

УДК 621.762:621.777+620.178.15+544.45

КОНВЕКТИВНОЕ ГОРЕНИЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ СМЕСИ Ti + C В УСЛОВИЯХ СИЛОВОГО СВС-КОМПАКТИРОВАНИЯ

Ю. В. Богатов, В. А. Щербаков

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова РАН
142432 Черногловка, vladimir@ism.ac.ru

Изучено влияние механической активации компонентов и внешнего давления на горение гетерогенной смеси Ti + C в условиях СВС-компактирования. Показано, что при горении под давлением (15 МПа) реализуется низкоскоростной послойный режим ($4 \div 7$ см/с), без внешнего давления — нестационарные высокоскоростные режимы горения ($50 \div 70$ см/с): поверхностно-кольцевой и объемный, осуществляемые за счет конвективного тепло- и массопереноса. Предложен механизм высокоскоростного конвективного горения, основанный на зажигании гетерогенной смеси горячим примесным газом, выделяющимся в волне горения и фильтрующимся по расслоенным трещинам и другим макродефектам по объему шихтовых прессовок, которые сформировались в процессе прессования порошковых смесей. Механическая активация компонентов реакционной смеси снижает плотность и прочность прессовок и повышает эффективность образования макродефектов. Внешнее давление оказывает противоположное действие, так как препятствует образованию трещин и распространению по ним горячего примесного газа. В режиме объемного горения получены консолидированные образцы карбида титана до относительной плотности 95 %.

Ключевые слова: конвективное горение, гетерогенная смесь Ti + C, механическая активация, СВС-компактирование, примесный газ.

DOI 10.15372/FGV20230310

ВВЕДЕНИЕ

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) — эффективный способ получения тугоплавких неорганических материалов [1–3], основанный на горении смеси порошков металлов и неметаллов. Способ включает в себя холодное прессование шихтовой заготовки из реакционной смеси порошков металлов и неметаллов и локальное инициирование тепловым импульсом экзотермической реакции. На поверхности заготовки формируется зона реакции, самопроизвольно распространяющаяся в виде ярко светящейся волны горения, в которой исходные реагенты превращаются в конечный продукт. В зависимости от состава реакционной смеси адиабатическая температура горения составляет $2000 \div 3500$ К. Высокая температура горения обеспечивает равновесный состав конечного продукта.

Перспективной технологией является силовое СВС-компактирование ультратугоплавких керамических и металлокерамических композитов [4–7]. Она отличается от горячего

прессования и электроискрового спекания тем, что в одну стадию осуществляются синтез целевого продукта заданного фазового состава и его консолидация до минимальной остаточной пористости в условиях квазиизостатического сжатия. Особенность силового СВС-компактирования заключается в отсутствии внешнего источника тепла. После завершения реакции синтезированный продукт быстро остывает и теряет способность к уплотнению. Необходимым условием получения плотных композитов является высокая пластичность горячего продукта СВС, сохраняющаяся в течение времени консолидации. Для металлокерамического композита это обеспечивается введением в состав реакционной смеси металлической связки, которая в волне горения плавится и повышает пластичность горячего продукта СВС [4, 8].

Консолидация керамических композитов затруднена отсутствием жидкой фазы, так как максимальная температура горения ниже температуры плавления тугоплавких соединений, входящих в состав продукта СВС. Для увеличения пластичности и эффективности консолидации керамических композитов необходимо

увеличить температуру горячего прессования продуктов синтеза, которая определяется температурой в волне горения и скоростью ее распространения по объему исходной порошковой заготовки.

Температуру и скорость горения можно увеличить, используя дополнительный нагрев гетерогенной смеси. Однако это усложняет и снижает эффективность получения керамических композитов методом силового СВС-компактирования. Более привлекательным способом повышения эффективности консолидации является увеличение скорости горения.

Скорость горения можно увеличить двумя способами. Первый связан с использованием режима конвективного горения. В [9] показано, что при продуве инертного газа через слой гранулированной реакционной смеси порошков титана и сажи скорость горения возрастает в несколько раз. В настоящей работе для конвективного горения смеси порошков титана и сажи используется направленная фильтрация примесного газа, выделяющегося в волне горения. Аналогичный режим наблюдали при горении смеси титана и сажи, помещенной в замкнутом объеме [10].

Второй способ связан с использованием механически активированной гетерогенной смеси. В [11–14] показано, что в результате высокоэнергетического смешивания увеличивается скорость диффузии, что оказывает положительное влияние на параметры горения, фазовый состав и структуру плотных композитов.

Целью настоящей работы является исследование влияния механической активации и внешнего давления на процесс горения стехиометрических смесей порошков титана и сажи и формирование структуры консолидированного образца TiC при СВС-компактировании.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Реакционные смеси стехиометрического состава готовили из порошков титана марки ПТМ и сажи П804Т. Порошки смешивали в шаровой вращающейся мельнице с объемом барабана 2 л при скорости вращения 60 об/мин. Материал шаров — сталь ШХ15, диаметр — 25 мм. Для приготовления смесей использовали как исходные, так и предварительно активированные порошки. Методика активации в шаровой мельнице и изменение характеристик

порошка титана в процессе механической активации описаны в [13].

