

Полимерные композиты на базе стеклоткани с добавкой тонкой металлической проволоки могут служить для создания лёгких радионепрозрачных и радиопоглощающих оболочек, в противообледенительных системах, для молниезащиты самолётов и лопастей ветрогенераторов [5]. В ИММС НАН Беларуси ведутся испытания данного материала для изучения перспективности его применения в транспортном машиностроении, в особенности для создания демпфирующих и энергопоглощающих элементов автомобилей.

### Литература

1. Ильин, Д.А. Композитная арматура на основе стеклянных и углеродных волокон для бетонных конструкций. Дисс... к.т.н., М.: Национальный иссл. Московский гос. стр. ун-т, 2017. – 141 с.
2. Seo, D.-W. Experimental Investigation for Tensile Performance of GFRP-Steel Hybridized Rebar / D.-W. Seo, K.-T. Park, Y.-J. You, S.-Y. Lee // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2016. – 12 p.
3. Ashchepkau M.Yu., Shil'ko S.V., Drobysh T.V., Choe H. Tensile Fracture Specificity of Unidirectional Metal-Polymer Glass-Fiber Composites with Cord Wire // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2020. – № 3. – С. 55–62
4. Ларин, Ю.Т. Испытание оптического кабеля на стойкость к воздействию грызунов // *Фотон-экспресс*. – 2008. – №3(67). – С. 10-16.
5. Nicolais, L., Meo, M., Milella, E. *Composite Materials: A Vision for the Future* / Springer Nature. 2011. 221 p.

УДК 546.271

**Гудыма Т.С., Крутский Ю.Л., Баннов А.Г.**

(Новосибирский государственный технический университет)

**Вишневский К.В.**

(Белорусский государственный технологический университет)

### **МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИКИ В СИСТЕМАХ**

#### **$B_4C-ZrB_2$ , $B_4C-CrB_2$**

Компактные материалы на основе карбида бора могут быть перспективны для множества применений, например, для изготовления износостойких деталей, эксплуатируемых при высоких температурах. Однако, получение плотной керамики из данного соединения с повышенным значением трещиностойкости весьма затруднительно. Использование композиций  $B_4C-ZrB_2$ ,  $B_4C-CrB_2$  позволяет наряду с сохранением высоких эксплуатационных характеристик повысить

способность к спеканию порошковых материалов на основе карбида бора и увеличить значения трещиностойкости получаемой кеармики.

Дибориды хрома и циркония характеризуются тугоплавкостью, высокими значениями твердости, низкой плотностью, повышенной электропроводностью. Применение материалов на основе боридов переходных металлов и карбида бора весьма перспективно для ряда технических применений – абразивов, конструкционной, функциональной, инструментальной керамики для машиностроения, атомной энергетики. На данный момент активно ведутся исследования в области получения гетерофазных композиционных материалов на основе боросодержащих соединений [1]. Установлено, что добавление второй фазы диборида металла к карбиду бора позволяет исключить аномальный рост его зерен при спекании. Таким образом, можно обеспечить формирование мелкозернистой структуры, а также улучшить механические свойства получаемой керамики. Такая керамика, даже при изготовлении относительно крупногабаритных изделий, имеет значительную трещиностойкость и твердость, которая может превышать твердость алмаза при температурах выше 1000 °С. Имеются данные, что композиционные материалы, содержащие до 30 об. % боридов имеют более высокие механические характеристики. Сведения по получению керамических материалов в системах  $V_4C-CrB_2$ ,  $V_4C-CrB_2$  немногочисленны.

Для композита  $V_4C-CrB_2$  состав эвтектики соответствует 30 мол. %  $V_4C$ . Температура плавления такой композиции  $2150 \pm 30^\circ C$  [1]. В публикации [2] сообщается о получении компактных образцов  $V_4C-CrB_2$  из смеси порошков  $V_4C$  со средним размером частиц 0,43 мкм и  $CrB_2$  со средним размером частиц 3,5 мкм. Смешивание порошков проводилось в планетарной шаровой мельнице в среде метанола в течение 30 минут. Содержание  $CrB_2$  в полученной смеси находилось в диапазоне 5 - 25 мол. %. Смесь выдерживалась в течение 24 часов при температуре 115 °С. Компактирование осуществлялось методом горячего прессования. В качестве печного оборудования использовали печь сопротивления с углеродным нагревателем. Шихту нагревали в течение 1 часа при температуре 2050 °С под давлением 5 МПа в среде аргона. Аналогично были изготовлены образцы, содержащие только карбид бора. Фазовый состав оценивался на дифрактометре с  $CuK\alpha$  излучением. Авторы оценивали физико-механические свойства полученной керамики: прочность на изгиб, трещиностойкость, плотность. Также была изучена микроструктура. Анализ дифрактограмм показал наличие фаз  $V_4C$  и  $CrB_2$ . Также присутствовали следы карбида кремния. Наличие  $SiC$  объясняется использованием

