ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Шульпеков А.М., кандидат техническтх наук,
Лепакова О.К., кандидат техническтх наук,
Радишевская Н.И., кандидат техническтх наук,
Томский научный центр СО РАН

ФАЗО - И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ TIO_2-AL-C В ПРОЦЕССЕ СВС

Аннотация: целью работы являлось разработки более простых и дешевых методов получения материалов на основе карбида титана, перспективных для использования в высокотемпературных электронагревателях.

Для этого методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза получен композиционный материал на основе карбида титана и оксида алюминия с использованием в качестве исходных компонентов оксида титана, алюминия и сажи. Установлено, что основными стадиями процесса синтеза являются плавление исходных оксида титана и алюминия, восстановление оксида титана алюминием, взаимодействие продукта восстановления оксида титана с углеродом. Протекание побочной реакции восстановления оксида титана углеродом может служить причиной образования нестехиометрического карбида титана.

Исследовано добавок углерода, алюминия, титана, марганца циркония никеля и кремния на фазовый состав, микроструктуру, электропроводность продукта синтеза, степень стехиометрии карбида титана. Добавка углерода до 10 мас. % повышает скорость горения исходной смеси, и параметр решетки карбида титана. Добавка углерода и марганца сверх стехиометрии способствует более полному протеканию процесса и позволяет улучшить качество продукта за счет более полного удаления кислорода из карбида титана и повысить удельную электропроводность получаемого композита.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, карбид титана, электропроводная керамика.

ВВЕДЕНИЕ

Электропроводящие полимерные покрытия, наполненные порошками тугоплавких соединений титана, таких, например, как карбид, нитрид, карбонитрид, карбосилицид, находят большое применение в качестве пленочных электронагревателей различного назначения, [1-3] антистатических экранов, электропроводящих клеев, электрических контактов [4] и др. В связи с этим актуальным является задача разработки более простых и дешевых методов получения этих материалов.

Карбид титана обладает рядом полезных свойств: тугоплавкостью, твердостью, жаростойкостью, жаропрочностью, высокой электропроводностью, низкой скоростью испарения, устойчивостью к кислотам и т.д. В связи с этим он применяется в промышленности в качестве твердых сплавов, покрытий, пористых материалов, катализаторов, катодов и т.д. [5]. Такой материал получают, в основном, нагреванием смеси титана или его оксида с углеродом при высоких температурах (около 2000 °С) в течение длительного времени (десятки часов), что требует больших энергетических затрат. Синтез проводят в атмосфере водорода при повышенных мерах безопасности, либо вакууме с использованием специальных высокотемпературных вакуумных печей. Кроме того, необходима длительная стадия измельчения продукта в специальных мельницах с футеровкой. В последнее время разработан способ получения карбида титана методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), который не обладает указанными недостатками [6]. Однако, исходным компонентом при синтезе является дорогостоящий металлический титан. В связи с этим, данная работа посвящена изучению возможности получения электропроводящих материалов на основе карбида титана методом СВС из более дешевого материала – оксида титана. Кроме того, особое внимание уделяется возможности исключения водородной атмосферы и замене ее более безопасной. Ранее был предложен метод получения композита на основе карбида титана методом алюмотермического восстановления оксида титана в присутствие углерода [7]. Но полученный таким способом карбид титана существенно отличается от стехиометрического, содержит значительное количество кислорода, что ухудшает его свойства.