В экспериментах использовали реакционные смеси 1–3, отличающиеся составом и режимом смешивания. Смесь 1 состояла из исходных (неактивированных) порошков титана и сажи ($Ti + C$), которые смешивали при массовом соотношении смеси и шаров $M_{см}/M_{ш} = 1 : 4$ в течение 20 ч. Смесь 2 включала в себя предварительно активированный порошок титана и исходный порошок сажи ($Ti_{МА} + C$), смесь 3 — активированные порошки титана и сажи ($Ti_{МА} + C_{МА}$). Смесь 2 готовили в две стадии. Сначала порошок титана подвергали механической активации в течение 45 ч в шаровой мельнице при $M_{см}/M_{ш} = 1 : 15$. Затем добавляли сажу и смешивали при $M_{см}/M_{ш} = 1 : 4$ в течение 20 ч. Смесь 3 также готовили в две стадии: сначала активировали порошок титана (аналогично смеси 2), затем добавляли сажу и смешивали при $M_{см}/M_{ш} = 1 : 15$ в течение 20 ч. При этом порошок сажи также подвергался механической активации. Этот процесс более подробно рассмотрен в [13, 15]. Предварительная активация порошка титана в шаровой мельнице обусловлена низкой эффективностью воздействия размольных тел на частицы титана, так как его объем в стехиометрической смеси значительно (в 2.5 раза) меньше объема сажи.

Прочность прессовок оценивали по коэффициенту обжатия ($K_{обж}$), который рассчитывали по формуле

$$K_{обж} = \Theta_{п} / \Theta_0, \quad (1)$$

где Θ_0 — относительная насыпная плотность смеси, $\Theta_{п}$ — относительная плотность шихтовой прессовки. Чем выше значение $K_{обж}$, тем прочнее прессовка [16].

Насыпную плотность смесей Θ_0 определяли по ГОСТ 19440-94. Полученные значения осредняли по результатам 3–5 проб. Относительную плотность шихтовых прессовок $\Theta_{п}$ рассчитывали, используя значения плотности титана 4.5 г/см^3 и сажи 1.8 г/см^3 . Расчетная теоретическая плотность смеси $Ti + C$ — 3.46 г/см^3 . В табл. 1 представлены составы реакционных смесей и характеристики прессовок диаметром 58 мм и массой 50 г, спрессованных под давлением 15 МПа.

Из приготовленных смесей прессовали цилиндрические образцы массой 50 г, диаметром 58 мм, высотой 16 мм с относительной плот-

Таблица 1

Характеристики реакционных смесей и шихтовых прессовок

Номер смеси	Параметры смеси		Параметры прессовок	
	Состав	Θ_0	Θ_n	$K_{обж}$
1	Ti + C	0.27	0.60	2.2
2	Ti _{МА} + C	0.29	0.58	2.0
3	Ti _{МА} + C _{МА}	0.30	0.52	1.7

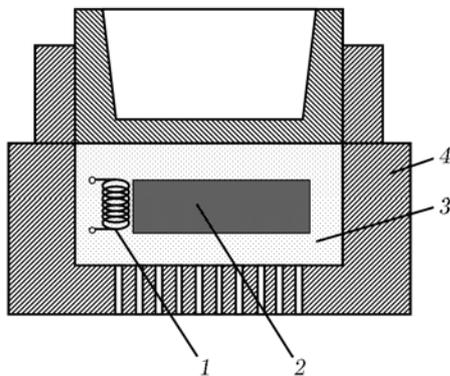


Рис. 1. Схема пресс-формы для СВС-компактирования керамических композитов: 1 — вольфрамовая спираль, 2 — прессовка из шихты, 3 — кварцевый песок (SiO₂), 4 — пресс-форма

ностью 0.5 ÷ 0.65. Их помещали в реакционную пресс-форму, снабженную системой иницирования реакции экзотермического синтеза (рис. 1). Свободное пространство в пресс-форме заполняли дисперсной средой, в качестве которой использовали порошок оксида кремния (SiO₂) дисперсностью 300 ÷ 500 мкм. Процесс получения керамических материалов и сплавов методом силового СВС-компактирования подробно описан в [5]. Реакцию горения иницировали раскаленной электрическим током вольфрамовой спиралью, установленной на цилиндрической поверхности прессовки. Температурные профили волны горения измеряли с помощью вольфрам-рениевых термопар диаметром 200 мкм, находящихся на поверхности и внутри прессовок: термопары 1, 3 и 4 — на цилиндрической поверхности, термопара 2 — в центре прессовки, на расстоянии 3 ÷ 4 мм от поверхности (рис. 2). Термопарные сигналы регистрировали с помощью аналого-цифрового преобразователя и записывали в памяти компьютера. Частота регистрации — 1 кГц.

