

Таблица 1. Состав стекла, мас. %

SiO ₂	BaO	SrO	CaO	B ₂ O ₃	ZnO
34,5	33,4	16,6	10,4	3,1	2,0

Таблица 2. Свойства стекла

ТКЛР • 10 ⁷ К ⁻¹	Плотность, кг/м ³	T _g , °С	T _f , °С	T _c , °С	Поверх натя- жение, дин/см	Показ. прелом- ления	Е Мод. упруг, Н/м ²	Крист. способ- ность
104	3660	670	722	850	302	1,6	7,5-8	3 балла

цы представлены на рисунке 1. Синтезированные стекла исследованы с помощью специального оборудования.

Плотность стекла определяли гидростатическим взвешиванием; температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) – с помощью дилатометра DIL 402C NETZSCH; кристаллизационную способность стекла изучали градиентным способом в электропечи в интервале 500–900 °С.

Изменение фазового состава, температуры плавления и кристаллизации определяли термогравиметрическим методом на дифференциальном сканирующем дериватографе STA 449 F3 Jupiter. Физико-химические свойства стекла представлены в таблице 2.

Список литературы

1. Л. Ф. Папко, М. В. Дяденко, А. В. Кузьмин, Н. М. Поротникова *Высокотемпературные стеклогерметики для твердооксидных топливных элементов // Труды БГТУ, 2008. – Серия 2. – № 2. – С. 94–99.*
2. Gurbinder Kaur. *Solid Oxide Fuel components. Interfacial Compatibility of SOFC Glass Seals. Springer international Publishing Swizerland, 2016. – 408 p.*



Рис. 1. Образцы стекла после отлива в графитовую форму

Значения ТКЛР стеклогерметика для создаваемой системы должны лежать в интервале $(100–110) \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$. Стекло имеет характеристики, близкие к предъявляемым требованиям.

СИНТЕЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ Cu–WC ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А. Насырбаев

Научный руководитель – д.т.н., профессор ТПУ А. А. Сивков

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Томск, пр. Ленина, 30, am1@tpu.ru*

Благодаря своим выдающимся электро- и теплопроводности медь и ее сплавы массово применяются в ряде промышленных направлений таких, как изготовление электрических контактов и токопроводов, системы обеспечения теплового режима теплонагруженного оборудования и др. [1]. Однако низкая прочность и плохие механические свойства при повышен-

ных температурах ограничивают области применения изделий из меди. Одним из способов повышения механических характеристик без значительного снижения электро- и теплопроводности меди является использование добавок из сверхтвердых керамических частиц. Среди таких добавок выделяется карбид вольфрама,

который обладает высокими износостойкостью, твердостью и модулем упругости [2].

На сегодняшний день в процессах получения объемных композитов Cu–WC существует ряд проблем, к которым относится агломерация частиц карбида вольфрама в процессе перемешивания и спекания, что приводит к неравномерному распределению карбида в медной матрице и ухудшения конечных свойств. Для решения настоящей проблемы в работе показана возможность получения дисперсного композита Cu–WC с равномерно распределенными частицами карбида вольфрама плазмодинамическим методом.

Дисперсный композит Cu–WC был получен посредством прямого синтеза в гиперскоростной струе электроразрядной плазмы, генерируемой коаксиальным магнитоплазменным ускорителем (КМПУ) [3]. В качестве прекурсоров для синтеза использовалась смесь микронных порошков вольфрама и технического углерода ($C/W = 1,64$) и медь, нарабатываемая в процессе электроэрозии с медных электродов. Электропитание к КМПУ подводилось от емкостного накопителя энергии ($C = 7,2$ мФ, $U = 3$ кВ). Эксперименты производились при нормальных температуре и давлении в камере-реакторе, заполненной аргоном. Полученные дисперсные материалы без дополнительной обработки анализировались следующими методами: методом рентгеновской дифрактометрии (XRD) с использованием дифрактометра Shimadzu XRD 7000S (CuK α -излучение), методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) на микроскопе Hitachi TM 3000

По результатам XRD выявлено, что продукт синтеза состоит из кристаллической фазы меди

(Cu), кубического карбида вольфрама (WC_{1-x}), а также гексагональных фаз карбида вольфрама (WC и W_2C).

Сравнительный анализ гранулометрического состава, проведенный по совокупности SEM-микроснимков, свидетельствует, что продукты плазмодинамического синтеза имеют крайне неоднородное распределение частиц по размерам: в составе материалов присутствуют как крупные частицы, так и ультрадисперсная фракция. Большинство различных крупных частиц имеют сфероподобную форму, но также заметно присутствие бесформенных объектов преимущественно микронных размеров. Такое широкое распределение частиц по размерам в продукте плазмодинамического синтеза может положительным образом повлиять на плотность объемных композитов. Это связано с тем, что в высокоплотной керамике мелкодисперсные частицы заполняют свободное пространство между частицами крупной фракции, что приводит к снижению давления прессования и энергии процесса, а также в последующем выступают армирующей фракцией в составе объемного композита [4].

В результате исследования были синтезированы дисперсные композитные материалы Cu–WC. Рентгенофазовый анализ показал, что в дисперсном продукте помимо кристаллической меди содержатся кубическая и гексагональные фазы карбида вольфрама. Исследование микроструктуры показало широкое распределение частиц по размерам, что может положительно повлиять на характеристики объемных изделий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №21-73-10245, <https://rscf.ru/project/21-73-10245/>.

Список литературы

1. Dyachkova L., Feldshtein E. E. // *Composites Part B: Engineering*, 2013. – V. 45. – № 1. – P. 239–247.
2. Lee J. H. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*, 2019. – V. 786. – P. 1–10.
3. Сивков А. А., Пак А. Я., Патент Р. Ф. №2431947. H05H 11/00, F41B 6/00. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель. Оpubл. 20.10. 2011 // Бюл. – № 29.
4. Khasanov O. L. et al. // *Adv. Mater. Res. Trans Tech Publications Ltd.*, 2014. – V. 872. – P. 45–51.