Целью данной работы является разработка СВ-метода синтеза карбида титана по составу приближающегося к стехиометрическому, с наименьшим содержанием примесей и композитов на его основе, изучение механизма образования TiC, а также исследование влияния различных добавок на электропроводность полученных материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для приготовления реакционной смеси использовали оксид титана TiO_2, квалификации "Ч.Д.А", ТУ 6-09-2166-72, сажу марки ПМ-75 ТУ 38-1158-71, алюминий марки АСД-4. Состав исходных веществ рассчитывали по уравнению реакции, учитывая стехиометрические коэффициенты: $3TiO_2 + 4Al + 3C \rightarrow 3TiC + 2Al_2O_3$. Синтез проводили на воздухе и в реакторе постоянного давления в среде аргона при избыточном давлении от 0 до 2 кгс/см^2. Образцы в виде цилиндров диаметром 10 и 20 мм готовили прессованием порошка исходной смеси в пресс-форме при давлении 70 кгс/см^2. Идентификацию полученных веществ осуществляли при помощи рентгенофазового анализа на дифрактометре – ДРОН-УМ-1 и инфракрасной спектроскопии в области 1200-400см$^{-1}$ на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 5700 с использованием приставки диффузного отражения. Содержание и параметры решетки фаз в конечном продукте рассчитывали из рентгенограмм с помощью программы Powder Cell 2.4. Металлографический анализ образцов проводили на оптическом микроскопе Axiovert 200M MAT. Содержание углерода определяли сжиганием образца в токе кислорода при 1250 ºС с последующим кулонометрическим титрованием CO_2 на экспресс-анализаторе АН-7529. Электропроводность образцов цилиндрической формы определяли с помощью двухэлектродной ячейки, подключенной к омметру Ф410.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эксперимент показал, что горение реакционной смеси происходит в стационарном послойном режиме с образованием в качестве продуктов реакции карбида титана и оксида алюминия. В небольшом количестве присутствует оксид титана в виде рутила или анатаза. Типичная рентгенограмма продуктов реакции приведена на рис. 1. Изучение температурного профиля волны горения показало, что температура максимума составляет ~2200 °С. Это совпадает с расчетной адиабатической температурой горения (2150 °С). За реакционной зоной располагается зона с постоянной температурой около 1700 °С, соответствующая температуре плавления титана и растворов углерода в титане. Установлено, что в процессе синтеза наблюдается интенсивное выделение газов, приводящее в ряде случаев к разрушению образца.

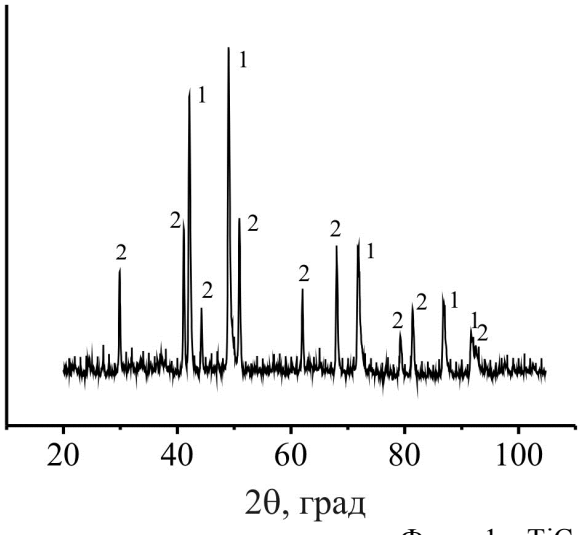

Рис. 1. Рентгенограмма продуктов реакции. Фазы: 1 – TiC, 2 – Al_2O_3

Интенсивность выделения газов можно уменьшить повышением давления аргона в реакторе, однако при давлении его выше 2 кгс/см^2 горение смеси не происходит. Исследование промежуточных продуктов синтеза методом закалки в воде проводили на образцах диаметром 20 мм. Рентгенофазовый анализ проб в прореагировавшей части образца показал, что дополнительных фаз кроме карбида титана и оксида алюминия не образуется. Параметр решетки карбида титана, образующегося за фронтом горения, (а=4,3199 Å) немного больше его значения в месте остановки фронта горения (а=4,3169 Å).

Металлографическим методом была исследована микроструктура образца, полученного в результате закалки в воде. Микрофотографии шлифа торцевой части образца в месте остановки фронта горения приведены на рис. 2. На микрофотографиях края образца (рис. 2 а) видны капли практически правильной формы серого цвета. Кроме того, наблюдаются мелкие оплавленные частицы белого цвета, вероятнее всего алюминия, и темные частицы углерода. Крупные частицы "серой фазы" - оксида титана, имеют радиальные трещины, заполненные более темной фазой. На рис. 2 б (область 1) виден процесс образования слоя продукта (темное кольцо) вокруг капли. В области 2 видна мно-

гослойная структура этого кольца. После прохождения фронта горения исходные капли превратились в однородную “серую фазу” с вкраплением светлой. Эта фаза состоит из множества мелких кристалликов серого цвета, разделенных кристалликами белого цвета.

