

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в порошковой системе Ti-Al-C с использованием различных углеродных прекурсоров

*Д. И. Челпанов, А. Н. Ющишина, Н. И. Кускова

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, *e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com*

Исследованы процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в порошковой системе Ti-Al-C. В качестве углеродных прекурсоров использовали гексаметилентетрамин, политетрафторэтилен и аморфный углерод. Показано, что характер протекания процесса СВС и основные его параметры определяются типом выбранного углеродного прекурсора и методикой приготовления исходных порошковых образцов. Установлено, что использование выбранных углеродных прекурсоров позволяет получать наноструктурные композитные материалы, содержащие карбид титана и МАХ-фазу Ti_2AlC , в то время как в порошковых системах Ti-Al-гексаметилентетрамин и Ti-Al-аморфный углерод при определенных условиях происходит синтез МАХ-фазы Ti_3AlC_2 .

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, МАХ-фазы, карбид титана, углеродные прекурсоры.

УДК 537.52:542.9:661.66

DOI: 10.5281/zenodo.1297923

ВВЕДЕНИЕ

Многолетние наработки в области развития методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) разнообразных материалов [1–3] позволяют процессам СВС до сих пор оставаться конкурентоспособными среди многочисленных аналогов. Преимущества СВС заключаются в его основополагающих процессах, до определенной степени контролируемых химических реакциях, которые протекают внутри узкой высокотемпературной зоны, распространяющейся в выбранной исходной системе порошков.

В настоящее время методами СВС успешно синтезируются различные наноматериалы и порошки, содержащие наноразмерные кристаллиты, керамические и металлокерамические пеноматериалы, сверхтвердые материалы, создаются композиционные материалы типа полимер-керамика и др.

Целенаправленный поиск новых СВС-систем, изучение механизма и закономерностей их горения и условий синтеза углеродных и металлоуглеродных наноматериалов составляют перспективу развития метода СВС и разработки новых эффективных технологических процессов [4].

В современном материаловедении особое внимание привлекает новый вид тугоплавких соединений – МАХ-фазы [5–11]. Под МАХ-фазой понимается тройное соединение, соответствующее $M_{n+1}AX_n$ с гексагональной плотной упаковкой, где М – переходный металл;

А – элемент подгруппы «А» таблицы Менделеева; X – углерод или азот. В МАХ-фазах сочетаются лучшие свойства металлов и керамики. Как металлы, они электро- и теплопроводны, легко обрабатываются резанием при комнатной температуре, противостоят распространению трещин, не чувствительны к термическому удару, пластичны при высоких температурах. Как керамика, они имеют низкую плотность, обладают высокими значениями характеристик упругости, характеризуются высокой жаростойкостью и жаропрочностью.

Основным методом получения материалов на основе МАХ-фаз является горячее изостатическое прессование, которое требует существенных затрат энергии и времени и большого числа технологических операций, традиционных для порошковой металлургии: прессование, вакуумное спекание или горячее прессование, отжиг пластификатора. Альтернативой метода горячего изостатического прессования является СВС, который позволяет значительно снизить энергозатраты и упростить процесс получения материалов на основе МАХ-фаз.

Цель данной работы – получение композитов на основе МАХ-фаз методом СВС в порошковых системах Ti-Al-C с использованием различных углеродсодержащих прекурсоров (гексаметилентетрамин, политетрафторэтилен, аморфный углерод).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для подготовки экспериментальных образцов использовали порошки титана (100 мкм) и

алюминия (50 мкм). В качестве углеродных прекурсоров применяли гексаметилентетрамин (техн.) ГОСТ 1381-73 и политетрафторэтилен ГОСТ 10007-80 (предварительно измельченный и просеянный до 50 мкм). В качестве углеродных наноматериалов (УНМ) использовали нанотрубки, пленки и аморфный углерод, синтезированные нами в процессе электроразрядной обработки газообразных углеводородов [12]. Исходный состав шихты для получения МАХ-фаз соответствовал стехиометрическому соотношению компонентов, подходящему для успешного синтеза Ti_3AlC_2 . Эксперименты выполняли на воздухе при атмосферном давлении без предварительной механической активации при минимальном времени перемешивания порошковой смеси.

