

Научная статья

УДК 539.3+620.178.1

doi: 10.17223/19988621/90/8

Исследование физико-механических свойств горячепрессованных композиционных керамик системы Hf-Ti-Cr-Fe-V-N

Николай Сергеевич Евсеев¹, Илья Александрович Жуков²,
Рауль Мубараков³, Иван Алексеевич Бельчиков⁴

^{1, 2, 3, 4} Томский государственный университет, Томск, Россия

^{1, 2} Институт проблем химико-энергетических технологий

Сибирского отделения РАН, Бийск, Россия

¹ evseevns@gmail.com

² gofra930@gmail.com

³ raul.mub@mail.ru

⁴ ivan70422@gmail.com

Аннотация. Рассмотрено влияние температурного режима процесса горячего прессования на структуру и свойства керамических образцов системы Hf-Ti-Cr-Fe-V-N . Высокоэнтропийные керамические материалы получены в режиме высокотемпературных экзотермических реакций с предварительной механической активацией порошковой смеси в планетарной мельнице. Получение компактных керамических образцов осуществлялось при помощи метода горячего прессования в диапазоне 1 300–1 450°C. Проведен рентгеноструктурный анализ полученной керамики и определены зависимости структуры, плотности и твердости образцов, спрессованных в различных температурных условиях. Максимальное значение твердости составило 1 858 ± 50 HV при температуре прессования 1 450°C.

Ключевые слова: керамика, твердость, горячее прессование, структура, плотность

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00144.

Для цитирования: Евсеев Н.С., Жуков И.А., Мубараков Р.Г., Бельчиков И.А. Исследование физико-механических свойств горячепрессованных композиционных керамик системы Hf-Ti-Cr-Fe-V-N // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 90. С. 90–102. doi: 10.17223/19988621/90/8

Original article

A study of the physical and mechanical properties of hot-pressed composite ceramics of the Hf–Ti–Cr–Fe–V–N system

Nikolay S. Evseev¹, Il'ya A. Zhukov²,
Raul' Mubarakov³, Ivan A. Bel'chikov⁴

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

^{1, 2} Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russian Federation

¹ evseevns@gmail.com

² gofra930@gmail.com

³ raul.mub@mail.ru

⁴ ivan70422@gmail.com

Abstract. The concept of synthesizing multicomponent (five or more components) systems in equiatomic or near-equiatomic percentages has opened a new class of materials, including high-entropy alloys (HEAs) and high-entropy ceramics (HEC). The composition of each element varies from 5 to 35 at.%. It is generally accepted that the exceptional performance of high-entropy materials is achieved through four “basic effects”: the high-entropy effect, the lattice distortion effect, the slow diffusion effect, and the “cocktail” effect. The properties of multicomponent systems are determined not only by the constituent elements, but also by the formation of phases. Thus, depending on the composition and methods of preparation and processing of the alloy, the ordered and disordered phases of the solid solution are formed in the HEAs. Both the atoms of individual elements and the resulting phases contribute to the properties of HEAs. They possess valuable properties such as high corrosion resistance, wear resistance, hardness, and other particular mechanical properties. This class of materials is under active scientific study, and the methods for their production, such as vacuum arc melting, selective laser melting, magnetron sputtering, are being developed. One of the promising and highly efficient methods for producing HEAs and HECs is self-propagating high-temperature synthesis (SHS). The main advantages of this method are high productivity, low energy consumption, environmental safety, regulation of the structure and properties of the final products, and synthesis mode control due to the possibility of selecting various combustion temperature and pressure values. This study examines the effect of the temperature regime of the hot-pressing process on the structure and properties of ceramic samples of the Hf–Ti–Cr–Fe–V–N system. HEC materials are obtained as a result of high-temperature exothermic reactions with preliminary mechanical activation of the powder mixture in a planetary mill. The preparation of compact ceramic samples is carried out using the hot-pressing method in the temperature range of 1300–1450 °C. The X-ray diffraction analysis of the resulting samples allows one to determine the dependence of the structure, density, and hardness on the pressing temperature. The maximum hardness (1858±50 HV) is obtained at a pressing temperature of 1450 °C.

Keywords: ceramics, hardness, hot pressing, structure, density

Acknowledgments: This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-79-00144).

For citation: Evseev, N.S., Zhukov, I.A., Mubarakov, R., Bel'chikov, I.A. (2024) A study of the physical and mechanical properties of hot-pressed composite ceramics of the Hf–Ti–Cr–Fe–V–N system. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*.

