

## Влияние углеродных материалов на структуру и фазовый состав композиционной керамики на основе многокомпонентной системы Hf–Ti–B–C–N\*

Н.С. Евсеев<sup>1</sup>, А.П. Хрусталева<sup>1</sup>, И.А. Бельчиков<sup>1</sup>, М.Г. Хмелева<sup>1</sup>, И.А. Жуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Рассмотрено влияние углерода на композиционную керамику на основе многокомпонентной системы Hf–Ti–B–C–N. Процесс получения композиционного материала основан на высокотемпературных экзотермических реакциях. При этом элементы Ti и Hf подвергаются вакуумному спеканию для образования твердого раствора (Ti, Hf) и используются в качестве исходных компонентов смеси Hf–Ti–B–C. В качестве углерода в работе используются отходы химического производства (сажа) и графит. Исследованы структура и фазовый состав композиционной керамики на основе системы Hf–Ti–B–C–N в зависимости от аллотропных модификаций углерода (сажа, графит). Представленные результаты демонстрируют принципиальную возможность получения методами порошковой металлургии композиционной керамики (Hf,Ti)CN–(TiB<sub>2</sub>/TiC–TiB<sub>2</sub>). Показано, что применение термически сопряженного синтеза и графита в качестве источника углерода способствует образованию фазы TiC в композиционной структуре.

**Ключевые слова:** композиционная керамика, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, структура, фазовый состав, карбонитрид гафния, диборид титана, карбид титана.

### Введение

В последние годы высокоэнтروпийные материалы (ВЭМ) привлекают значительное внимание научного сообщества благодаря их уникальным механическим, термическим и функциональным свойствам, обусловленным высокой энтропией смешения [1]. Если изначально исследования были сосредоточены на высокоэнтропийных сплавах (ВЭС) [2], то в последнее десятилетие активно развивается направление высокоэнтропийной керамики (ВЭК), включающей оксидные [3], нитридные, боридные [4] и карбидные [5] соединения, а также их более сложные вариации (оксинитриды, карбонитриды и др.) [6–9].

На сегодняшний день тугоплавкие высокоэнтропийные сплавы и керамики рассматриваются как новый вид жаропрочных материалов с большими перспективами применения благодаря своим превосходным механическим свойствам. Такие сплавы обладают потенциалом для их использования в качестве жаропрочных материалов нового поколения взамен материалов на основе никеля. Использование тугоплавких многокомпонентных сплавов и керамик может способствовать улучшению функциональных характеристик ракетно-космических летательных аппаратов, увеличению коэффициента полезного действия авиационных двигателей, нефтедобывающих газотурбинных установок и транспортной техники. Приобретение новых фундаментальных знаний о процессах синтеза и физико-химических закономерностях формирования структуры и свойств керамики на основе тугоплавких высокоэнтропийных систем позволят получать материалы с необходимым набором функциональных характеристик (высокая жаропрочность, износостойкость, коррозионная стойкость и др.).

Особый интерес представляет керамика на основе переходных металлов (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta), обладающая высокой твердостью, термической стабильностью и стойкостью к окислению. В частности, нитриды (например, (Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)N), карбиды ((Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)C) и бориды ((Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub>) демонстрируют потенциал для применения в защитных покрытиях, инструментальных материалах и термоядерных технологиях [10]. Обзор современных научных работ, посвященных получению высокоэнтропийных материалов, показал возрастающий интерес исследователей к керамическим материалам на основе элементов Ti и Hf [7, 8, 11–13]. Так, в работе [8] были получены керамики (Ti,Hf)(C,N) с различным содержанием гафния методом карбо-термического восстановления-нитридации и последующего электроискрового плазменного спекания и установлено, что добавление гафния улучшает коррозионную стойкость керамики (Ti,Hf)(C,N) в растворе NaOH.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00664, <https://rscf.ru/project/25-29-00664/>.