



МИНОБРНАУКИ РФ
Национальный исследовательский
Томский государственный университет
НИИ прикладной математики и механики
Томского государственного университета
Физико-технический факультет



**Материалы XI Всероссийской научной конференции
с международным участием
«Актуальные проблемы современной механики сплошных сред
и небесной механики – 2021»**

г. Томск, 17–21 ноября 2021 г.

**Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference with international
participation «Current issues of continuum mechanics and celestial
mechanics – 2021», November, 17–21, 2021**

Томск-2022

УДК 539.3.004
ББК 22.25; 22.251.22.62
М43

Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием М43 «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» 17–21 ноября 2021 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск. 2022. – 414 с.

ISBN 978-5-6047451-2-0

Представлены материалы конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», прошедшей 17–21 ноября 2021 г.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

УДК 539.3.004
ББК 22.25; 22.251.22.62

ISBN 978-5-6047451-2-0

© Томский государственный университет, 2022

Editor
Maxim Yu. Orlov
National Research Tomsk State University
Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics
36 Lenin prospect
Tomsk, 634050
Tomsk Region
Russian Federation

E-mail: orloff_m@mail.ru

To learn more about the Conference Proceeding, please visit the webpage:
www.cimcm.tsu.ru

Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference with international participation «Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2021», November, 17–21, 2021



EDITOR
Maxim Yu. Orlov
National Research Tomsk State
University
Research Institute of Applied
Mathematics and Mechanics of Tomsk
State University
Tomsk, Russia

Sponsoring organizations

The Ministry of Education and Science Russia
Russian Fund of Basic Research
National Research Tomsk State University

© Tomsk State University
Printed in the Russian Federation

Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference with international participation «Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2021», November, 17–21, 2021. The conference proceedings / ed. M.Yu. Orlov. – Tomsk. 2022. – 414 p.

ISBN 978-5-6047451-2-0

For scientific worker, the teachers, graduate student and students.

© Tomsk State University, 2022

References

1. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlov Yu.N. Results of the research work of the strength laboratory // All-Russian Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics", Proceedings / Ed. M.Yu. Orlov. Tomsk: Izdatelstvo "Krasnoznamya", 2020. P. 25–28.
2. Gerasimov A.V. Studies of high-speed interaction of bodies (TSU Publishing, Tomsk, 2007. 572 p.).
3. Bogorodsky V.V. and Gavrilov V.P. 1980 Led. Fizicheskaya Svoystva Sovremennyye Metody Gilyatsiologii (Leningrad: Gidrometeoizdat Press), 1980. 383 p.
4. Holmquist T., Johnson G. JAM 78 051003-1 (2011).
5. Wilkins M.L. Mechanics of penetration and perforation // Impact Engineering, vol. 16, 1978, P. 793–807.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ Hf-Ti-C-N-B, ПОЛУЧЕННОЙ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Н.С. Евсеев^{1,2}, П.Ю. Никитин², А.Е. Матвеев²

¹Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: evseevns@gmail.com

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, карбонитрид гафния, керамика, диборид титана.

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований горения порошковой смеси Hf-Ti-C-B в среде азота в реакторе при давлении 3.5 МПа. Изучена структура и состав продуктов горения. Химический и элементный состав изучен с использованием рентгенофазового и энерго-дисперсионного анализа. Рентгенофазовый анализ показал наличие в продуктах горения фаз TiB₂ и HfTiCN. В работе показана принципиальная возможность получения методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза керамики на основе системы Hf-Ti-C-N-B.

STUDY OF THE HF-TI-C-N-B SYSTEM OBTAINED IN COMBUSTION MODE

N. Evseev^{1,2}, P. Nikitin², A. Matveev²

¹Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

²National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: evseevns@gmail.com

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, hafnium carbonitride, ceramics, titanium diboride.

Abstract. The results of experimental studies of the combustion of the Hf-Ti-C-B powder mixture in a nitrogen atmosphere in a reactor at a pressure of 3.5 MPa are presented. The structure and composition of combustion products has been studied. The chemical and elemental composition was studied using X-ray phase and energy-dispersive analysis. X-ray phase analysis showed the presence of TiB₂ and HfTiCN phases in the combustion products. The paper shows the fundamental possibility of obtaining ceramics based on the Hf-Ti-C-N-B system by the method of self-propagating high-temperature synthesis.