Введение

Концепция синтеза многокомпонентных систем (от пяти и выше) в эквиатомном или околоэквиатомном процентном содержании открыла новый класс материалов: высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС) [1, 2] и высокоэнтропийной керамики (ВЭК) [3]. Состав каждого элемента варьирует от 5 до 35 ат. %. Принято считать, что исключительные характеристики высокоэнтропийных материалов достигаются за счет четырех «основных эффектов» [4]: эффекта высокой энтропии, эффекта искажения решетки, эффекта медленной диффузии и эффекта «коктейля». Следует отметить, что свойства многокомпонентных систем обусловлены не только составляющими элементами, но и образованием фаз. Так, в зависимости от состава, способа получения и обработки сплава в ВЭС образуются упорядоченные и неупорядоченные фазы твердого раствора. Как атомы отдельных элементов, так и образующиеся фазы вносят свой вклад в свойства ВЭС [5].

Высокоэнтропийные сплавы и керамики обладают такими многообещающими свойствами, как высокая коррозионная стойкость [6], высокая износостойкость [7], высокие значения твердости [8] и другие специальные механические свойства [9].

К настоящему моменту ВЭС- и ВЭК-системы на основе тугоплавких металлов (Nb, Mo, Hf, Ta, W) изучены мало, однако интерес к таким сплавам и керамикам, в составе которых присутствуют элементы Hf–Ti, проявляется все чаще. Так, в работе [10] показана принципиальная возможность получения высокоэнтропийного керамического композита (HfTiCN)–TiB₂ методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. При этом *Ab initio* вычисления показали существование стабильного высокоэнтропийного соединения HfTiCN. В работе [11] детально исследован сплав TiZrHfVNb методом термодинамического моделирования с помощью программного обеспечения TERRA. Смоделированы температурные зависимости содержания компонентов твердого раствора и термодинамических характеристик системы. В работе [12] рассмотрены высокоэнтропийные керамические составы RE₂(Ce_{0,2}Zr_{0,2}Hf_{0,2}Sn_{0,2}Ti_{0,2})₂O₇ (RE₂HE₂O₇, RE = Y, Ho, Er, Yb), способные выступать в качестве новых термобарьерных покрытий с высокими коэффициентами теплового расширения, низкой теплопроводностью и высокой твердостью по Виккерсу (15 ГПа).

Значительная часть публикаций, затрагивающих вопросы получения, структуры и свойств высокоэнтропийной керамики, посвящена составам, включающим в себя карбиды, бориды и оксиды [13–16], при этом отмечается значительно меньшее количество сообщений о получении / структуре / свойствах ВЭК на основе нитридов. Одновременно с этим наблюдается интерес различных исследовательских групп к ВЭК (и покрытиям из ВЭК) на основе нитридов и карбонитридов [17–18], композиционных высокоэнтропийных нитридных керамических покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками [19].

Цель работы – изучить влияние температурного режима процесса горячего прессования на структуру, плотность и твердость композиционной нитридной керамики системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N.

Материалы и методика эксперимента

В настоящей работе в качестве исходных порошковых компонентов использовались порошки Hf, Ti, Cr, FeV (характеристики которых отражены в табл. 1), а также газообразный азот (чистота 99.99%) и аргон (чистота 99.99%).

Таблица 1

Характеристики исходных порошковых компонентов

Исходные порошки	Дисперсность, мкм	Чистота, мас. %
Hf	≤ 50	≥ 99
FeV ₅₀	≤ 50	≥ 98
Ti	≤ 50	≥ 99
Cr	≤ 50	$\geq 99\%$

В исследовании [20] установлено, что оптимальное время механической активации порошковой смеси Hf–Ti–Cr–Fe–V в планетарной мельнице составляет порядка 120 мин. В настоящей работе были использованы высокоэнтропийные керамические материалы системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N, полученные в режиме высокотемпературных экзотермических реакций с предварительным активированием исходной смеси в планетарной мельнице в течение 120 мин [21].

Процесс получения высокоэнтропийного керамического материала с последующей его консолидацией представлен на рис. 1.