В работе применялись две методики приготовления исходных экспериментальных порошковых образцов: 1) компактирование шихты в кварцевых или фторопластовых трубках с внутренним диаметром 3 мм и высотой до 15 мм и 2) изготовление цилиндрических брикетов диаметром 8 мм и высотой 15 мм путем прессования исходной шихты в специальной пресс-форме.

Процесс СВС инициировали нагревом вольфрамовой проволоки диаметром 0,3 мм.

Процесс горения изучали по общеизвестной методике, описанной в работах [13–15].

Для измерения температуры использованы вольфрам-рениевые термодпары (ТВР) А1 диаметром 450 мкм, для установки которых в камере и капсуле с образцом просверливали отверстия глубиной ~ 2 мм и диаметром 1 мм. Для усиления сигналов применяли аналоговый прецизионный усилитель AD627. Регистрацию сигналов осуществляли с помощью осциллографа Wittig Technologies W2012.

Видеорегистрацию процесса СВС выполняли с использованием цифрового фотоаппарата Sony Cyber-shot DSC-H7.

Основные параметры, характеризующие процесс СВС, – ширину зоны прогрева x_m , время реакции в волне t_p , время нагревания вещества в волне t_m и скорость нагревания вещества в волне W находили, используя расчетные формулы, указанные в [1],

$$x_m = \frac{\alpha}{u}, \quad (1)$$

$$t_m = \frac{x_m}{u}, \quad (2)$$

$$t_p = \frac{(L_a - x_m)}{u}, \quad (3)$$

$$W = \frac{(T_z - T_0)}{t_m}, \quad (4)$$

где α – коэффициент температуропроводности образца; u – линейная скорость волны горения; L_a – длина волны горения; T_0 – начальная температура шихты; T_z – максимальная температура горения на температурном профиле.

Для построения температурного профиля процесса горения также были рассчитаны коэффициент теплопроводности порошковой смеси $\lambda_{см}$ (по формуле Оделевского [18]) и тепловой поток q :

$$\lambda_{см} = \lambda_1 \left(1 - \frac{y_2}{1 - \frac{y_1}{1 - \nu} \frac{y_2}{3}} \right), \quad (5)$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial t} \cdot u^{-1}, \quad (6)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности компонентов смеси; y_1, y_2 – объемные содержания компонентов смеси; $\nu = \lambda_2 / \lambda_1$ [14].

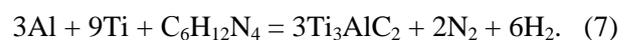
Расчет по формуле (5) сначала проводили для двух компонентов смеси, а затем полученную величину теплопроводности и значение теплопроводности третьей компоненты смеси, а также их объемные содержания использовали для расчета коэффициента теплопроводности трехкомпонентной смеси.

Рентгенофазовый анализ (РФА) синтезированных углеродных и металлоуглеродных материалов и исходной шихты проводили в излучении CuK_α на дифрактометрах ДРОН-3 и Bruker D8 DISCOVER, Rigaku Ultima IV (Япония). Обработку результатов РФА осуществляли с использованием программного обеспечения Bruker: EVA. Для приближенной оценки среднего размера кристаллитов применялся метод Уильямсона-Холла [17, 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Система Ti-Al-гексаметилентетрамин ($C_6H_{12}N_4$)