мельющих тел из данного соединения. Обнаружено, что прочность на изгиб и трещиностойкость возрастают с увеличением содержания  $\text{CrB}_2$  в составе композита. Значения прочности на изгиб и трещиностойкости для керамики, полученной без использования диборида хрома составили 160 МПа и  $1,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  соответственно. Причиной невысоких значений данных механических характеристик может служить низкое приложенное давление (всего 5 МПа). При содержании 25 мол. %  $\text{CrB}_2$  прочность на изгиб и трещиностойкость материала составили 684 МПа и  $3,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  соответственно. Авторы считают, что увеличение прочности на изгиб связано с уплотнением, которое приводит к снижению числа и размеров пор, а значит и к уменьшению вероятности возникновения и распространения трещин. Причину уплотнения авторы видят в образовании жидкой фазы в процессе спекания. Температура процесса горячего прессования составляет  $2050 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это значение ниже температуры плавления эвтектики ( $\sim 2150 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Возможная причина появления жидкой фазы в данном случае – наличие примесей в реагентах или отклонение от стехиометрии карбида бора. Образцы, состоящие только из карбида бора и характеризующиеся аналогичным значением относительной плотности, имели трещиностойкость  $2,5\text{--}2,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ . В исследовании также отмечено, что наблюдается возрастание электропроводности образцов с увеличением содержания в них  $\text{CrB}_2$ . Объяснить это можно тем, что  $\text{CrB}_2$  в отличие от  $\text{V}_4\text{C}$  является металлоподобным тугоплавким соединением.

Для композита  $\text{V}_4\text{C-ZrB}_2$  состав эвтектики соответствует 75 мол. %  $\text{V}_4\text{C}$ . Температура плавления такого композита составляет  $2280 \pm 30 \text{ }^\circ\text{C}$  [1] В работе [3] для получения композиционной керамики в качестве реагентов использовали порошки  $\text{V}_4\text{C}$  ( $D_{90} = 6 \text{ мкм}$ ) и  $\text{ZrB}_2$  ( $D_{90} = 4 \text{ мкм}$ ). Содержание  $\text{ZrB}_2$  в смеси в одном случае составляло 3,7 масс. %, в другом 6,2 масс. %. Также были изготовлены образцы, содержащие только  $\text{V}_4\text{C}$ . Смешивание порошков проводили в среде этанола, затем полученную суспензию сушили в течение 16 часов при температуре  $90\text{--}110 \text{ }^\circ\text{C}$ . Компактирование осуществлялось методом горячего прессования при температуре  $2100\text{--}2140 \text{ }^\circ\text{C}$  с приложением давления 40 МПа. Для удаления термических напряжений и гомогенизации образцы были подвергнуты отжигу в вакууме (34 Па) при температуре  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Если сравнивать образцы, состоящие из одного только  $\text{V}_4\text{C}$  с образцами, в которых содержится 3,7 масс. %  $\text{ZrB}_2$ , то можно отметить, что размер частиц снижен с 5,0 до 4,5 мкм, а трещиностойкость возрастает с  $2,56$  до  $2,76 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Анализ литературных данных позволил сделать вывод, что керамика на основе тугоплавких бескислородных соединений в системах

$B_4C-ZrB_2$ ,  $B_4C-CrB_2$  является перспективным материалом. Сравнительно небольшие (до 20 масс. %) добавки  $ZrB_2$  и  $CrB_2$  к карбиду бора увеличивают эксплуатационные характеристики керамики. Таким образом, можно сделать вывод, что введение в карбид бора вторичной фазы диборидов циркония и хрома позволяет увеличить способность материала к спеканию и значительно улучшить механические свойства. Это значит, что исследование процессов получения керамики составов  $B_4C-MeB_2$  ( $Me = Zr, Cr$ ) является весьма актуальным.