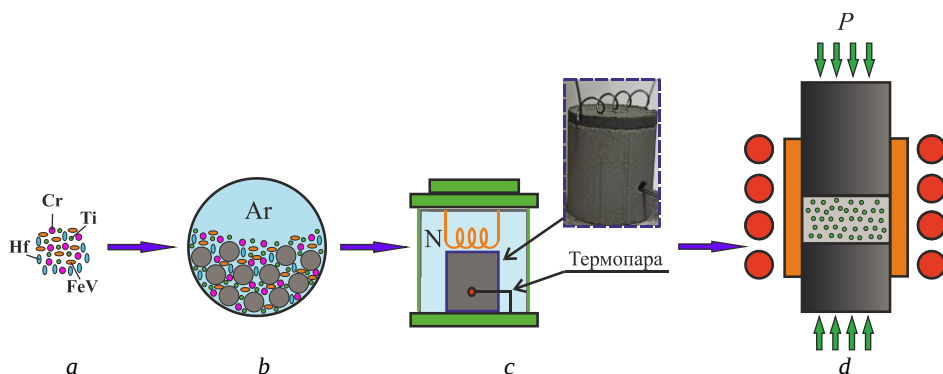


Рис. 1. Стадии получения керамических материалов системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N

Fig. 1. Stages of obtaining ceramic materials of the Hf–Ti–Cr–Fe–V–N system

Исходная порошковая смесь Hf–Ti–Cr–Fe–V (см. рис. 1, а) в эквимольном соотношении помещалась в барабан планетарной мельницы с соотношением масс мелющих металлических шаров и порошковой смеси 4:1. Далее проводилась механическая активация смеси при частоте вращения 14 Гц в среде аргона (см. рис. 1, b) в течение 120 мин. Получение высокоэнтропийной композиционной керамики системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N осуществлялось в режиме горения в условиях естественной фильтрации с использованием метода СВС в реакторе высокого давления в среде азота (см. рис. 1, c). Синтезированный материал Hf–Ti–Cr–Fe–V–N дробился, просеивался через сито с размером ячейки 50 мкм и использовался для получения керамических компактов (см. рис. 1, d). Гранулометрический состав

продуктов СВ-синтеза после дробления и просева представлен на рис. 2. Частицы продуктов СВ-синтеза имеют одномодальное распределение со средним объемным диаметром частиц 12.9 мкм.

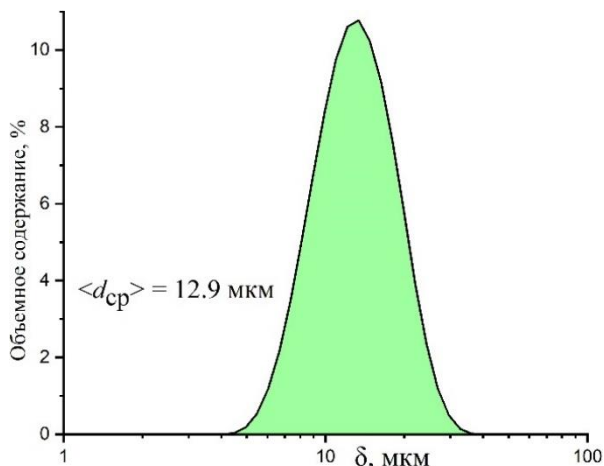


Рис. 2. Распределение частиц продуктов СВ-синтеза керамических материалов системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N по размерам

Fig. 2. Particle size distribution of SHS products of ceramic materials of the Hf–Ti–Cr–Fe–V–N system

Далее проводилась консолидация полученного материала методом горячего прессования (ГП) при температуре 1 300–1 450°C (см. рис. 1, d) и давлении 35 МПа в графитовой пресс-форме диаметром 10 мм. Метод «горячего прессования» широко используется при получении плотных материалов (в том числе керамик) и позволяет значительно сократить время термического цикла нагрев–выдержка–охлаждение, что, в свою очередь, позволяет замедлить рост зерен [22].

Микроструктуру керамических материалов определяли при помощи растрового электронного микроскопа Axia ChemiSEM (Thermo Fisher Scientific, USA) и сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding, Чехия), оснащенных энергодисперсионным спектрометром. Размер частиц горячепрессованных образцов определялся по СЭМ-снимкам методом секущих. Гранулометрический состав продуктов СВ-синтеза перед стадией горячего прессования определялся на лазерном анализаторе Analysette 22 (Fritsch, Германия) по теории Фраунгофера. Плотность консолидированных материалов измеряли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 24409–80 на аналитических весах (CAS XE-300, Республика Корея) с погрешностью делением (e) = 0,05 г. Твердость по Виккерсу определялась на микротвердомере PMT-3М при нагрузке 30 кг с временем выдержки 20 с.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены РЭМ-изображения микроструктуры с картированием по элементам синтезированной керамики системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N, полученной непосредственно после СВ-синтеза (СВС-стадия, см. рис. 1, c).