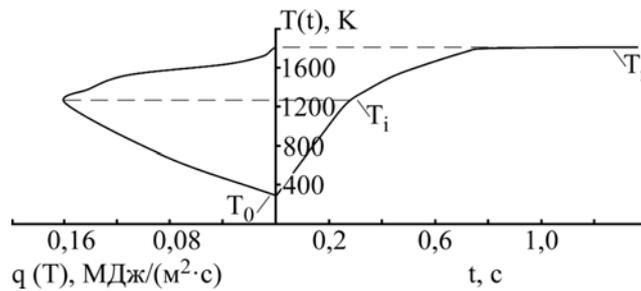
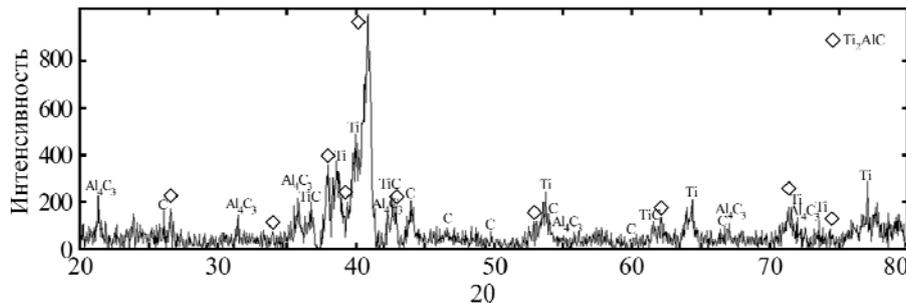
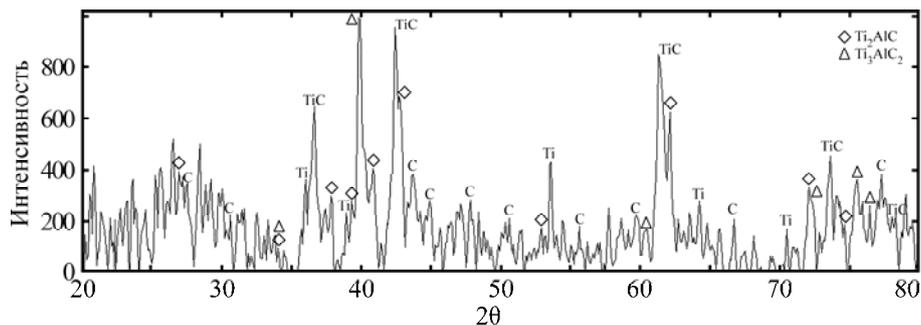
Порошковую смесь для реализации СВС готовили с мольным отношением реагентов, соответствующим стехиометрическому уравнению химической реакции:



Следует отметить, что данная исходная смесь является слабоэкзотермической и потому требует длительного инициирования. При этом шихта, помещенная во фторопластовый контейнер, не зажигается вовсе, в то время как сложные многоступенчатые реакции, проходящие в брикетиро-

Таблица 1. Параметры процесса СВС в исследуемых системах

| Параметры процесса СВС | Порошковые системы | | |
|--|---|---|------------------------|
| | Ti-Al-C ₆ H ₁₂ N ₄ | Ti-Al-(C ₂ F ₄) _n | Ti-Al-аморфный углерод |
| Температура иницирования T_i , К | 1227 | 1575 | 930 |
| Температура горения T_z , К | 1940 | 2430 | 2343 |
| Длительность процесса t_{np} , с | 1,03 | 1,5 | 1,1 |
| Линейная скорость горения u , мм/с | 11,65 | 8 | 10,9 |
| Ширина зоны прогрева x_m , мм | 3,95 | 2,73 | 4,78 |
| Общая длина волны L_θ , мм | 5,5 | 3 | 5,7 |
| Время реакции в волне t_p , с | 0,13 | 0,03 | 0,08 |
| Время нагревания вещества в волне t_m , с | 0,0034 | 0,34 | 0,43 |
| Скорость нагревания вещества в волне W , К/с | 52900 | 2505 | 3222 |

Рис. 1. Температурный профиль процесса СВС в системе Ti-Al-C₆H₁₂N₄.Рис. 2. Дифрактограмма СВС-продукта в системе Ti-Al-C₆H₁₂N₄ при дополнительном сжатии (CuKα-излучение).Рис. 3. Дифрактограмма СВС-продукта в системе Ti-Al-C₆H₁₂N₄ после химической обработки (CuKα-излучение).

ванном образце на воздухе при атмосферном давлении, сопровождаются горением гексаметилентетрамина и алюминия, и, собственно, сам СВС начинается только после определенного периода времени. Для уменьшения пористости материала было применено дополнительное сжатие образца после прохождения волны горения в момент начала остывания синтезированного продукта.