Скорость горения измеряли на стадии синтеза без нагрузки и под давлением $p = 15$ Па.

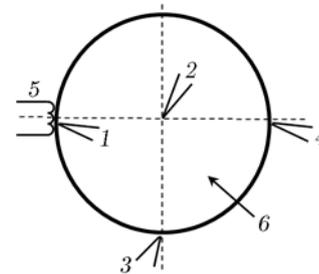


Рис. 2. Схема размещения термопар (1–4) и поджигающей спирали (5) в прессовке из шихты (6)

Горячий продукт СВС выдерживали под давлением 100 МПа в течение 5 с. Плотность керамических образцов определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 25281-82.

Микрофотографии структур исследовали с помощью методик количественной металлографии [17] по выборке не менее 150 зерен. Средний размер зерен ($R_{ср}$) измеряли методом хорд. Величину удельной контактной поверхности между зернами TiC по отношению ко всему объему (S_v , мм²/мм³) рассчитывали в соответствии со вторым основным стереометрическим соотношением [17] $S_v = 2n/L$ с использованием метода случайных секущих, где n — количество пересечений секущей с границами зерен, L — длина секущей, мм.

Рентгенофазовый анализ (РФА) продуктов синтеза проводили на дифрактометре ДРОН-3 с использованием Cu K_α -излучения и порошковой базы дифракционных данных PDF-2. Количественный РФА выполняли методом Ритвельда в пакете Jana2006 [18].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Морфология продуктов горения

На рис. 3 представлены фотографии образцов, сгоревших в реакционной пресс-форме без компактирования горячих продуктов. Типичный вид сечения образцов 1–3, полученных при горении под давлением 15 МПа, представлен на рис. 3,а. Видно, что, несмотря на выделение при горении примесного газа, диаметр и высота сгоревших образцов практически не изменились. Это связано с тем, что внешняя нагрузка компенсировала влияние примесного газа внутри образцов. Без внешней нагрузки процесс горения сопровождался увеличением размеров шихтовых прессовок под действием примесных газов, выбрасываемых из их объема.

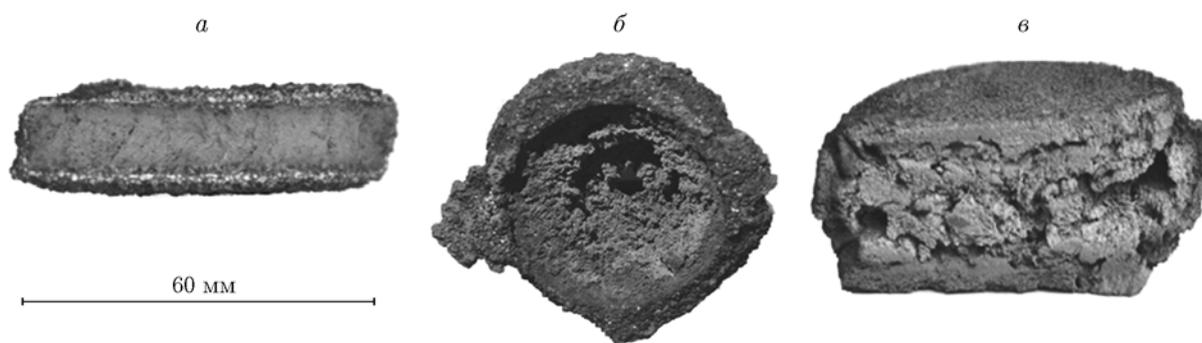


Рис. 3. Фотографии образцов, сгоревших в реакционной пресс-форме без компактирования горячих продуктов:

a — типичный вид поперечного сечения образцов из смесей 1–3, полученных при горении под давлением 15 МПа; *б, в* — вид образцов из смесей 1, 2 (*б*) и смеси 3 (*в*), полученных при горении без давления