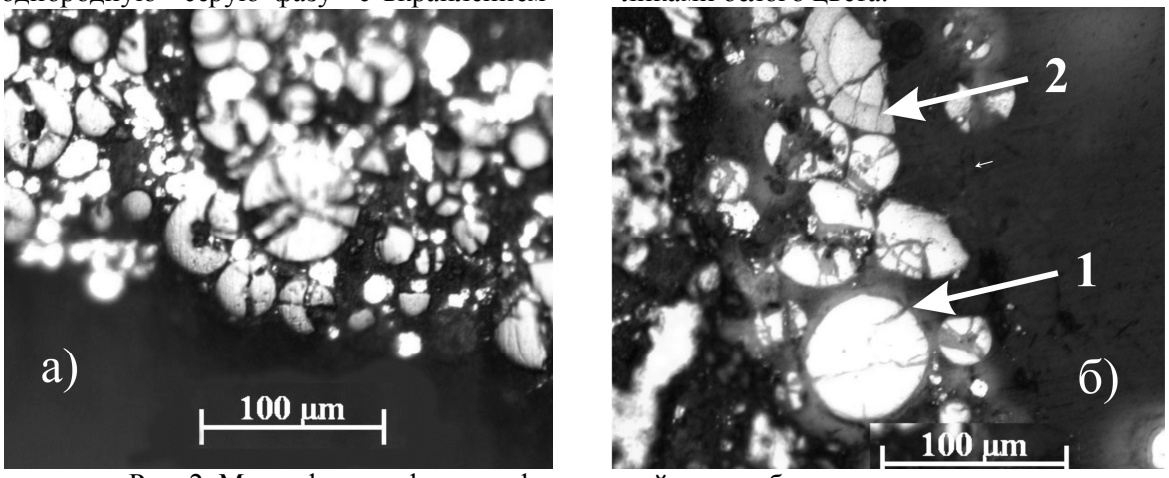

Рис. 2. Микрофотографии шлифа торцевой части образца после закалки.

Согласно ИК-спектроскопическим исследованиям, в спектре продукта, синтезированного из стехиометрической смеси наблюдается серия полос поглощения при 696,9; 628,1; 553,4; 470,9; 426,5см$^{-1}$, характерные для α- и θ-фаз Al_2O_3 [9, 10]. На рис. 3 приведен спектр образца оксида алюминия, содержащий, согласно данным РФА, 85 мас. % α-Al_2O_3. Полоса при 858,9 см$^{-1}$ относится к колебаниям связи OH-Al (колебание OH связи связанной с ионом Al^{3+} в октаэдрической позиции). При 826,7 см$^{-1}$ полоса поглощения принадлежит колебанию связи Al_{VI}-O-Al_{VI}, а при 671,8; 641,0; 611,6; 427 см$^{-1}$ – структурным AlO_6 группам, характерным для α-Al_2O_3. В спектре синтезированного образца наблюдаются те же полосы поглощения, что и у корунда, однако наблюдаемый сдвиг полос в высокочастотную область в интервале 700-500 см$^{-1}$ свидетельствует о том, что в соединении отсутствует тетраэдрически координированный алюминий – AlO_4, характерный для промежуточных фаз Al_2O_3 [11, 12].