Результаты измерения линейной скорости волны и термограммы горения позволяют

рассчитать основные параметры, характеризующие процесс СВС (табл. 1).

Температурные профили процесса СВС для смеси титан-алюминий-гексаметилентетрамин (рис. 1) построены на основе экспериментальных данных о температуре в волне горения и рассчитанных параметров порошковой смеси (плотность $\rho = 2826 \text{ кг/м}^3$; теплоемкость $c = 704,2 \text{ Дж/(кг·К)}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 17,79 \text{ Вт/(м·К)}$ и температуропроводности $\alpha = 89,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Как следует из термо-

Таблица 2. Условия синтеза и фазовый состав материала в системе Ti-Al-гексаметиленetetрамин

| Условия получения материала | Фазовый состав, % | | | | | | |
|--|-------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------|------|------|-----|
| | TiC | Ti ₂ AlC | Ti ₃ AlC ₂ | Al ₄ C ₃ | α-Ti | β-Ti | C |
| СВС брикета при дополнительном сжатии | 11,5 | 47,1 | – | 11 | 8,2 | 14,3 | 7,9 |
| СВС брикета с дополнительным сжатием и химической обработкой | 12,9 | 52,9 | – | – | 10,1 | 15,2 | 8,9 |
| СВС брикета с химической обработкой | 28,3 | 19,6 | 29,8 | – | 6 | 6,8 | 9,5 |

Таблица 3. Параметры решетки и средний размер кристаллитов синтезированных фаз в системе Ti-Al-гексаметилентетрамин

| Синтезированные фазы | База данных и номер карточки | Параметры решетки и средний размер кристаллитов | | | | |
|----------------------------------|---|---|--------|--------|--------|-------------------------|
| | | Крист. группа | a, нм | b, нм | c, нм | Размер кристаллитов, нм |
| α-Ti | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 01-074-4578 | 194: P63/mmc | 0,289 | 0,289 | 0,466 | 1,67 |
| Ti ₂ AlC | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 01-075-9784 | 194: P63/mmc | 0,2979 | 0,2979 | 1,3515 | 52 |
| Carbon | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 01-075-0444 | 166: R-3m, hexagonal | 0,228 | 0,228 | 1,005 | 9,8 |
| Carbon | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 00-054-0501 | 139: I4/mmm | 0,425 | 0,425 | 0,243 | 35,6 |
| β-Ti | User (COD) 9008517 | 194: P63/mmc | 0,300 | 0,300 | 0,454 | 3,4 |
| Al ₄ C ₃ | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 03-065-9731 | 166: R-3m, hexagonal | 0,336 | 0,336 | 2,501 | 60,6 |
| TiC | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 03-065-9883 | 225: Fm-3m | 0,4322 | 0,4322 | 0,4322 | 437 |
| Ti ₃ AlC ₂ | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 01-074-8806 | 194: P63/mmc | 0,3057 | 0,3057 | 1,801 | 179 |

граммы, горение порошковой смеси Ti-Al-C₆H₁₂N₄ происходит при температуре, близкой к температуре плавления титана.

Из результатов рентгенофазового анализа продукта СВС в системе Ti-Al-C₆H₁₂N₄ (с реализацией дополнительного сжатия) видно, что рентгеновские пики для Ti, TiC и Al₄C₃ в интервале углов отражения от 35° до 43° перекрываются (см. рис. 2), что не позволяет достоверно судить о наличии МАХ-фаз. Исходя из результатов химического анализа полученного СВС материала – соотношение титана и алюминия составляет Ti : Al = 8,6 (исходное соотношение Ti : Al = 5,3), можно сделать вывод о частичном испарении Al, которое не позволяет прореагировать всем компонентам смеси согласно уравнению (7) и приводит к наличию в СВС-продукте свободных титана и углерода.

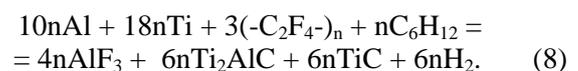
Для очистки СВС-продукта от карбида алюминия и свободного титана продукт обрабатывали 10% серной кислотой в течение двух часов при температуре 100°C.

