

3. Барнаульский зоопарк «Лесная сказка» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tourister.ru/world/europe/russia/city/barnaul/zoo> (дата обращения 11.02.2021)
4. Бриджуотер А. Ландшафтный дизайн: [лучшие идеи для планировки сада, виды садового дизайна, садовые проекты и конструкции, настилы, дорожки, ступеньки, газоны, бордюры, цветники, советы по выбору растений, стелющиеся кустарники, клумбы, растения в пруду] / Алан и Джилл Бриджуотер ; [пер. с англ.: П. Малышев]. – Харьков ; Белгород : Клуб семейного досуга, 2011. – 110 с.
5. Воронова О. В. Ландшафтный дизайн: шаг за шагом: авторские мастер-классы. – Москва : Эксмо, 2011. – 303 с.
6. Входная группа в парк [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stroj-innovatsii.ru/poleznoe/vhodnyie-gruppy/vkhodnaia-gruppy-v-park/> (дата обращения 11.02.2021)

Шэнь Юань (Китай), Ван Дакунь (Китай)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Дедова Елена Сергеевна, д.т.н., доцент

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ КЕРАМИКИ, СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ЭНТРОПИЕЙ**

### **Введение**

Материалы, стабилизированные конфигурационной энтропией смешения, имеющие длинную периодичность решетки, но неупорядоченность состава, привлекают большой научный и практический интерес вследствие уникальных свойств, в том числе высокая прочность, твердость, сверхпроводимость и т. д. 1. Первоначальные работы касались высокоэнтропийных металлических сплавов 2, но в 2015 году было показано, что та же концепция может быть применена к керамике 3. На сегодняшний момент класс керамик, стабилизированных энтропией, включает в себя оксиды, бориды, нитриды, карбиды и т.д. 4.

Карбиды тугоплавких металлов привлекают значительное внимание благодаря своим превосходным физическим, химическим и механическим свойствам. Различные твердые растворы карбидов тугоплавких металлов были получены с использованием различных технологических

процессов, в том числе горячее прессование и искровое плазменное спекание, с целью увеличения их плотности и свойств при комнатной температуре, при высоких и сверхвысоких температурах [5]. Однако на сегодняшний день остаются открытыми вопросы о структурно-фазовых изменениях, протекающих в процессе получения данных материалов. Целью настоящей работы является изучения микроструктурных изменений в керамической карбидной системе, протекающих в процессе высокотемпературной консолидации.

#### Материалы и методики

В качестве исходных компонент для получения керамических материалов (Zr,Hf,Nb,Ti)C использовали порошки карбидов гафния, ниобия, титана и циркония в эквимолярном соотношении компонентов. Приготовление порошковых смесей с их одновременной активацией производилось в планетарной мельнице-активаторе типа АГО в среде аргона в течение 3 минут. Образцы керамики были получены горячим прессованием порошковых смесей при температурах 1400-1900 оС с шагом 100 оС в атмосфере аргона. Микроскопические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе Vega Tescan. Оценка пористость образцов, средних размеров частиц порошков и пор осуществлялась методом случайных секущих по микрофотографиям.

Изучение микроструктуры керамических материалов, стабилизированных энтропией

На рисунке 1 приведены изображения исходных порошков и распределение частиц по размерам. Порошок карбида циркония был представлен частицами нерегулярной формы, средний размер которых составил  $0,95 \pm 0,04$  мкм, рис. 1 (а). Морфология порошка карбида гафния представлена частицами осколочной формы, средний размер которых был равен  $3,4 \pm 0,13$  мкм, рис. 1 (б). Средний размер частиц NbC составил  $1,3 \pm 0,03$  мкм, рис. 1 (в). Порошок карбида титана представлен полиэдрическими частицами, средний размер которых составил  $6,8 \pm 0,13$  мкм, рис. 1 (г). Распределение частиц по размерам исследуемых порошков носило унимодальный характер.