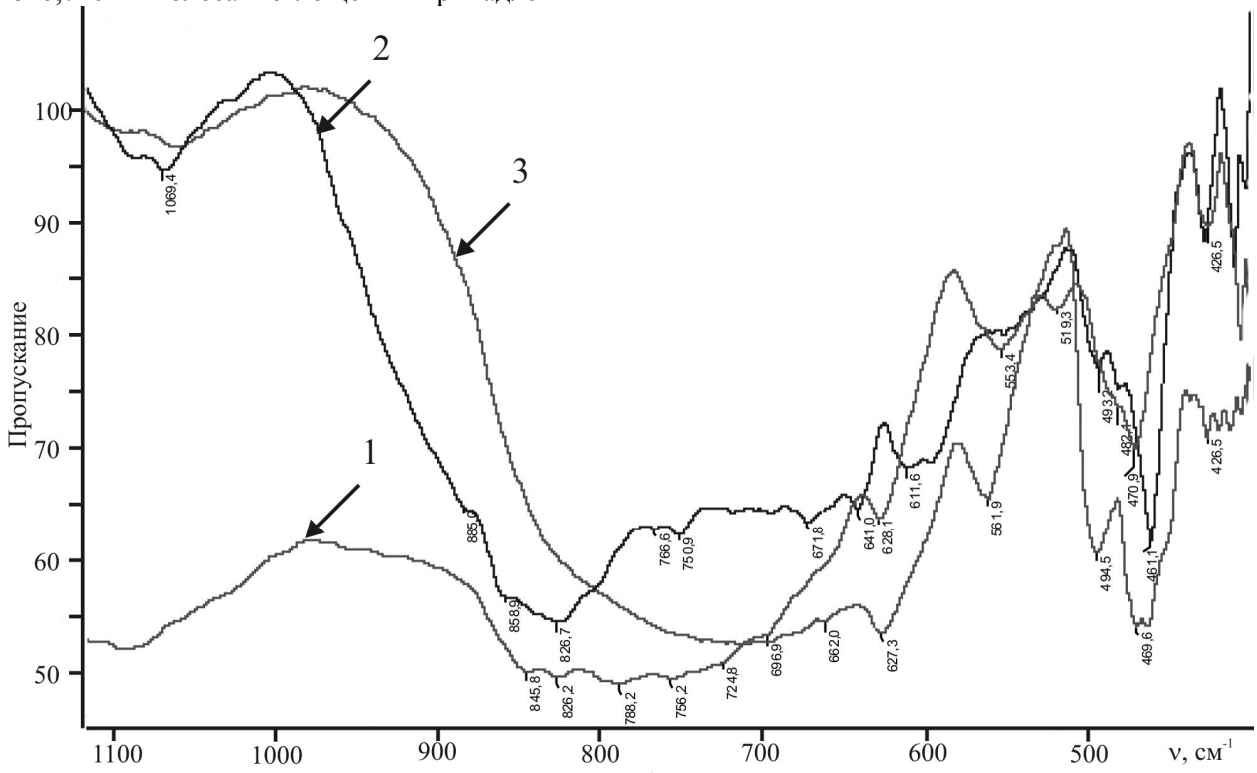

Рис. 3. ИК - спектры продуктов реакции в области 400-1100 см$^{-1}$, где: 1 – продукт синтеза; 2 – α-Al_2O_3; 3 – «розовый» корунд.

На рис. 3 приведен спектр так называемого «розового корунда», в решетке которого часть ионов алюминия в октаэдрической позиции заменена на ионы Cr^{3+} [8]. Такая замена на более тяжелый ион хрома приводит к сдвигу полос поглощения 662,0 $см^{-1}$, 627,3 $см^{-1}$, 561,9 $см^{-1}$ в низкочастотную область. Аналогичный сдвиг наблюдается и на спектре синтезированного продукта, что свидетельствует о замещении ионов алюминия на ионы титана. Об этом же свидетельствует и наличие полосы поглощения при 519,3 $см^{-1}$, обусловленной колебаниями связи $Ti\text{-}O\text{-}Al_{VI}$. При 788,2 $см^{-1}$ наблюдается колебание, сопровождающее связь Ti-O, что говорит о присутствии в образце оксида титана. Характер пика с максимумом при 470,9 $см^{-1}$ указывает на то, что оксид титана содержится в виде рутила.

Из данных ИК-анализа следует, что часть исходного оксида титана реагирует с образующимся в ходе реакции оксидом алюминия. По-видимому, количество прореагировавшего оксида титана является незначительным и не обнаруживается методом РФА, однако это может быть одной из причин нарушения стехиометрии образующегося карбида титана.

Таким образом, на основании данных металлографии, ИК – спектроскопического, рентгенофазового анализа и результатов изучения температурного профиля реакции можно предложить следующий механизм образования карбида титана. На первой стадии происходит плавление оксида титана и алюминия, затем углерод диффундирует в оксид титана, а кислород в алюминий. В результате образуется твердый раствор углерода и кислорода в титане. Причем концентрация углерода постепенно повышается, а кислорода уменьшается. По мере насыщения углеродом, температура плавления расплава повышается, и из него выпадают кристаллы карбида титана и оксида алюминия. Частично идут реакции и в газовой фазе, в частности образование оксида углерода. Часть оксида титана растворяется в оксиде алюминия.

Как показали исследования, относительное содержание фаз и параметр решетки карбида титана зависят от условий проведения синтеза. Так, при проведении синтеза для образца диаметром 20 мм было значение параметра решетки карбида титана больше, чем для образца диаметром 10 мм. Это связано с тем, что увеличение диаметра образца уменьшает его теплопотери и способствует более полному протеканию реакции.