На дифрактограмме химически обработанного продукта СВС в системе Ti-Al-C₆H₁₂N₄

(рис. 3) хорошо видны пики МАХ-фаз Ti₂AlC и Ti₃AlC₂, что позволило определить фазовый состав синтезированного композитного материала (табл. 2) при различных условиях проведения синтеза и последующей химической очистки, а также параметры решетки и средний размер кристаллитов (табл. 3).

Система Ti-Al-политетрафторэтилен (-C₂F₄-)_n

Образцы для реализации СВС в системе Ti-Al-политетрафторэтилен готовили из смеси порошков компонентов с мольным отношением реагентов, соответствующим стехиометрическому уравнению предполагаемой химической реакции:



В порошковую смесь был добавлен циклогексан C₆H₁₂ (5 масс.%) в качестве инертной органической жидкой среды, препятствующей окислению продуктов синтеза.

Компоненты порошков после смешивания помещали в трубки из политетрафторэтилена

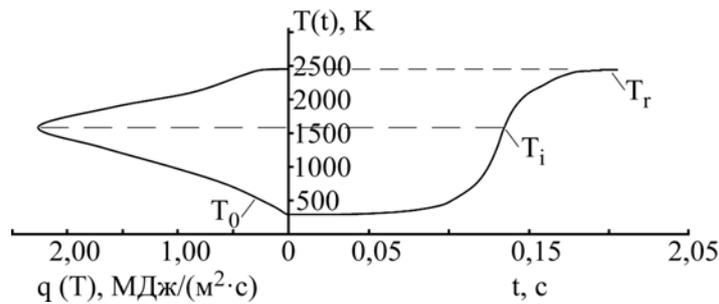


Рис. 4. Температурный профиль процесса CBC в системе Ti-Al-политетрафторэтилен.

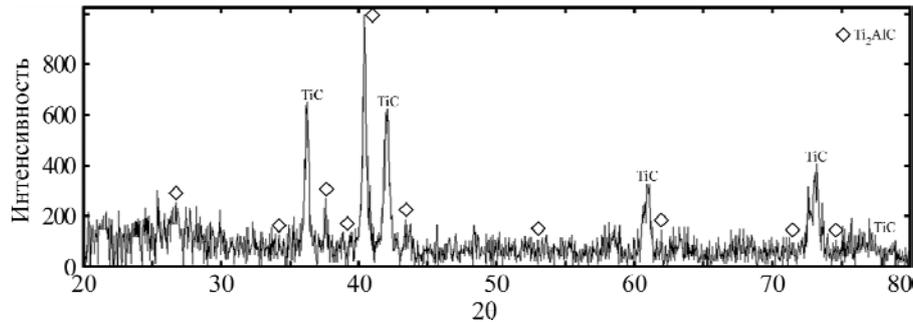


Рис. 5. Дифрактограмма CBC-продукта в системе Ti-Al-политетрафторэтилен (CuK α -излучение).

Таблица 4. Фазовый состав, параметры решетки и средний размер кристаллитов синтезированных фаз в системе Ti-Al-политетрафторэтилен

| Синтезированные фазы | Фазовый состав, % | База данных и номер карточки | Параметры решетки и средний размер кристаллитов | | | | |
|----------------------|-------------------|---------------------------------------|---|----------|----------|----------|-------------------------|
| | | | Крист. группа | a , нм | b , нм | c , нм | Размер кристаллитов, нм |
| TiC | 39,4 | User (COD) 5910091 | 225: Fm-3m | 0,4313 | 0,4313 | 0,4313 | 39,0 |
| Ti ₂ AlC | 60,6 | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 01-075- | 194: P63/mmc | 0,2979 | 0,2979 | 1,3515 | 52 |

высотой 15 мм и внутренним диаметром 3 мм при относительной плотности порошковой шихты 0,65.

При импульсном нагреве вольфрамовой спиралью верхнего торца подготовленного порошкового образца до необходимой температуры происходит инициирование реакции CBC. Внешний вид продукта свидетельствует о прохождении волны горения смеси по всему объему образца.

