесей, где влияние примесного газовыделения нивелировано, определяющим фактором, влияющим на скорость горения, становится кинетика взаимодействия компонентов.

Установлено, что для исходных широких фракций титана характерный размер частиц смеси следует определять, используя данные аппроксимационных зависимостей скорости горения этой смеси от размера частиц узких фракций титана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogachev A. S., Mukasyan A. S. Combustion for Material Synthesis. — New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.
2. Вершинников В. И., Филоненко А. К. О зависимости скорости безгазового режима горения от давления // Физика горения и взрыва. — 1978. — Т. 14, № 5. — С. 42–47.
3. Kecskes L. J., Niiler A. Impurities in the combustion synthesis of titanium carbide // J. Am. Ceram. Soc. — 1989. — V. 72, N 4. — P. 655–661. — DOI: 10.1111/j.1151-2916.1989.tb06190.x.
4. Сеплярский Б. С. Природа аномальной зависимости скорости горения безгазовых систем от диаметра // Докл. АН. — 2004. — Т. 396, № 5. — С. 640–643.
5. Vadchenko S. G. Effect of thermal treatment in vacuum on ignition of titanium compacts in hydrogen // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. — 2010. — V. 19, N 3. — P. 206–208. — DOI: 10.3103/S1061386210030064.
6. Вадченко С. Г. Влияние преграды на прохождение волны фильтрационного горения по пористой титановой ленте // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 3. — С. 43–49. — DOI: 10.15372/FGV20190305.
7. Seplyarskii B. S., Kochetkov R. A. Granulation as a tool for stabilization of SHS reactions // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. — 2017. — V. 26, N 2. — P. 134–136. — DOI: 10.3103/S106138621702011X.
8. Сеплярский Б. С., Тарасов А. Г., Кочетков Р. А., Ковалев И. Д. Закономерности горения смеси Ti + TiC в спутном потоке азота // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 61–67.
9. Amosov A. P., Makarenko A. G., Samboruk A. R., et al. Effect of batch pelletizing on a course of SHS reactions: An overview // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. — 2010. — V. 19, N 1. — P. 70–77. — DOI: 10.3103/S1061386210010127.
10. Сеплярский Б. С., Кочетков Р. А. Исследование закономерностей горения порошковых и гранулированных составов Ti + xC ($x > 0.5$) в спутном потоке газа // Хим. физика. — 2017. — Т. 36, № 9. — С. 23–31. — DOI: 10.7868/S0207401X17090126.
11. Сеплярский Б. С., Кочетков Р. А., Лисина Т. Г., Абзалов Н. И., Алымов М. И. Фазовый состав и структура продуктов синтеза карбида титана с никелевой связкой // Неорг. материалы. — 2019. — Т. 55, № 11. — С. 1169–1175. — DOI: 10.1134/S0002337X19110113.
12. Vorotilo S., Kiryukhantsev-Korneev Ph. V., Seplyarskii B. S., Kochetkov R. A., Abzalov N. I., Kovalev I. D., Lisina T. G., Zaitsev A. A. (Ti,Cr)C-based cermets with varied NiCr binder content via elemental SHS for perspective cutting tools // Crystals. — 2020. — V. 10. — P. 412–428. — DOI: 10.3390/cryst10050412.
13. Зенин А. А., Мержанов А. Г., Нерсисян Г. А. Исследование структуры тепловой волны в СВС-процессах (на примере синтеза боридов) // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 1. — С. 79–90.
14. Ślęzak T., Zmywaczyk J., Koniorczyk P. Thermal diffusivity investigations of the Titanium Grade 1 in wide temperature range // AIP Conf. Proc. — 2019. — V. 2170, N 1. — 020019. — DOI: 10.1063/1.5132738.
15. Станкус С. В., Савченко И. В., Агажанов А. Ш., Яцук О. С., Жмуриков Е. И. Теплофизические свойства графита МПГ-6 // Теплофизика высоких температур. — 2013. — Т. 51, № 2. — С. 205–209.
16. Корольченко И. А., Казаков А. В., Кухтин А. С., Крылов В. Л. Экспериментальное определение температуропроводности материалов // Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. — 2021. — № 4. — С. 36–38.
17. Алдушин А. П., Мартемьянова Т. М., Мержанов А. Г., Хайкин Б. И., Шкадинский К. Г. Распространение фронта экзотермической реакции в конденсированных смесях при взаимодействии компонент через слой тугоплавкого продукта // Физика горения и взрыва. — 1972. — Т. 8, № 2. — С. 202–212.
18. Сеплярский Б. С., Кочетков Р. А., Вадченко С. Г. Закономерности горения порошковых и гранулированных смесей Ti + xC ($1 > x > 0.5$) // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 6. — С. 51–59. — DOI: 10.15372/FGV20160606.

Поступила в редакцию 14.07.2021.

После доработки 05.10.2021.

Принята к публикации 12.01.2022.