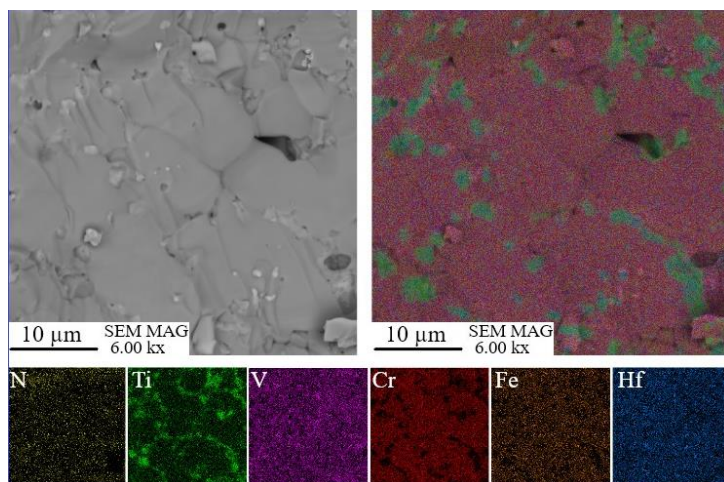


Рис. 3. РЭМ-изображение микроструктуры и многослойное ЭДС изображение продуктов СВ-синтеза системы Hf-Ti-Cr-Fe-V-N

Fig. 3. The SEM-EDS images of the microstructure and element mapping of SHS products of the Hf-Ti-Cr-Fe-V-N system

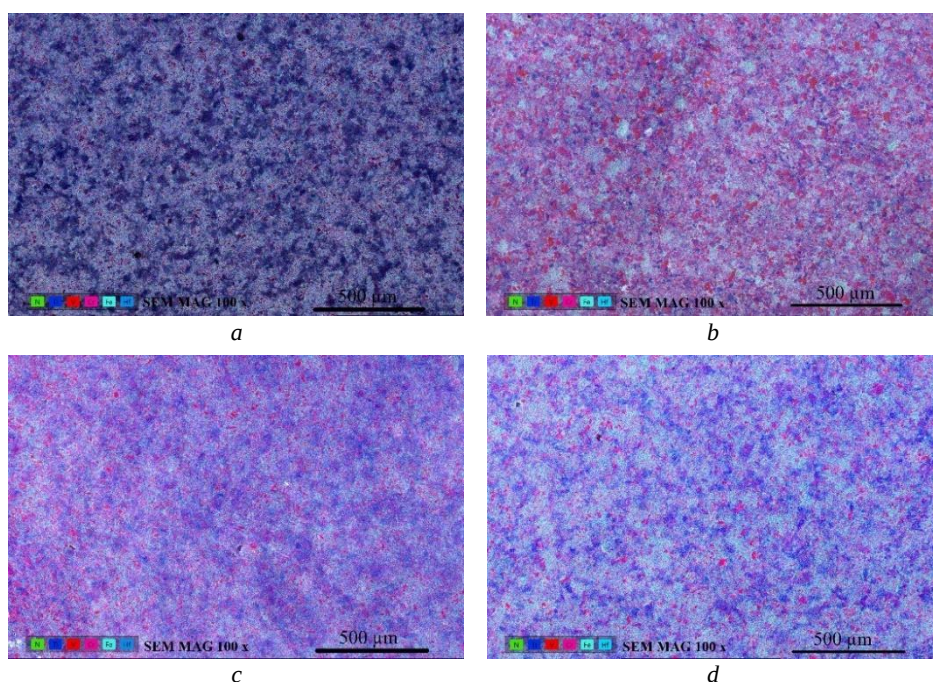


Рис. 4. РЭМ-изображение микроструктуры и многослойное ЭДС-изображение композиционной керамики системы Hf-Ti-Cr-Fe-V-N в зависимости от температуры горячего прессования: *a* – 1 300°C, *b* – 1 350°C, *c* – 1 400°C, *d* – 1 450°C

Fig. 4. The SEM-EDS images of the microstructure and element mapping of composite ceramics of the Hf-Ti-Cr-Fe-V-N system depending on hot-pressing temperature: (a) 1300, (b) 1350, (c) 1400, and (d) 1450 °C

Энергодисперсионный анализ подтвердил наличие композиционной структуры синтезированных образцов с образующими матрицу элементами Cr, Fe, V, Hf, Ti, N и дисперсионными включениями нитридов (Hf–Ti)N с содержанием в них (Cr, Fe, V) порядка 3–6 ат. % [21]. Измеренная средняя твердость спека на данном этапе получения составила $1\,344 \pm 30$ HV.