Температурный профиль процесса CBC (рис. 4) построен на основе экспериментальных данных о температуре в волне горения и рассчитанных параметров порошковой смеси (плотность $\rho = 2851 \text{ кг/м}^3$; теплоемкость $c = 783,2 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 18,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ и температуропроводности $\alpha = 8,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Рассчитаны основные параметры процесса CBC в данной системе (табл. 1). Из рис. 4 видно, что профиль волны горения рассматриваемой смеси отличается от

профиля предыдущей смеси, имеет плавный подъем от начальной температуры T_0 до $T_i = 1575 \text{ K}$ и далее до максимальной $T_r = 2430 \text{ K}$.

На основании полученных результатов рентгенофазового анализа (рис. 5 и табл. 4) и с учетом экспериментальных данных о температуре в волне горения предполагается следующий механизм прохождения CBC-реакции в порошковой системе «алюминий + титан + политетрафторэтилен».

Первой стадией прохождения CBC после инициирования процесса горения является плавление алюминия, далее происходит реакция между алюминием и политетрафторэтиленом с образованием фторида алюминия и синтезом свободного углерода. Согласно химическому анализу полученного CBC материала, соотношение титана и алюминия составляет $Ti : Al = 4,2$ (исходное соотношение $Ti : Al = 3,2$). Так как рентгенофазовый анализ показал отсутствие в CBC-продукте свободного титана, то

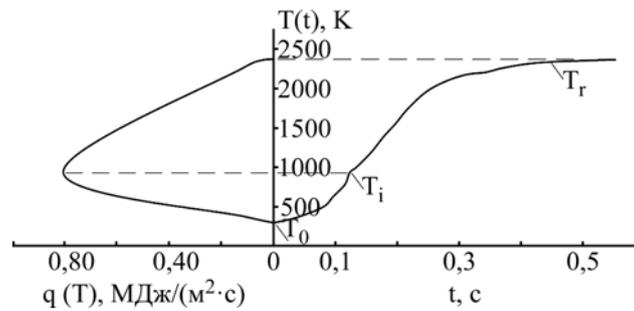


Рис. 6. Температурный профиль процесса СВС в системе Ti-Al-аморфный углерод.

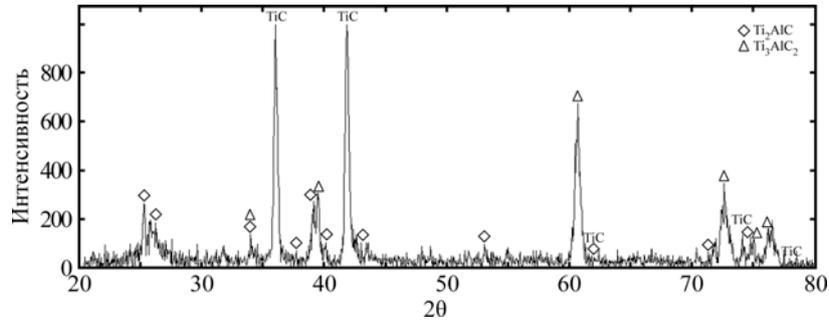


Рис. 7. Дифрактограмма СВС-продукта в системе Ti-Al-аморфный углерод (образец, помещенный в политетрафторэтиленовую трубку) (CuKα-излучение).

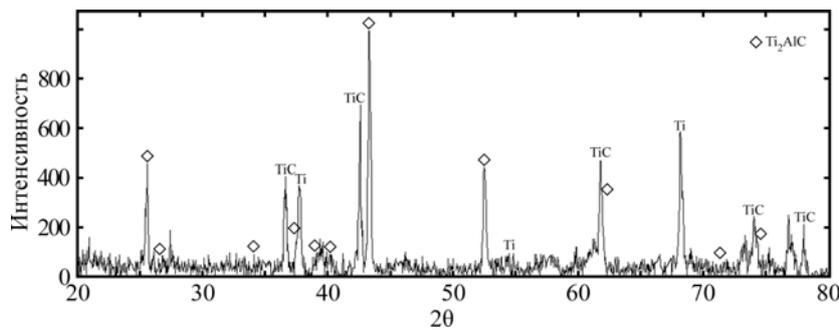


Рис. 8. Дифрактограмма СВС-продукта в системе Ti-Al-аморфный углерод (образец, спрессованный в брикет) (CuKα-излучение).