Для компенсации потерь углерода, расходующегося на восстановление оксида титана, к стехиометрической смеси добавляли 5, 10, 15, 20 и 50 мас. % сажи. Добавление 10 мас. % сажи приводит к резкому увеличению скорости горения. При дальнейшем добавлении сажи скорость горения уменьшается и при 20 мас. % становится меньше, чем у исходного состава (рис. 4).

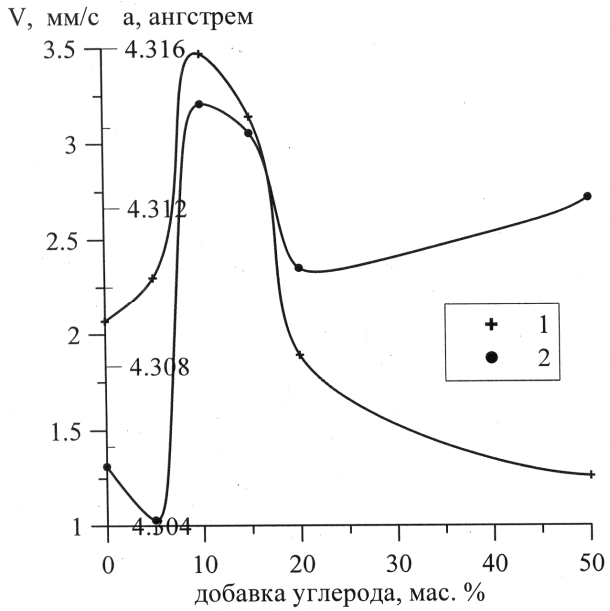

Рис. 4. Влияние добавки углерода на скорость горения (1) и параметр решетки карбида титана (2)

Во время синтеза наблюдается интенсивное выделение газов, при этом образец теряет до 5 мас. % массы при добавке в исходную смесь 10 мас. % углерода. Содержание углерода в образце при этом имеет минимальное значение. Тем не менее, параметр решетки фазы TiC имеет максимум в этой точке. Содержание примеси оксида титана при этом падает с 2,8 до 0,1 мас. %. Значение удельного электрического сопротивления образцов повышается при увеличении концентрации

углерода в исходной смеси и может служить способом регулирования электропроводности резистивного материала. Видимо, добавка углерода до 10 мас. % приводит к усилению побочной реакции – восстановление оксида титана углеродом и к закономерному повышению скорости распространения фронта. Однако, учитывая, что эта реакция эндотермическая и углерод в большом избытке выступает в качестве разбавителя, температура во фронте падает, что приводит к уменьшению скорости распространения фронта. Уменьшение электропроводности так же легко можно объяснить выделением избытка углерода в межкристаллитном пространстве.

Исследование влияния добавки алюминия (до 15 мас. % сверх стехиометрии) показало, что в данном диапазоне составов не наблюдается образования других фаз кроме карбида титана и корунда. Причем, скорость горения образцов увеличивается прямо пропорционально концентрации алюминия что очевидно, поскольку он является основным восстанавливающим агентом в реакции. Параметр решетки карбида титана так же увеличивается пропорционально повышению содержания алюминия в образце. Однако зависимость электропроводности образцов имеет максимум при концентрации алюминия 10 мас. % сверх стехиометрии. Подобный характер изменения физической величины от состава имеют системы, в которых образуются твердые растворы. Это позволяет предположить, что избыточный алюминий растворяется в карбиде титана.

Для удаления примесей кислорода и алюминия применялись добавки титана, марганца, циркония, кремния, которые активно взаимодействуют с кислородом. Добавка никеля использована в качестве своеобразной «металлической ванны», в которой протекает процесс рекристаллизации карбида титана. Результаты эксперимента показывают, что использование титана, марганца и циркония в количестве 5 масс. % немного снижают скорость горения смеси, т.е. выступают в роли инертного разбавителя. Рентгенофазовый анализ показывает, что никаких дополнительных фаз, в том числе фазы металла, при использовании этих добавок в системе не обнаружено. Добавка никеля приводит к выделению этого металла в виде самостоятельной фазы. С увеличением концентрации никеля выше 10 мас. %, помимо фазы карбида титана и корунда, образуются фазы никеля и, дополнительно Ni_3Al, а в случае добавки кремния - силицида и карбосилицида титана. Это так же подтверждается данными металлографического анализа (рис. 5).