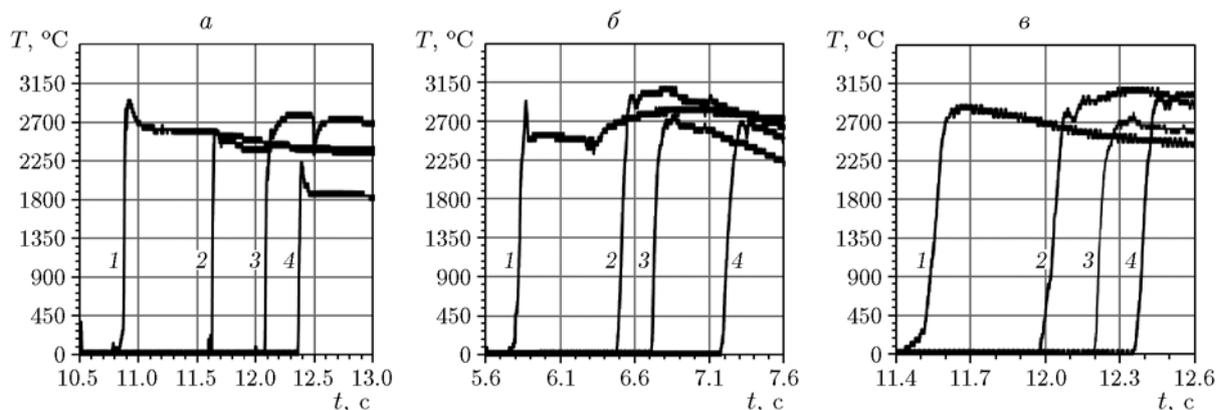


Рис. 4. Термограммы горения прессовок из смесей 1 (*a*), 2 (*б*), 3 (*в*) под давлением 15 МПа:

1–4 — номера кривых соответствуют номерам термопар

Увеличение объема образцов при горении в пресс-форме зависит от степени уплотнения порошка оксида кремния, который использовался в качестве среды, передающей давление. В экспериментах в образцах из смесей 1 и 2 наблюдалось полуторное (рис. 3,*б*), а для образца из смеси 3 — двукратное увеличение толщины (рис. 3,*в*). В результате расширения образовались газовые раковины и расслойные трещины. Отметим, что по данным РФА во всех случаях конечный продукт содержит карбид титана состава, близкого к стехиометрическому.

2.2. Параметры горения

Анализ экспериментальных результатов удобно начать с рассмотрения закономерностей горения прессовок 1–3 под давлением, представленных на рис. 4. Видно, что после инициирования реакции горения первым появился сигнал от термопары 1, которая была расположе-

на вблизи поджигающей спирали. Другие сигналы появлялись в последовательности, соответствующей нумерации термопар (рис. 4,*a*). В аналогичном порядке сигналы от термопар появлялись при горении прессовок 2 и 3 под давлением (рис. 4,*б,в*). Такой режим горения был описан ранее и получил название «последовательный» [18]. Внешний вид пористых образцов 1–3 после сгорания в реакционной пресс-форме под давлением без последующего компактирования соответствует рис. 3,*a*.

Иная последовательность появления сигналов от термопар наблюдалась при горении прессовок 1 и 2 без нагрузки: после сигнала термопары 1 появлялись сигналы термопар 3 и 4. Последним поступал сигнал от термопары 2, расположенной в центре шихтовой прессовки (рис. 5,*a,б*). Положение термопары 2 на поверхности или внутри прессовки на глубине $4 \div 5$ мм не влияло на появление сиг-

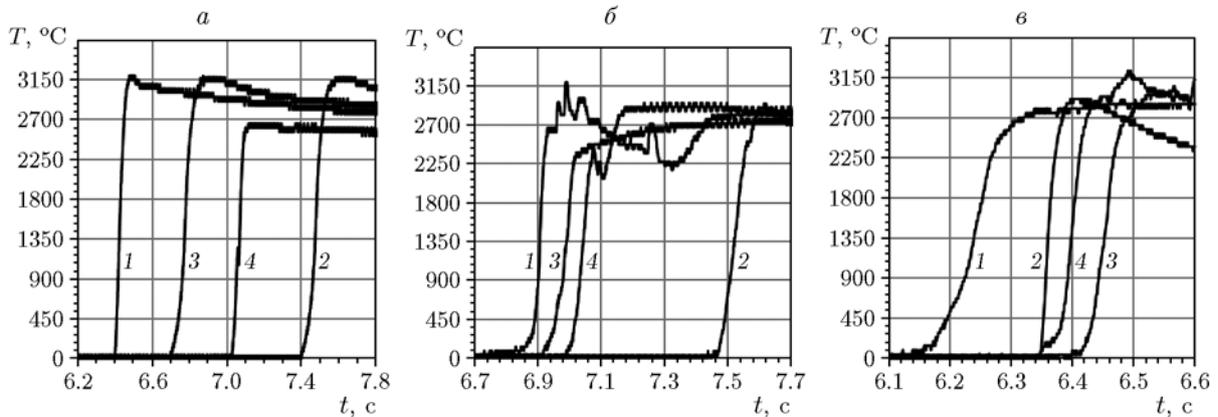


Рис. 5. Термограммы горения прессовок из смесей 1 (а), 2 (б), 3 (в) без нагрузки:
1–4 —номера кривых соответствуют номерам термопар

нала относительно других термопарных сигналов. Такая последовательность сигналов от термопар указывает на поверхностный режим горения, в котором фронт горения сначала распространяется в цилиндрическом поверхностном слое, а затем в виде сформировавшегося кольцевого фронта движется к центру образца (рис. 5,а,б). Мы назвали такой режим горения поверхностно-кольцевым. Типичный вид пористых образцов из смесей 1 и 2 после сгорания в реакционной пресс-форме без внешнего давления и без последующего компактирования представлен на рис. 3,а. Видна внутренняя часть этого образца, поскольку она не имеет достаточной прочности и легко отделяется от основы. На поверхности видны следы движения фронта горения от периферии к центру.