Развитие современных технологий невозможно без создания новых материалов с уникальными свойствами. В настоящее время в мировой промышленности при создании материалов, эксплуатируемых в экстремальных условиях, широко применяется многокомпонентное легирование [1]. В настоящее время, объектом, представляющим особый интерес для исследователей всего мира, являются физико-механические свойства высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). Обзор современных публикаций, затрагивающих экспериментальные и теоретические исследования ВЭС, показывает наличие у них уникальных физико-механических свойств, позволяющих расширить области применения современных металлических материалов. Правильный выбор элементов в таких сплавах позволяет сформировать структуру с необходимыми функциональными характеристиками, например, высокая жаропрочность, и коррозионная стойкость [2]. Высокоэнтропийные сплавы на основе переходных тугоплавких металлов, таких как Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W представляют особый интерес для исследователей. На сегодняшний день полный спектр высокоэнтропийных сплавов и их свойства не исследованы. Одной из отраслей, для которой получение жаропрочных материалов и огнеупорных покрытий представляет одну из ключевых задач, является аэрокосмическая отрасль. Для развития данной отрасли, материалы должны соответствовать ряду требований, одним из которых является стойкость к воздействию высоких температур. Сплавы на основе соединения Hf обладают высокой температурой плавления. В частности, карбонитрид гафния (Hf-C-N) обладает температурой плавления более 4200°C [3]. В 2015 году в результате проведенных теоретических исследований (США), установлено, что материал на основе гафния, углерода и азота (Hf-C-N) будет иметь температуру плавления более 4200°C. В 2019 году коллективом российских учёных (МИСИС) получена разновидность карбонитрида гафния с химической формулой $\text{HfC}_{0.5}\text{N}_{0.35}$ [4].

Одним из перспективных и высокоэффективных методов получения нитридов, карбидов, боридов является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [5]. В настоящей работе получение керамики в режиме горения в условиях естественной фильтрации проводился при помощи метода СВС в реакторе высокого давления.

Объектом исследования настоящей работы является фильтрационное горение системы Hf-Ti-C-N-B, а также структура и свойства продуктов, полученных в результате фильтрационного горения.

Материалы и методика эксперимента. В качестве исходных компонентов смеси были выбраны порошки гафния (дисперсность < 300 мкм, чистота > 99%), титана (дисперсность < 280 мкм, чистота > 99%), бора (дисперсность < 0,6 мкм, чистота > 99%) и углерода (дисперсность < 0,8 мкм, чистота > 99%). Горение исследуемой порошковой смеси осуществлялось в среде азота. В работе использован азот особой чистоты (ГОСТ 9293-74, 99.99 %).

Исходные компоненты смешивались в соотношении (масс%): 32 Ti+8 C+26.7 Hf+3.3 B. Из полученной смеси, путем холодного одноосного прессования, готовились образцы диаметром 23 мм. Далее полученные образцы помещались в реактор постоянного давления объёмом 3 л. Для осуществления азотирования исходных образцов в процессе СВ-синтеза, емкость реактора заполнялась газообразным азотом до давления 3.5 МПа. Инициирование реакции синтеза осуществлялось путем нагрева верхней поверхности образца молибденовой спиралью. Для измерения температуры горения в образцы вводились вольфрам-рениевые термопары WR5/20. Рентгеноструктурный анализ полученных продуктов синтеза проводился на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 с $\text{CuK}\alpha$ -излучением. Идентификация фаз определялась с использованием базы данных Powder Diffraction File (PDF 4). Микроструктура полученных продуктов синтеза определялась с помощью микроскопа QUANTA 200 3D с энергодисперсионной спектроскопией (EDX).

Результаты. На рис. 1, *a* представлена термограмма СВ-синтеза в образцах системы Hf-Ti-C-N-B.

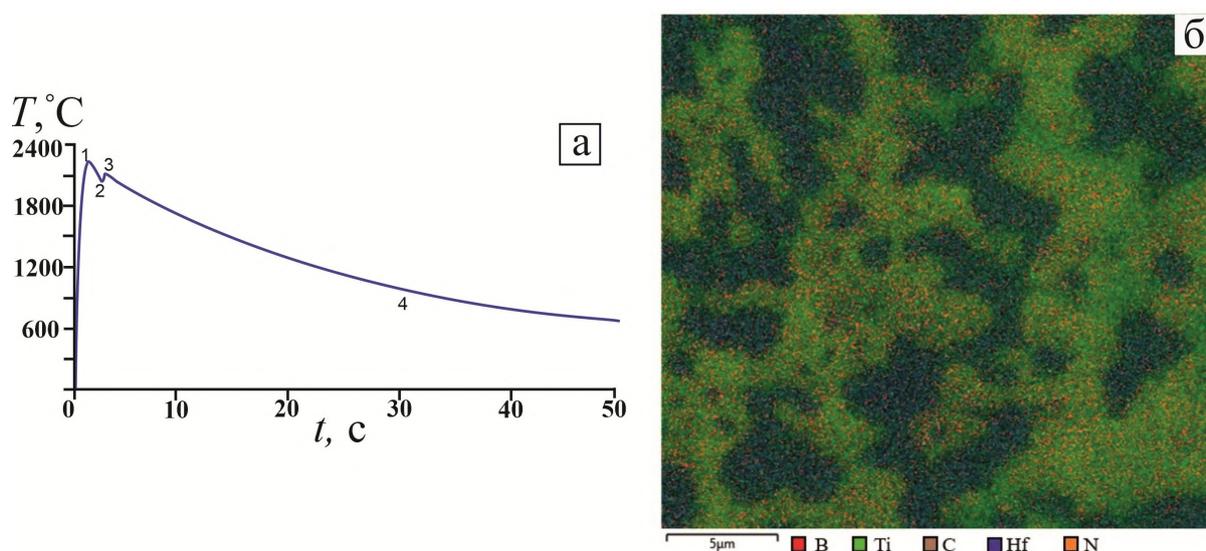


Рис. 1:

a – температурный профиль, полученный при горении образца системы Hf-Ti-C-N-B; *b* – многослойное изображение ЭДС продуктов синтеза