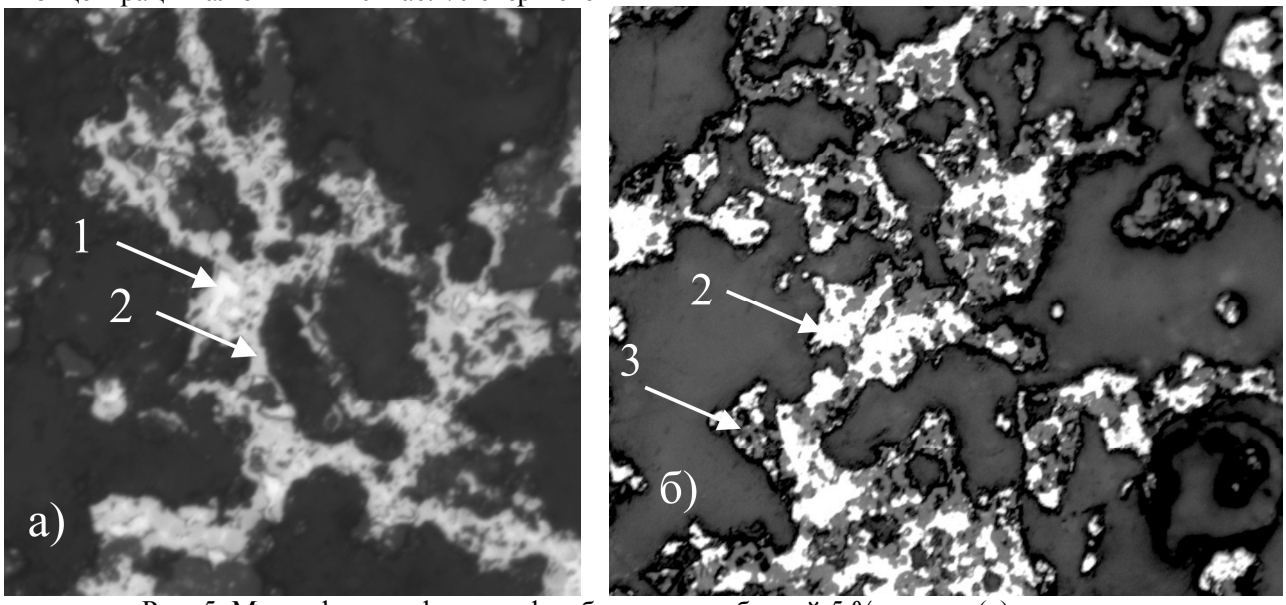

Рис. 5. Микрофотография шлифа образцов с добавкой 5 % никеля (а) и кремния (б). 1 – Ni, 2 – TiC, 3 – $TiSi_2$.

Из таблицы 1 видно, что наименьшим содержанием карбида титана обладают образцы с добавкой кремния, что связано с образованием побочных продуктов - силицида и, при содержании кремния выше 5 мас. %, карбосилицида титана.

Таблица 1

Свойства образцов с добавками (5 мас. %)

добавка	ω (TiC), масс. %	a (TiC), Å	ω(TiO_2), масс. %	ρ, мкОм·м
Ti	35,2	4,3094	0,4	810
Mn	29,2	4,313	н/а*	354
Zr	32,8	4,3305	2,4	1417
Ni	28,4	4,3065	2,7	732
Si	21,5	4,3101	3,6	920

* - не обнаруживается методом РФА.

Эти образцы содержат, кроме того, наибольшее количество непрореагировавшего оксида титана. Следовательно, кремний наименее пригоден в качестве восстановителя. Добавка никеля также не оказала какого-либо существенного влияния на свойства продукта, образцы так же содержат значительное количество оксида титана. В образцах, содержащих цирконий, параметр решетки больше, чем у стехиометрического TiC и наибольшее удельное электросопротивление. Это вероятно связано с внедрением циркония в решетку TiC. Наилучшими характеристиками обладают образцы, содержащие марганец. Параметр решетки TiC близок к значению для стехиометрического соединения, образцы не содержат остаточного оксида титана и имеют наименьшее удельное электросопротивление. Следовательно, в процессе синтеза добавка марганца в наибольшей степени способствует удалению примесного кислорода и позволяет получить продукт с наилучшими свойствами.