При горении прессовки из смеси 3 без нагрузки, как и в случае горения под давлением, сигналы термопар появлялись в последовательности, соответствующей их нумерации (рис. 5,в). Однако время распространения волны горения по шихтовой прессовке минимально (≈ 0.2 с) по сравнению с другими образцами. Полученная последовательность сигналов указывает на режим объемного горения (близкого к взрывному), при котором волна горения от точки инициирования последовательно распространялась к центральной части, а затем к противоположной части прессовки. Временной интервал на участке 1–2 (рис. 5,в) в несколько раз превышает интервал на участке 2–4. Это указывает на ускорение волны горения шихтовых прессовок по маршруту 1–2–4. От точки 2 к точке 4 волна горения распространялась быстрее, чем к точке 3, что также указыва-

ет на преобладание объемного режима горения над поверхностным. Режим горения прессовки из смеси 3 без внешнего давления мы назвали объемным. Типичный внешний вид пористых образцов, синтезированных из смеси 3 в реакционной пресс-форме без внешнего давления и без последующего компактирования, представлен на рис. 3,в. При горении в этом режиме происходило максимальное увеличение объема образца за счет образования газовых раковин и трещин.

На рис. 6 приведены схемы распространения волн горения в шихтовых прессовках при различных режимах. Режимы и параметры горения изменяются в зависимости от степени механической активации порошковых компонентов и внешнего давления, приложенного в процессе горения.

Для определения маршрута распространения волн горения рассчитывали средние скорости горения U в диаметральной направлении (U_{1-2} , U_{2-4} и U_{1-2-4}) и в поверхностном цилиндрическом слое (U_{1-3} , U_{1-3-4}) по формуле

$$U = S/t, \quad (2)$$

где S — расстояние между термопарами, t — время распространения волны горения между термопарами. Для поверхностно-кольцевого режима горения (рис. 6,б) основными характеристиками распространения волн горения являются средние скорости по цилиндрической поверхности U_{1-3} и U_{1-3-4} . Скорость горения в этом режиме прессовок из смесей 1 и 2 без нагрузки в диаметральных направлениях U_{1-2} , U_{2-4} и U_{1-2-4} не рассчитывали из-за неопределенного маршрута распространения волны го-

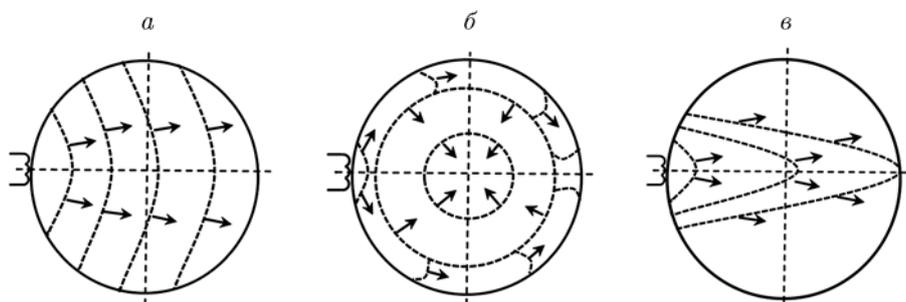


Рис. 6. Схемы распространения волн горения в послойном (а), поверхностно-кольцевом (б), объемном (в) режимах:

штриховые линии — положение в различные моменты времени, стрелки — направление распространения волны горения

Таблица 2

Параметры горения смесей при различных режимах

Скорость горения	Смесь 1 (Ti + C)		Смесь 2 (Ti _{МА} + C)		Смесь 3 (Ti _{МА} + C _{МА})	
	$p = 0$	15 МПа	$p = 0$	15 МПа	$p = 0$	15 МПа
	поверхностно-кольцевой	послойный	поверхностно-кольцевой	послойный	объемный	послойный
U_{1-2} , см/с	—	3.9	—	4.1	24.2	5.8
U_{1-3} , см/с	16.2	—	56.9	—	—	—
U_{1-3-4} , см/с	20.2	—	65.0	—	—	—
U_{1-2-4} , см/с	—	3.9	—	4.0	36.3	6.8
U_{2-4} , см/с	—	3.9	—	3.9	72.5	8.3
T_{\max} , °C	3 200	2 950	3 200	3 050	3 200	3 100

рения. Для послойного (рис. 6,а) и объемного (рис. 6,в) режимов горения характерными являются диаметрально направления U_{1-2} , U_{2-4} и U_{1-2-4} . В этих случаях скорости горения по цилиндрической поверхности U_{1-3} и U_{1-3-4} , вследствие неопределенности маршрута, также не рассчитывались.