Пик на термограмме (область 1) характеризует протекание экзотермической реакции исходных компонентов системы Hf-Ti-C-N-B с выделением большого количества тепла. Вершина пика соответствует максимальной температуре синтеза, которая равна $\sim 2250^\circ\text{C}$. Далее наблюдалось снижение температуры до $\sim 2040^\circ\text{C}$ (область 2), после которого на термограмме образуется новый пик (область 3). Вершина этого пика соответствует температуре второй экзотермической реакции, которая равна $\sim 2100^\circ\text{C}$. Предположительно, тепло, выделяемое от первой реакции, затрачивается на прогрев компонентов и осуществление эндотермических процессов их плавления.

ления и растворения, после которых происходит еще одна экзотермическая реакция с образованием нового соединения. Область 4 характеризует завершение процессов синтеза и остывание продуктов реакции.

На рис. 1, б представлено ЭДС изображение структуры продуктов горения. Согласно результатам рентгенофазового анализа в полученных продуктах горения были обнаружены фазы HfTiCN и TiB_2 .

Таким образом, в настоящей работе показана принципиальная возможность получения методом СВС керамики на основе системы Hf-Ti-C-N-B . В работе предлагается добавление в систему Hf-C-N двух компонентов: титана и бора, которые, предположительно, будут способствовать жаропрочным свойствам сплава в воздушной среде и других окислительных средах, а также способствовать достижению высокой твердости. Разработка и исследование такой керамики, изучение ее свойств является перспективной и актуальной задачей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК- 3236.2021.4.

Литература

1. Санин В.Н., Юхвид В.И., Икорников Д.М., Андреев Д.Е., Борщ В.Н., Ковалев Д.Ю., Сачкова Н.В. СВС литых высокоэнтропийных сплавов. Новый подход к формированию металлических материалов // Труды ежегодной научной конференции ИСМАН. 2016. С. 68–73.
2. Takeuchi A., Amiya K., Wada T., Yubuta K. Alloy design for high-entropy alloys based on Pettifor map for binary compounds with 1:1 stoichiometry. 2015 // *Intermetallics*. Vol. 66, p. 56–66.
3. Buinevich V.S., Nepapushev A.A., Moskovskikh D.O., Trusov G.V., Kuskov K.V., Mukasyan A.S. Mechanochemical synthesis and spark plasma sintering of hafnium carbonitride ceramics // *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32. Is. 2, p. 385–389, <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.12.018>.
4. Buinevich V.S., Nepapushev A.A., Moskovskikh D.O., Trusov G.V. and others. Fabrication of ultra-high-temperature nonstoichiometric hafnium carbonitride via combustion synthesis and spark plasma sintering. 2020. *Ceramics International*. Vol. 46. Is. 10, Part B, p. 16068–16073.
5. Matveev A. et al. Planetary milling and self-propagating high-temperature synthesis of Al-TiB₂ composites // *Materials*. 2020. T. 13. №. 5. С. 1050.

References

1. Sanin V.N., Yuhvid V.I., Ikornikov D.M., Andreev D.E., Borshch V.N., Kovalev D.Yu., Sachkova N.V. SHS of cast high-entropy alloys. A new approach to the formation of metallic materials the collection: Proceedings of the annual scientific conference ISMAN. 2016. P. 68–73.
2. Takeuchi A., Amiya K., Wada T., Yubuta K. Alloy design for high-entropy alloys based on Pettifor map for binary compounds with 1:1 stoichiometry. 2015 // *Intermetallics*. Vol. 66, p. 56–66.
3. Buinevich V.S., Nepapushev A.A., Moskovskikh D.O., Trusov G.V., Kuskov K.V., Mukasyan A.S. Mechanochemical synthesis and spark plasma sintering of hafnium carbonitride ceramics // *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32. Is. 2, p. 385–389, <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.12.018>.
4. Buinevich V.S., Nepapushev A.A., Moskovskikh D.O., Trusov G.V. and others. Fabrication of ultra-high-temperature nonstoichiometric hafnium carbonitride via combustion synthesis and spark plasma sintering. 2020. *Ceramics International*. Vol. 46. Is. 10. Part B, p. 16068–16073.
5. Matveev A. et al. Planetary milling and self-propagating high-temperature synthesis of Al-TiB₂ composites // *Materials*. 2020. T. 13, №. 5. P. 1050.