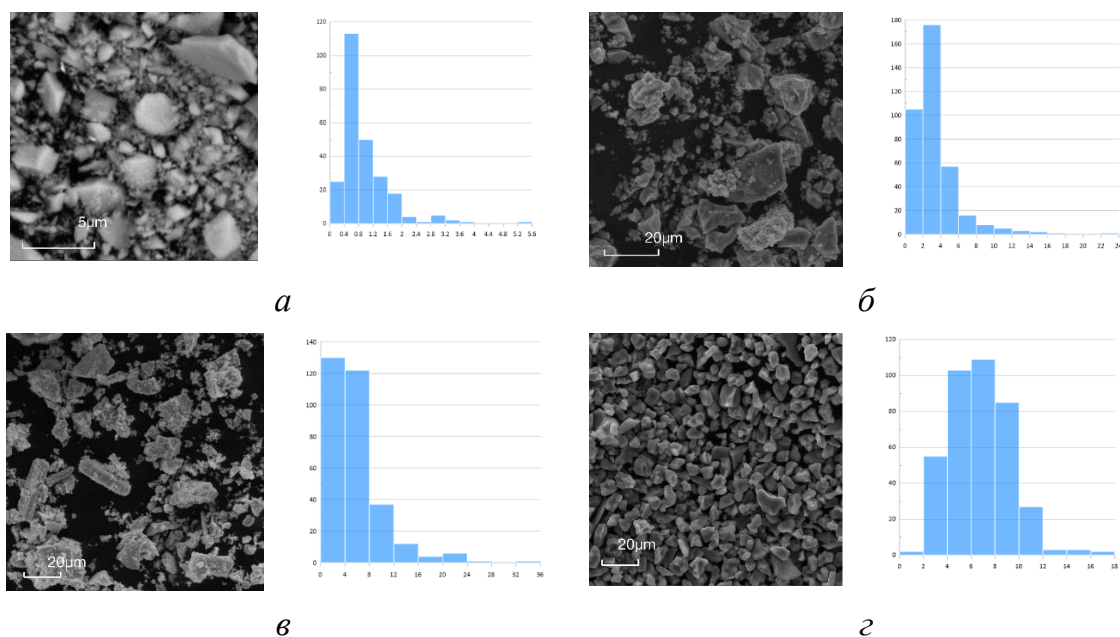


Рисунок 1. Изображения частиц порошков и распределение частиц по размерам

Результаты рентгеновского анализа показали, что однофазный керамический твердый раствор замещения  $(Zr, Hf, Nb, Ti)C$  с ГЦК решеткой по типу NaCl формируется при температуре горячего прессования 1700 оС из эквимольной порошковой смеси  $ZrC-HfC-NbC-TiC$ .

Увеличение температуры горячего прессования с 1400 до 1900 оС привело к изменению микроструктуры керамической системы  $ZrC-HfC-NbC-TiC$ , рисунок 2. Видно, что структура керамики, полученной при температуре 1400 °С неоднородна, на полированной поверхности материала хорошо различимы границы фаз, рис.2 (а). Дальнейшее повышение температуры спекания керамики привело к изменению ее микроструктуры. Так, структура керамических материалов, полученных при температуре 1700 °С, однородна, на поверхности присутствует случайная пористость, рисунок 2 (г).