Расчетные и экспериментальные результаты параметров горения представлены в табл. 2. Видно, что средние скорости горения прессовок U_{1-2} и U_{1-2-4} в послойном режиме (см. рис. 4 и рис. 6,а) под давлением увеличиваются с повышением степени механической активации компонентов смесей 1–3. Для прессовки 1 — $U_{1-2} = U_{1-2-4} = 3.9$ см/с, для прессовки 2 — $U_{1-2} = 4.1$ см/с и $U_{1-2-4} = 4.0$ см/с, для прессовки 3 — $U_{1-2} = 5.8$ см/с и $U_{1-2-4} = 6.8$ см/с. Прессовки 1 и 2 под давлением сгорали в стационарном режиме, прессовка 3 — с ускорением: на второй половине шихтовой прессовки $U_{2-4} = 8.3$ см/с.

Маршрут горения прессовок из смесей 1 и 2 без нагрузки существенно отличается от маршрута горения под давлением. Измерения термopарами показали, что шихтовые прессовки 1 и 2 горят в поверхностно-кольцевом режиме (см. рис. 5,а,б и рис. 6,б). В этом режиме для прессовки 1 получены скорости горения по цилиндрической поверхности $U_{1-3} = 16.2$ см/с и $U_{1-3-4} = 20.2$ см/с, для прессовки 2 — $U_{1-3} = 56.9$ см/с и $U_{1-3-4} = 65.0$ см/с (см. табл. 2). Отметим более высокую скорость горения по сравнению с послойным режимом. Прессовка из смеси 3 горит в объемном режиме (рис. 6,в) с ускорением с максимально высокой скоростью распространения волны горения в диаметрально направлении: $U_{1-2} = 24.2$ см/с, $U_{2-4} = 72.5$ см/с, $U_{1-2-4} = 36.3$ см/с. Максимальная температура (T_{\max}) достигалась при горении без внешнего давления и составляла 3 200 °C (см. табл. 2).

2.3. Консолидация конечного продукта

После завершения реакции СВС горячий продукт прессовали под давлением 100 МПа для получения плотных образцов из карбида титана. Для всех шихтовых прессовок были выбраны оптимальные режимы с максимальными температурой и скоростью горения. Минимальный интервал времени для приложения давления компактирования обеспечивал консолидацию горячих продуктов синтеза до минимальной остаточной пористости. На рис. 7 представлены фотографии образцов карбида титана, синтезированных в условиях, когда процесс горения шихтовых прессовок из смесей 1 (а) и 3 (б) осуществляли без внешнего давления. В обоих случаях после реакции синтеза к горячему продукту прикладывали давление 100 МПа и выдерживали в течение 5 с. Относительная плотность образца карбида титана, синтезированного из смеси 1, составляла 82 %, а из смеси 3 — 95 %.

На рис. 8 представлены микроструктуры образцов карбида титана, синтезированных из смесей 1 и 3. Средний размер зерен TiC в образце 1 $R_{\text{ср}} = 6.7$ мкм и удельная поверхность контакта между зернами $S_v = 195$ мм²/мм³, а в образце 3 — $R_{\text{ср}} = 3.5$ мкм и $S_v = 380$ мм²/мм³. Более высокая плотность образца 3, уменьшение среднего размера зерен карбида титана и увеличение удельной поверхности контакта между зернами достигалось за счет увеличения температуры горячего прессования продуктов синтеза, обусловленного уменьшением теплопотерь при высокоскоростном горении.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты экспериментов показали, что консолидированный карбид титана с минимальной остаточной пористостью формируется при горении прессовки из смеси 3 без нагрузки. Горение этой прессовки протекало при температуре, практически близкой к температуре плавления карбида титана с максимальной скоростью, что позволило консолидировать образец карбида титана до более высокой относительной плотности по сравнению с образцом 1. На основании полученных результатов можно представить следующий механизм конвективного горения гетерогенной смеси титана и сажи, основанный на фильтрации примесного газа, выделяющегося в волне горения [10].

Наиболее высокая скорость горения достигается, когда в реакционной смеси содержатся активированные титан и сажа. Особенностью экспериментальных результатов, изложенных выше, является организация процесса горения шихтовых прессовок в среде дисперсного теплоизолятора внутри реакционной пресс-формы, используемой в технологическом процессе силового СВС-компактирования. Дисперсная среда из SiO₂ использовалась в качестве теплоизолятора и передающей давление среды, которая препятствует расширению прессовки при горении, а также обеспечивает фильтрацию примесного газа. При увеличении скорости горения механоактивированных реагентов интенсивность газовой выделения возрастает. Увеличение давления примесных газов в пресс-форме приводит к их фильтрации во внутренние слои прессовки и инициированию экзотермического взаимодействия реагентов в режиме объемного горения. Основными факторами, определяющими режимы горения, являются механоактивация реагентов, прочность шихтовых прессовок и наличие в них расслоенных трещин и других макродефектов.