В связи с этим планируется провести синтез порошковых материалов состава  $B_4C-MeB_2$ . Синтез будет проведен методом карбидоборного восстановления оксидов циркония и хрома с использованием нановолокнистого углерода в качестве источника углерода [4]. Нановолокнистый углерод обладает развитой удельной поверхностью на уровне  $150 \text{ м}^2/\text{г}$ . В качестве другого реагента будет выступать высокодисперсный карбид бора [5]. Планируется изучить влияние содержания вторичной фазы на механические свойства получаемой керамики. Предполагается, что использование нановолокнистого углерода и высокодисперсного карбида бора позволит снизить параметры процессов синтеза композиционных порошков и получить высокодисперсные порошки с высокой степенью гомогенности. Использование таких порошков будет способствовать получению керамики с высокими механическими характеристиками при сравнительно невысоких значениях давления прессования на уровне 30–35 МПа.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки (код FSUN-2020-0008).

#### Литература

1. Орданьян С.С. Физико-химический базис создания новой керамики с участием борсодержащих тугоплавких соединений и практика его реализации / С.С. Орданьян, В.И. Румянцев, Д.Д. Несмелов, Д.В. Кораблев // Новые огнеупоры. – 2012. – № 3. – С. 153–156.
2. Yamada S. Mechanical and electrical properties of  $B_4C-CrB_2$  ceramics fabricated by liquid phase sintering / S. Yamada, K. Hirao, Y. Yamauchi, S. Kanzaki // *Ceramics International*. – 2003. – V. 29. – P. 299–304.
3. Mestvirishvili Z. Thermal and mechanical properties of  $B_4C-ZrB_2$  ceramic composite / Z. Mestvirishvili, I. Bairamashvili, V. Kvatchadze, N. Rekhviashvili // *Journal of Material Science and Engineering B* 5. – 2015. – V. 9-10. – P. 385–393.
4. Kuvshinov G.G. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition / G.G. Kuvshinov,

Yu.L. Mogilnykh, D.G. Kuvshinov, D.Yu. Yermakov, M.A. Yermakova, A.N. Salanov, N.A. Rudina // Carbon. – 1999. – V. 37. – P. 1239–1246.

5. Крутский Ю.Л. Синтез высокодисперсного карбида бора из нановолокнистого углерода / Ю.Л. Крутский, А.Г. Баннов, В.В. Соколов, К.Д. Дюкова, В.В. Шинкарев, А.В. Ухина, Е.А. Максимовский, А.Ю. Пичугин, Е.А. Соловьев, Т.М. Крутская, Г.Г. Кувшинов // Российские Нанотехнологии. – 2013. – Т. 8. – № 3-4. – С. 22–27.

УДК 678.5

**Прокопчук Н.Р., Долинская Р.М.**

(Белорусский государственный технологический университет)

**Полоз А.Ю.**

(ООО «Новые технологии»)

**Эбич Ю.Р.**

(ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»)

### **ОЦЕНКА СОВМЕСТИМОСТИ ОСНОВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ**

Создание эпоксидных композиционных материалов с заданными эксплуатационными свойствами обеспечивается вследствие формирования химической сетки необходимой плотности с минимальным количеством дефектов. Для этого необходима совместимость эпоксидной матрицы с добавками (отвердителями, модификаторами, разбавителями), иначе возникают их локальные концентрации, что приводит к неоднородности трехмерной сетки и соответственно свойств материалов. Существующая технологическая практика изготовления композиционных материалов различного назначения на основе эпоксидных смол позволяет равномерно распределить целевые добавки в эпоксидной матрице. Однако возможность механического распределения целевых добавок в эпоксидной матрице еще не свидетельствует об их совместимости.

Для определения совместимости олигомеров между собой, с добавками целевого назначения используются оптическая и электронная микроскопия, фазовые диаграммы, обращенная газовая хроматография и др. При этом изготовление образцов, проведение испытаний требуют значительных затрат времени и главное – наличия соответствующего дорогостоящего оборудования. Как альтернатива А.А. Аскадским предложен расчетный метод определения совместимости