ВЫВОДЫ

1. Изучены процессы фазо - и структурообразования в системе TiO_2-Al-C. Установлено, что основными стадиями процесса являются плавление исходных оксида титана и алюминия, восстановление оксида титана алюминием, взаимодействие продукта восстановления оксида титана с углеродом. Протекание побочной реакции восстановления оксида титана углеродом может служить причиной образования нестехиометрического карбида титана.
2. Добавка углерода сверх стехиометрии способствует более полному протеканию процесса и приводит к увеличению содержания углерода в карбиде титана.
3. Значение удельного электрического сопротивления образцов зависит от вида и концентрации добавки в исходную смесь, что может служить способом регулирования электропроводности получаемого композита.
4. Введение марганца в исходную смесь позволяет улучшить качество продукта за счет удаления кислорода из карбида титана и повысить удельную электропроводность получаемого композита.

Литература

1. Шульпеков А.М., Лямина Г.В., Кальянова Т.В., Лепакова О.К., Максимов Ю.М. Электропроводящие покрытия на основе термостойких соединений титана, полученных методом СВС // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2010. №2. С. 3 – 7.

2. Электропроводящий композиционный материал, шихта для его получения и электропроводящая композиция: пат. 2341839 Рос. Федерация: МПК51 H01C7/00 / Лепакова О.К., Голобоков Н.Н., Китлер В.Д., Шульпеков А.М., Максимов Ю.М.; заявитель и патентообладатель Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук. № 2007140364/09: заявл. 31.10.2007; опубл. 20.12.2008, Бюл. № 35. 7 с.

3. Электропроводящий композиционный материал, шихта для его получения и электропроводящяя композиция: пат. 2390863 Рос. Федерация: МПК51 H01C 7/00 H01B 1/00/ Шульпеков А.М., Чухломина Л.Н., Максимов Ю.М.; заявитель и патентообладатель Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук. № 2009115231/09; заявл. 21.04.2009; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. 8 с.

4. Ишков А.В., Сагалаков А.М. Электропроводность композитов с нестехиометрическими соединениями титана // Письма в ЖТФ, 2006. Т. 32, вып. 9. С. 18 – 22.

5. Кипарисов. С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П. Карбид титана: получение, свойства, применение. М.: Металлургия, 1987. 215 с.

6. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса. отв. ред. А.Г. Мержанов.Черноголовка, Территория, 2003. 204 с.

7. Кобяков В.П., Зозуля В.Д., Сичинава М.А., и др. Горение порошковой смеси Fe2O3–TiO2–Al–C в режиме СВС и структура образующихся продуктов // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, №4. С. 60 – 66.

8. Чапская А.Ю., Радишевская Н.И., Касацкий Н.Г., Лепакова О.К., Голобоков Н.Н., Найбороденко Ю.С., Верещагин В.И. Влияние хромсодержащих добавок на структуру пигментов шпинельного типа // Стекло и керамика. 2007. № 3. С. 19 – 20.

9. Зинюк Р.Ю., Балыков А.Г., Гавриленко И.Б. и др. ИК-спектроскопия в химической технологии. Л.: Химия, 1983. 160 с.

10. Киселева Т.Ю., Новакова А.А., Григорьева Т.Ф., Баринова А.П., Ворсина И.А. Механосинтез нанокомпозитов корундовая керамика/интерметаллид // Перспективные материалы. 2008. №8. С. 11 – 19.

11. Барабанов В.Ф. Современные физические методы в геохимии. Л.: Издательство ЛГУ, 1990. 391 с.

12. Болдырев А.И. Инфракрасные спектры минералов. М: Недра, 1976. 200 с.

References

1. SHul'pekov A.M., Lyamina G.V., Kal'yanova T.V., Lepakova O.K., Maksimov YU.M. EHlektroprovodyashchie pokrytiya na osnove termostojkih soedinenij titana, poluchennyh metodom SVS // Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funkcional'nye pokrytiya. 2010. №2. S. 3 – 7.

2. EHlektroprovodyashchij kompozicionnyj material, shihta dlya ego polucheniya i ehlektroprovodyashchaya kompoziciya: pat. 2341839 Ros. Federaciya: MPK51 H01C7/00 / Lepakova O.K., Golobokov N.N., Kitler V.D., SHul'pekov A.M., Maksimov YU.M.; zayavitel' i patentoobladatel' Tomskij nauchnyj centr Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. № 2007140364/09: zayavl. 31.10.2007; opubl. 20.12.2008, Byul. № 35. 7 s.