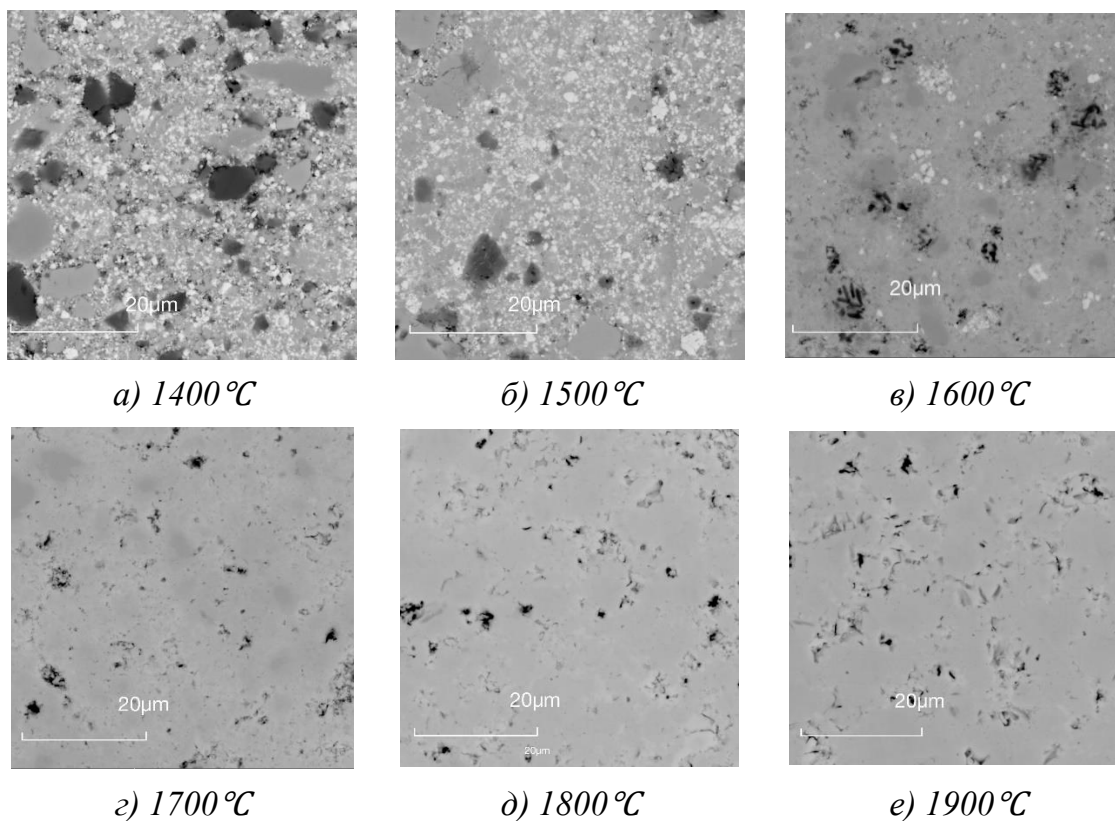


Рисунок 2. Микроструктура керамической системы  $ZrC-HfC-NbC-TiC$ , полученной при разных температурах горячего прессования ( $\times 5000$ )

На рисунке 3 приведена зависимость изменения пористости керамической системы  $ZrC-HfC-NbC-TiC$  от температуры спекания. Видно, что увеличение температуры горячего прессования привело к уменьшению пористости с 14 % до 8 % при повышении температуры спекания с 1400 до 1900 оС. При этом средний размер пор изменялся незначительно по мере роста температуры спекания, рисунок 4. Так, средний размер пор системы  $ZrC-HfC-NbC-TiC$ , полученной при 1400 °С, составлял  $0,9 \pm 0,02$  мкм. В то время, как средний размер пор  $ZrC-HfC-NbC-TiC$ , полученной при 1900 °С, был равен составляет  $1,2 \pm 0,04$  мкм.

Плотность исследуемых керамических образцов увеличивалась по мере роста температуры спекания, рисунок 5. Видно, что для состава  $ZrC-HfC-NbC-TiC$  наблюдалось ступенчатое изменение плотности материалов с увеличением температуры. Спекание до температуры 1500 оС не оказало влияние на уплотнение керамики,  $\rho = 7,2$  г/см<sup>3</sup>. Дальнейшее повышение температуры до 1900 оС привело к значительному уплотнению материалов,  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>.

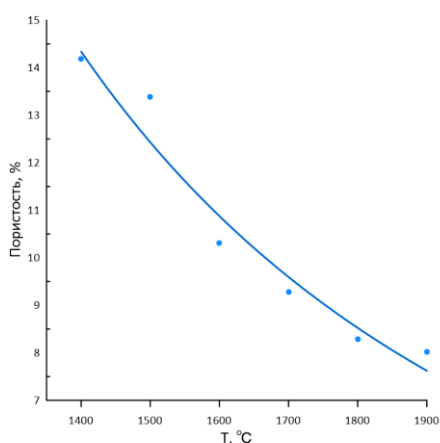


Рисунок 3. Зависимость изменения пористости керамической системы ZrC-HfC-NbC-TiC от температуры горячего прессования