Таблица 5. Фазовый состав, параметры решетки и средний размер кристаллитов синтезированных фаз в системе Ti-Al-аморфный углерод

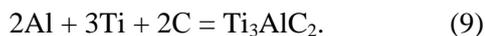
| Условия СВС | Фазовый состав продуктов | | База данных и номер карточки | Параметры решетки и средний размер кристаллитов | | | | |
|---------------------|----------------------------------|-----------|---|---|--------|--------|--------|-------------------------|
| | Фаза | Состав, % | | Крист. группа | a, нм | b, нм | c, нм | Размер кристаллитов, нм |
| Шихта в ПТФЭ трубке | Ti ₃ AlC ₂ | 36 | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 01-074-8806 | 194: P63/mmc | 0,3057 | 0,3057 | 1,801 | 179 |
| | Ti ₂ AlC | 17 | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 01-075-9784 | 194: P63/mmc | 0,2979 | 0,2979 | 1,3515 | 52 |
| | TiC | 47 | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 03-065-9883 | 225: Fm-3m | 0,4322 | 0,4322 | 0,4322 | 437 |
| Брикет на воздухе | Ti ₂ AlC | 51 | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 01-075-9784 | 194: P63/mmc | 0,2979 | 0,2979 | 1,3515 | 52 |
| | TiC | 33 | User (COD) 9008747 | 225: Fm-3m | 0,4243 | 0,4243 | 0,4243 | 187 |
| | Ti | 16 | ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB) 01-074-7075 | 229: Im-3m | 0,3367 | 0,3367 | 0,3367 | 182 |

можно предположить, что снижение содержания алюминия в процессе СВС происходит не в результате его испарения, а вследствие возгонки фторида алюминия (при температуре 1553 К). После плавления титана под воздействием высоких температур экзотермической реакции (1940 К) образуется расплав, состоящий из титана и алюминия, насыщенный углеродом. Затем из расплава выделяются карбид титана и МАХ-фаза Ti_2AlC .

Таким образом, в процессе горения в системе Ti-Al-политетрафторэтилен происходит синтез наноструктурного композитного материала, содержащего карбид титана (39,4%) и МАХ-фазу Ti_2AlC (60,6%) (табл. 4).

Система Ti-Al-аморфный углерод

Образцы для реализации СВС готовили из смеси порошков с мольным отношением реагентов, соответствующим стехиометрическому уравнению химической реакции:



В качестве источника углерода в этой серии экспериментов применяли аморфный углерод, синтезированный в газоразрядной камере в результате двухстадийной электроразрядной обработки циклогексана [12].

Исходные образцы были приготовлены согласно двум описанным выше методикам. Процесс СВС проходит до конца в обоих случаях.

Измерения температуры в волне горения проводили в образце, помещенном во фторопластовый контейнер. Температурный профиль процесса СВС (рис. 6) построен на основе экспериментальных данных о температуре и рассчитанных параметров порошковой смеси (плотность $\rho = 3506 \text{ кг/м}^3$; теплоемкость $c = 649,4 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 19,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и температуропроводности $\alpha = 8,36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$).

Результаты рентгенофазового анализа, представленные на рис. 7 и 8, показали, что состав продуктов СВС в данной системе зависит от методики приготовления экспериментальных образцов: в политетрафторэтиленовом контейнере образуется смесь двух МАХ-фаз и карбида титана, тогда как в брикетированном образце фаза Ti_3AlC_2 не синтезируется, а материал содержит непрореагировавший титан (табл. 5). Последний факт, по-видимому, обусловлен выгоранием алюминия на воздухе и соответственно нарушением исходного стехиометрического соотношения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы процессы горения и синтеза в порошковой системе Ti-Al-C при использовании разных углеродных прекурсоров (гексаметилен-тетрамин, политетрафторэтилен, аморфный углерод). Показано, что характер протекания и основные параметры процессов СВС определяются типом выбранного углеродного прекурсора и методикой приготовления исходных образцов. Скорость волны горения составляет порядка 10 мм/с, температуры горения 1800–2430 К.

