

ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СИНТЕЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ И ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОНАПОЛЕННОГО МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА НА ЕГО ОСНОВЕ

Кокорина А.И., Пак А.Я.

Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет, Томск, Россия

aik48@tpu.ru

Одной из основных проблем развития электронных приборов является вопрос обеспечения эффективного отвода тепловой энергии от компонентов устройства. Высоконаполненный металломатричный композит (ММК) на основе алюминия и карбида кремния Al/SiC является подходящим материалом для изготовления радиаторов электронных устройств различного назначения: он относительно легко обрабатывается, обладает достаточной механической прочностью, сравнительно высокой теплопроводностью при низком коэффициенте теплового линейного расширения [1]. Наибольшее распространение получили ММК на основе алюминиевой матрицы, упрочненной SiC, вследствие их высокой прочности при относительно низкой стоимости. SiC обладает низкой плотностью (3.2 г/см^3), низким коэффициентом теплового расширения ($4.7 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$), высоким модулем Юнга (450 ГПа) и теплопроводностью в $80\text{-}200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [2-3].

В данной работе кубическая модификация карбида кремния SiC была получена безвакуумным электродуговым методом в самоорганизующейся атмосфере CO и CO₂ [4]. Синтез производится в плазме дугового разряда постоянного тока, инициированного в открытой воздушной среде, при этом активно генерируются газы CO и CO₂, которые экранируют реакционную зону от кислорода воздуха, предотвращая окисление продуктов синтеза. Основу лабораторной установки для реализации обозначенного метода составляет силовой источник постоянного тока с рабочим током до 200 А, к клеммам которого медным кабелем подключаются графитовые электроды. Анод выполнен в виде сплошного графитового цилиндра, катод – в форме графитового тигля, на дно которого помещается смесь углерода в виде порошка графита или углеродного волокна и микроразмерного порошка кремния. Между данной смесью на дне катода и анодом поджигается дуговой разряд, который поддерживается заданное время. В ходе горения дугового разряда в системе выделяется достаточное количество энергии для реализации синтеза карбида кремния, который в соответствии с известной диаграммой состояний «кремний – углерод» [5], в рассматриваемой системе формируется кубическая фаза карбида кремния. По данным рентгеновской дифрактометрии, содержание искомой кубической фазы карбида кремния SiC в продукте может составлять до 45% (масс), при этом основную массу продукта составляет графит и графитоподобные углеродные фазы. Экспериментально определены параметры, при которых единственной примесью в полученном продукте является графит, от которого можно очистить продукт отжигом в атмосферной печи при температуре 900 °С и добиться 99% (масс) содержания SiC. В результате обогащения и накопления продукта удалось получить несколько грамм зеленого карбида кремния с чистотой не ниже 99% (масс), который использовался для получения в дальнейшем высоконаполненного металломатричного композита ММК Al/SiC с различным содержанием карбида кремния и различными подходами к формованию объемного образца ММК. В данной работе ММК Al/SiC был синтезирован с применением трех подходов: искровое плазменное спекание (SPS), горячее прессование, метод литья [1,6-8] Все три метода наиболее популярны сегодня согласно проведенному обзору научной литературы [9].

Все полученные порошковые и объемные образцы анализировались методами рентгеновской дифрактометрии (Shimadzu XRD 7000s, CuK α – излучение, длина волны 1,54060 Å, графитовый монохроматор излучения), растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом (JEOL JSM 7500F).

В ходе анализа серии образцов, полученных методом SPS, было установлено, что типичный образец содержит кубическую фазу Al и кубическую фазу SiC с крайне малым содержанием различных примесей (доли процента). В результате анализа картины растровой электронной микроскопии было установлено, что средний размер частиц SiC составляет ~15 мкм. Частицы вкраплены в алюминиевую матрицу и неравномерно распределены в ее объеме. Частицы карбида кремния имеют типичную для данной фазы морфологию, описанную в различных работах, например в [10].

Согласно результатам измерения теплофизических характеристик образцов, теплопроводность образцов снижается с ростом доли карбида кремния. Это связано с неоднородностью структуры, наличием пор. На теплопроводность ММК Al/SiC влияет множество факторов: плотность материала, доля SiC, форма размеры SiC, наличие других примесей и другие факторы, поэтому выделить один конкретный фактор, определяющий свойства полученных образцов, а именно, теплопроводность, не представляется возможным. Тем не менее, с точки зрения практического использования полученных образцов, можно сказать, что полученные величины теплопроводности (порядка 100-200 Вт/(м·К)) вполне приемлемы, сравнимы с результатами, полученными различными исследовательскими коллективами в России и других странах.

В результате работы для апробации получаемых материалов в рабочих условиях изготовлен реальный теплоотводящий элемент для микросхемы драйвера шагового двигателя типа А4988, эксплуатируемого при нормальных условиях. Конечно, металломатричные композиты на основе алюминия и карбида кремния проявят свои положительные характеристики в лучшем виде в устройствах, эксплуатируемых в широком диапазоне температур, тем не менее, его испытания и при нормальных условиях представляются важным шагом дальнейшей работы.

Список литературы

1. Свойства и применение высоконаполненного металломатричного композиционного материала Al/SiC / Е.Н. Каблов [и др.] // Физика твердого тела.-2011.-№3 (1).-С.56-59.
2. Андриевский Р.А. Наноразмерный карбид кремния: синтез, структура и свойства // Успехи химии.-2009.-№ 78.-С. 889—900.
3. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials/ Wu R [et al.] // Progr. Mater.Sci.-2015.-№72.-С.1—110.
4. Пак А.Я. Влияние энергии на фазовый состав продукта безвакуумного электродугового синтеза кубического карбида кремния/Пак А.Я., Мамонтов Г.Я., Болотникова О.А// Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования.-2018.-Т. 19.№ 2.-С. 165—176
5. Kimoto T. Bulk and epitaxial growth of silicon carbide // Progress in Crystal Growth and
6. Characterization of Materials.-2016.-. Т.62. № 2.-С. 329—351.
7. Processing of Al/SiC composites in continuous solid-liquid co-existent state by SPS and their thermal properties / Kiyoshi Mizuuchi [et al.] // Composites: Part B.-2012.-№43.-С.2012-2019.
8. B. Ogel. Microstructural characterization and tensile properties of hot pressed Al-SiC composites prepared from pure Al and Cu powders/ B. Ogel, R. Gurbuz // Materials Science and Engineering.-2001.-№A301-C.213-220.
9. Gu Wan-li. Bulk Al/SiC nanocomposite prepared by ball milling and hot pressing method // Transaction of Nonferrous Metals Society of China.-2006.-№16.-С. 398-401.
10. Визуально-когнитивный анализ многомерных данных для характеристики металломатричных композитов Al/SiC/ Пак А.Я. [и др.] // Журнал «Светотехника».-2018.- №6.-С. 58-65.
11. Effects of the initial α -SiC content on the microstructure, mechanical properties, and permeability of macroporous silicon carbide ceramics/ Eom J.-H. [et al.] // Journal of the European Ceramic Society.-2012.-Т. 32. № 6.- P. 1283—1290.