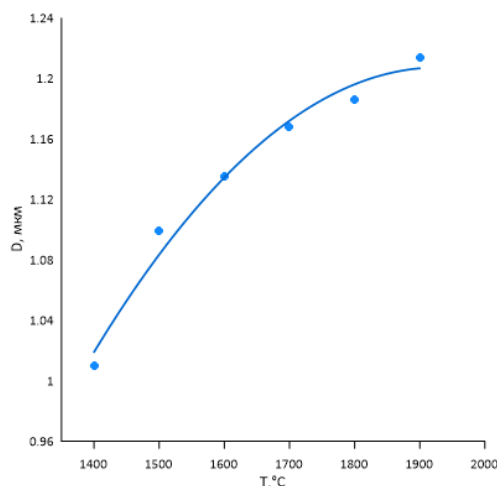


Рисунок 4. Зависимость изменения размера пор керамической системы ZrC-HfC-NbC-TiC от температуры горячего прессования

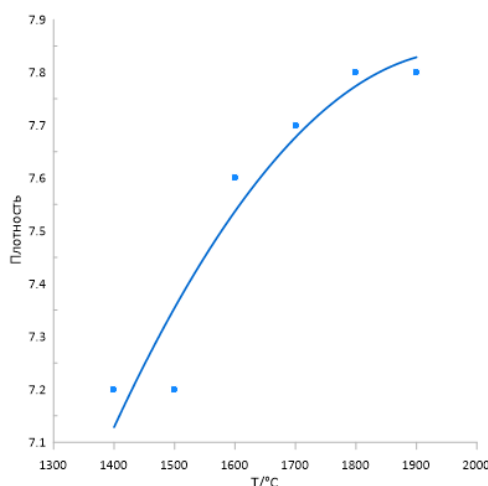


Рисунок 5. Зависимость изменения плотности керамической системы ZrC-HfC-NbC-TiC от температуры горячего прессования

### Заключение

В ходе выполнения работы изучена морфология исходных порошков карбидов переходных металлов и проведена оценка их среднего размера частиц. Установлено, что увеличение температуры горячего прессования приводит к изменению микроструктуры керамической системы ZrC-HfC-NbC-TiC. Показано, что повышение температуры спекания с 1400 до 1900 оС приводит к уменьшению пористости керамики с 14 до 8 %, при этом средний размер пор изменяется незначительно. Установлено, что однофазный керамический твердый раствор замеще-

ния (Zr,Hf,Nb,Ti)C с ГЦК решеткой по типу NaCl формируется при температуре горячего прессования 1700 оС из эквимольной порошковой смеси ZrC-HfC-NbC-TiC.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, номер проекта FWRW-2021-0009

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cantor B. et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys //Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Т. 375. – С. 213-218.
2. Yeh J. W. et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes //Advanced Engineering Materials. – 2004. – Т. 6. – №. 5. – С. 299-303. Tsai M. H., Yeh J. W. High-entropy alloys: a critical review //Materials Research Letters. – 2014. – Т. 2. – №. 3. – С. 107-123.
3. Zhang R. Z., Reece M. J. Review of high entropy ceramics: design, synthesis, structure and properties //Journal of Materials Chemistry A. – 2019. – Т. 7. – №. 39. – С. 22148-22162.
4. Oses C., Toher C., Curtarolo S. High-entropy ceramics //Nature Reviews Materials. – 2020. – Т. 5. – №. 4. – С. 295-309
5. Zhang R. Z., Reece M. J. Review of high entropy ceramics: design, synthesis, structure and properties //Journal of Materials Chemistry A. – 2019. – Т. 7. – №. 39. – С. 22148-22162.

Ю Цзяньюй (Китай), Ци Мэнсюй (Китай), Чжао Цзялунь (Китай),  
Козлов Виктор Николаевич

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Козлов Виктор Николаевич, к.т.н., доцент

#### **ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЦЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ**

Концевые фрезы широко используются в машиностроении на вертикально-фрезерных станках для обработки уступов, пазов и плоскостей небольшой ширины.