Использование выбранных в работе прекурсоров позволяет получать в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза композитные материалы, содержащие карбид титана и МАХ-фазы Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 .

Возможные механизмы протекания исследуемых процессов в выбранных порошковых системах, а также влияние дополнительного воздействия на образец после окончания процесса СВС будут рассмотрены в последующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chun-Cheng Zhu, Jia Zhu, Hua Wu, Hong Lin. *Rare Metals*. 2015, **34**(2), 107–110.
2. Varma A. *Adv Chem Eng*. 1998, **24**, 78–226.
3. Bystrzejewski M., Szala M., Kicinski W., Kaszwarowa W. et al. *New Carbon Mater*. 2010, **25**(2), 81–88.
4. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. *Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов*. Под научной редакцией В.Н. Анциферова. М.: Машиностроение-1, 2007. 471 с.
5. Barsoum M.W., El-Raghy T. Ali M. *Metall Mater Trans A*. 2000, **31**, 1857–1865.
6. Yan M., Mei B, Zhu J. et al. *Ceram Int J*. 2008, **34**(6), 1439–1442.
7. Старостина А.В., Прихна Т.А., Карпец М.В. *Сверхтвердые материалы*. 2011, (5), 32–41.
8. Прихна Т.А., Дуб С.Н., Старостина А.В., Карпец М.В и др. *Сверхтвердые материалы*. 2012, (2), 38–48.
9. Nagub M., Kurtoglu M., Presser V., Lu J. et al. *Adv Mater*. 2011, **23**(37), 4248–4253.
10. Syzonenko O., Sheregii E., Prokhorenko S., Torpakov A. et al. *Machines, Technologies, Materials*. 2017, (4), 171–173.
11. Сизоненко О.М., Липян С.В., Зайченко А.Д., Торпаков А.С., Присташ М.С. и др. *Спосіб виготовлення МАХ-матеріалу на основі потрійних карбідів титану і алюмінію*. Украина пат. 121019, 2017. Бюл. № 22. 4 с.
12. Kuskova N.I., Baklar' V.Yu., Terekhov A.Yu., Yushchishina A.N. et al. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2014, **50**(2), 101–105.

13. Челпанов Д.І., Кускова Н.І., Смалько А.О. *Способ одержання вуглецевих наноматеріалів*. Україна патент 104443, 2016. Бюл. № 2. 4 с.
14. Челпанов Д.И., Бакларь В.Ю., Кускова Н.И., Корзинова А.Н. *Вісник НТУ «ХП»*. Сер. *Техніка та електрофізика високих напруг*. 2016, (51), 115–120.
15. Рогачев А.С., Мукасян А.С. *Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 400 с.
16. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. *Теплофизические свойства компонентов горючих систем*. М.: Информ ТЭИ, 1992. 184 с.
17. Suryanarayana C., Grant Norton M. *X-ray Diffraction: A Practical Approach*. New York: Springer Science+Business Media, 1998. 273 p.
18. Mote V., Purushotham Y. & Dole B. *J Theor Appl Phys*. 2012, **6**, 1–8.

Поступила 26.01.18

Summary

The processes of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) in the Ti-Al-C powder system were investigated. Hexamethylenetetramine, polytetrafluoroethylene and amorphous carbon were used as carbon precursors. It was shown that the character of the SHS process and its main parameters are determined by the type of the chosen carbon-containing precursor and by the method of the initial powder samples preparation. It was established that the usage of chosen carbon precursors allows the synthesis of nanostructure composite materials containing titanium carbide and MAX phase Ti_2AlC , while in powder systems Ti-Al-hexamethylenetetramine and Ti-Al-amorphous carbon, the synthesis of MAX phase Ti_3AlC_2 occurs under certain conditions.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, MAX phases, titanium carbide, carbon precursors.