Влияние продольных и поперечных трещин на скорость горения прессовок из смеси титана и сажи экспериментально изучено в [2]. Создание в образце расслоенных трещин, направленных в сторону распространения фронта горения, приводило к увеличению скорости горения. Полученные результаты согласуются с данными по горению смесей порошков титана и сажи в замкнутом объеме. В [10] показано, что скорость горения смеси, запрессованной в металлическую трубку, зависит от направления волны горения и фильтрации примесного газа. При фильтрации газа через исходную смесь скорость горения выше, чем при фильтрации газа через конечный продукт. Скорость горения значительно возрастает при увеличении давления газа при введении в реакционную смесь газифицирующейся добавки [19].

Образование расслоенных трещин зависит от прочности прессовки. Чем ниже прочность прессовки, тем выше эффективность образования трещин. В табл. 1 представлены значения коэффициента обжата $K_{\text{обж}}$, которые характеризуют прочность прессовок. Уменьшение $K_{\text{обж}}$ обусловлено использованием активированных порошков титана и сажи, обладающих более высокой твердостью и низкой прессуемостью [16].

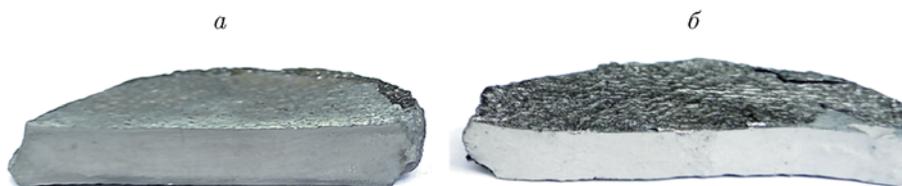


Рис. 7. Фотографии плотных образцов карбида титана, синтезированных из смесей 1 (а) и 3 (б)

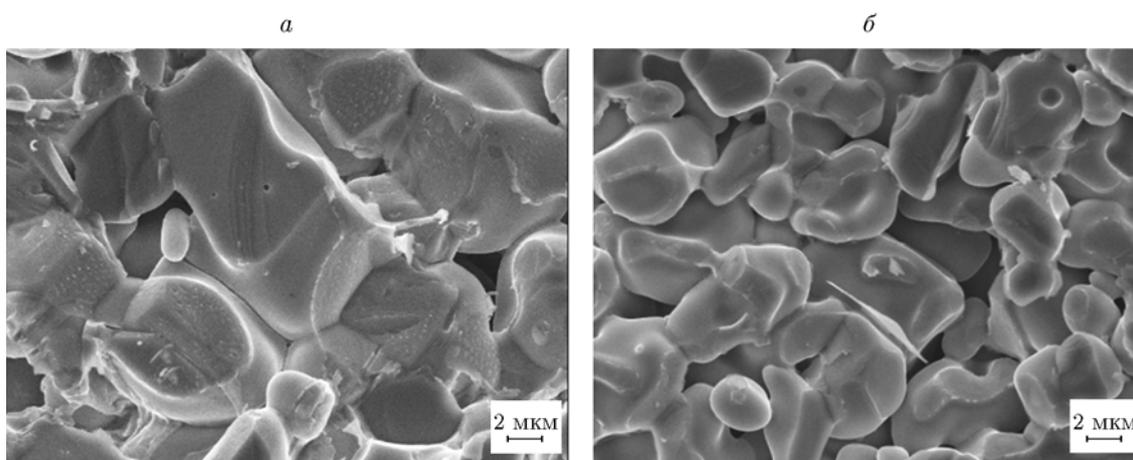


Рис. 8. Микроструктура изломов плотных образцов TiC, синтезированных из смесей 1 (а) и 3 (б)

Поверхностно-кольцевой режим горения прессовок из смесей 1 и 2 без внешнего давления связан с более высокой прочностью прессовок. Это затрудняет проникновение примесных газов, выделяющихся при горении, во внутренние слои прессовок. Поэтому в процессе горения горячие примесные газы могут кратковременно аккумулироваться у поверхности шихтовых прессовок и инициировать реакцию на поверхности. При более высокой прочности прессовок из смесей 1 и 2 возникают условия распространения зоны горения по поверхности с высокой скоростью — $20 \div 50$ см/с (см. табл. 1).