3. EHlektroprovodyashchij kompozicionnyj material, shihta dlya ego polucheniya i ehlektroprovodyashchyaya kompoziciya: pat. 2390863 Ros. Federaciya: MPK51 H01C 7/00 H01B 1/00/ SHul'pekov A.M., CHuhlomina L.N., Maksimov YU.M.; zayavitel' i patentoobladatel' Tomskij nauchnyj centr Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. № 2009115231/09; zayavl. 21.04.2009; opubl. 27.05.2010, Byul. № 15. 8 s.

4. Ishkov A.V., Sagalakov A.M. EHlektroprovodnost' kompozitov s nestekhiometricheskimi soedine-niyami titana // Pis'ma v ZHTF, 2006. T. 32, vyp. 9. S. 18 – 22.

5. Kiparisov. S.S., Levinskij YU.V., Petrov A.P. Karbid titana: poluchenie, svojstva, primene-nie. M.: Metallurgiya, 1987. 215 s.

6. Koncepciya razvitiya SVS kak oblasti nauchno-tekhnicheskogo progressa. otv. red. A.G. Merzhanov.CHernogolovka, Territoriya, 2003. 204 s.

7. Kobyakov V.P., Zozulya V.D., Sichinava M.A., i dr. Gorenie poroshkovoj smesi Fe2O3–TiO2–Al–C v rezhime SVS i struktura obrazuyushchihsya produktov // Fizika goreniya i vzryva. 2005. T. 41, №4. S. 60 – 66.

8. CHapskaya A.YU., Radishevskaya N.I., Kasackij N.G., Lepakova O.K., Golobokov N.N., Najborodenko YU.S., Vereshchagin V.I. Vliyanie hromsoderzhashchih dobavok na strukturu pigmentov shpinel'nogo tipa // Steklo i keramika. 2007. № 3. S. 19 – 20.

9. Zinyuk R.YU., Balykov A.G., Gavrilenko I.B. i dr. IK-spektroskopiya v himicheskoj tekhnologii. L.: Himiya, 1983. 160 s.

10. Kiseleva T.YU., Novakova A.A., Grigor'eva T.F., Barinova A.P., Vorsina I.A. Mekhanosintez nanokompozitov korundovaya keramika/intermetallid // Perspektivnye materialy. 2008. №8. S. 11 – 19.

11. Barabanov V.F. Sovremennye fizicheskie metody v geohimii. L.: Izdatel'stvo LGU, 1990. 391 s.

12. Boldyrev A.I. Infrakrasnye spektry mineralov. M: Nedra, 1976. 200 s.

Shulpekov A.M., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.),
Lepakova O.K., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.),
Radishevskaya N.I., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.),
Tomsk Scientific Center of Siberian Branch of RAS

PHASE - AND STRUCTURAL FORMATION IN THE TIO_2-AL-C SYSTEM IN THE SHS PROCESS

Abstract: the aim of the work was to develop simpler and cheaper methods of obtaining materials based on titanium carbide, which are promising for use in high-temperature electric heaters.

For this purpose, a composite material based on titanium carbide and alumina with the use of titanium oxide, aluminum and soot as the starting components was obtained by self-propagating high-temperature synthesis. It has been established that the main stages of the synthesis process are the melting of the initial titanium and aluminum oxide, the reduction of titanium oxide by aluminum, the interaction of the reduction product of titanium oxide with carbon. The flow of a side reaction of reduction of titanium oxide by carbon can cause the formation of non-stoichiometric titanium carbide.

The additions of carbon, aluminum, titanium, manganese zirconium nickel and silicon to the phase composition, microstructure, electrical conductivity of the synthesis product, the degree of stoichiometry of titanium carbide were studied. Addition of carbon up to 10 wt. % increases the burning rate of the initial mixture, and the lattice parameter of the titanium carbide. The addition of carbon and manganese in excess of the stoichiometry allows a more complete flow of the process and allows improving the quality of the product due to a more complete removal of oxygen from the titanium carbide and increasing the specific conductivity of the resulting composite.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, titanium carbide, conductive ceramics.