Внешнее давление переводит горение смесей 1–3 в низкоскоростной послойный режим. Это обусловлено тем, что внешнее давление препятствует образованию макродефектов и фильтрации горячего газа в шихтовой прессовке. Положительный эффект механической активации обусловлен снижением прочности шихтовых прессовок и повышением эффективности образования макродефектов при прессовании смесей. Внешнее давление, напротив, снижает скорость горения, так как предотвращает образование трещин и конвективный пе-

ренос тепла из зоны горения в непрореагировавшую часть прессовки.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные результаты показали, что при горении смесей 1–3 под давлением реализуется низкоскоростной послойный режим, а при горении без нагрузки — нестационарные высокоскоростные режимы: поверхностно-кольцевой и объемный. Механическая активация реакционной смеси уменьшает прочность шихтовой прессовки и повышает эффективность образования макродефектов. Конвективный перенос тепла примесным газом, фильтрующимся в объеме шихтовой прессовки, осуществляется по расслоенным трещинам и другим макродефектам и обеспечивает высокоскоростной режим горения. Внешнее давление снижает скорость горения и интенсивность конвективного переноса тепла по объему шихтовых прессовок, нивелируя влияние макродефектов при тепло- и массопереносе. В режиме высокоскоростного объемного горения получены консолидированные образцы карбида титана с относительной плотностью 95 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Твердопламенное горение. — Черноголовка: ИСМАН, 2000.
2. Левашов Е. А., Рогачев А. С., Курбаткина В. В., Максимов Ю. М., Юхвид В. И. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. — М.: Изд. дом МИСиС, 2011.
3. Рогачев А. С., Мукасян А. С. Горение для синтеза материалов: Введение в структурную макрокинетiku. — М.: Физматлит, 2012.
4. Tavadze G. F., Shteinberg A. S. Production of Advanced Materials by Methods of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. — DOI: 10.1007/978-3-642-35205-8.
5. Питюлин А. Н. Силовое компактирование в СВС процессах // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика. — Черноголовка: Территория, 2001. — С. 333–353.
6. Кванин В. Л., Балихина Н. Т. Получение крупногабаритных изделий — одно из технологических направлений, использующих процесс СВС // Изв. вузов. Цв. металлургия. — 2006. — № 5. — С. 50–61.
7. Scherbakov V. A., Gryadunov A. N., Alymov M. I. Synthesis and characteristics of V_4C-TiB_2 // Compos. Adv. Mater. Technol. — 2016. — N 4. — P. 16–21. — DOI: 10.17277/amt.2016.04.pp.016-021.
8. Богатов Ю. В., Щербаков В. А., Сычев А. Е. СВС-прессование композитов на основе системы TiB_2-V_4C-Al // Неорг. матер. — 2022. — Т. 58, № 5. — С. 548–553. — DOI: 10.31857/S0002337X22050013.
9. Сеплярский Б. С., Вадченко С. Г. Роль конвективного теплопереноса в процессах «безгазового» горения (на примере горения системы $Ti + C$) // Докл. АН. — 2004. — Т. 398, № 1. — С. 72–76.
10. Щербаков В. А., Сычев А. Е., Штейнберг А. С. Макрокинетика дегазации в процессе СВС // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 4. — С. 55–61.
11. Левашов Е. А., Курбаткина В. В., Колесниченко К. В. Закономерности влияния предварительного механического активирования на реакционную способность СВС-смесей на основе титана // Изв. вузов. Цв. металлургия. — 2000. — № 6. — С. 61–67.
12. Кочетов Н. А., Рогачев А. С., Погужев Ю. С. Влияние способа механического активирования реакционной смеси на скорость распространения волны СВС-реакций и микроструктуру твердого сплава $TiC-Ni$ // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2009. — № 3. — С. 31–35.
13. Богатов Ю. В., Щербаков В. А., Ковалев И. Д. Влияние механической активации смесей титана с углеродом на параметры СВС-прессования и микроструктуру консолидированного карбида титана // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2021. — Т. 15, № 1. — С. 38–46. — DOI: 10.17073/1997-308X-2021-1-38-46.
14. Богатов Ю. В., Щербаков В. А., Боярченко О. Д. Получение плотного TiB_2 методом силового СВС-компактирования с использованием механической активации реагентов // Неорг. матер. — 2021. — Т. 57, № 10. — С. 1122–1127. — DOI: 10.31857/S0002337X21100018.
15. Шадрин Н. В., Капитонов Е. А. Влияние активации технического углерода на свойства бутадиен-нитрильной резины // Перспективные материалы. — 2014. — № 8. — С. 50–55.
16. Кипарисов С. С., Либенсон Г. А. Порошковая металлургия. — М.: Металлургия, 1991.
17. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография: учеб. пособие. — М.: Металлургия, 1976.
18. Мержанов А. Г. Процессы горения и синтез материалов. — Черноголовка: ИСМАН, 1998.
19. Nikogosov V. N., Nersesyan G. A., Shcherbakov V. A., Kharatyan S. L., Shteinberg A. S. Influence of a blowing agent on mechanisms of combustion and degassing in a titanium—carbon black system // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. — 1999. — V. 8, N 3. — P. 321–329.

Поступила в редакцию 03.06.2022.

После доработки 12.07.2022.

Принята к публикации 07.09.2022.