Многослойные ЭДС-изображения микроструктуры компактированных образцов после их консолидации методом ГП в зависимости от температуры прессования представлены на рис. 4.

Из рисунка видно, что композиционная структура наблюдается в образцах, полученных во всем рассматриваемом температурном диапазоне прессования. Тщательное исследование структуры полученных керамик подтвердило образование растворов (Hf, Ti, Cr, Fe, V)N, дисперсионно-упрочненных фазой (Ti, Hf)N. При этом более равномерное распределение компонентов наблюдается в образцах, полученных при температурах прессования 1 400 и 1 450°C.

На рис. 5 приведены РЭМ-изображения микроструктуры горячепрессованных керамических образцов в зависимости от температуры прессования при 6 500-кратном увеличении.

Рисунок 6 отражает гранулометрический состав частиц композиционной керамики системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N в зависимости от температурного режима горячего прессования.

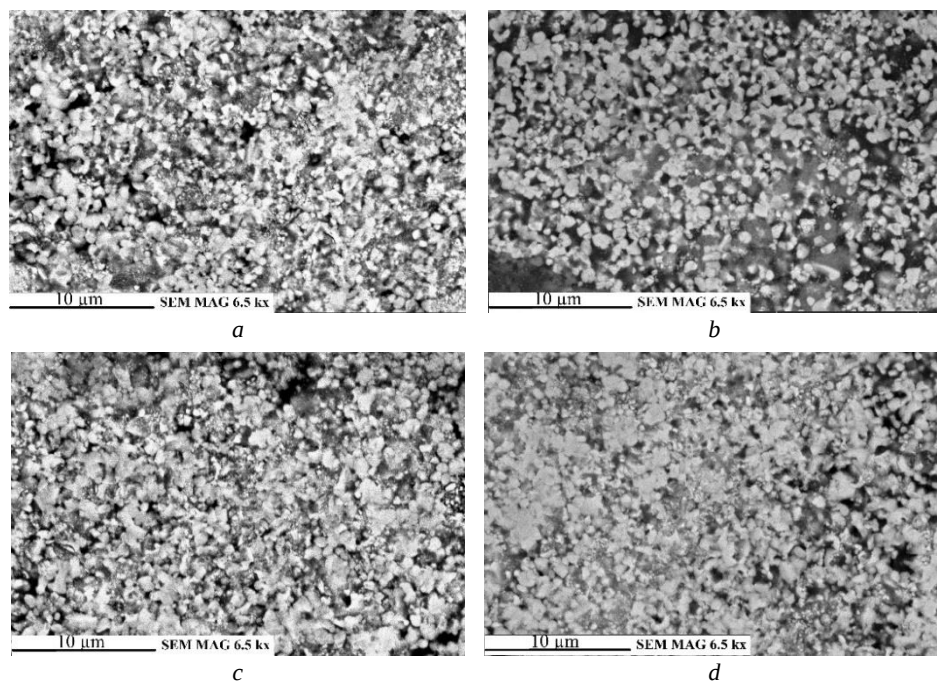


Рис. 5. РЭМ-изображение микроструктуры керамики в зависимости от температуры горячего прессования по размерам: *a* – 1 300°C, *b* – 1 350°C, *c* – 1 400°C, (*d*) – 1 450°C
Fig. 5. The SEM-EDS images of the microstructure and element mapping of composite ceramics of the Hf–Ti–Cr–Fe–V–N system depending on hot-pressing temperature by size: (*a*) 1300, (*b*) 1350, (*c*) 1400, and (*d*) 1450 °C

Исследование гранулометрического состава показало увеличение среднего диаметра частиц с 0.74 до 0.87 мкм при увеличении температуры спекания с 1 300 до 1 450°C. При этом в образцах, спеченных при температуре 1 400–1 450°C наблюдаются локальные следы плавления, в которых сплавленные частицы достигают 3–4 мкм (см. рис. 5).

В табл. 2 отражены значения плотности и твердости (среднее значение) полученных в процессе горячего прессования керамических материалов в среде аргона с временем выдержки 10 мин.

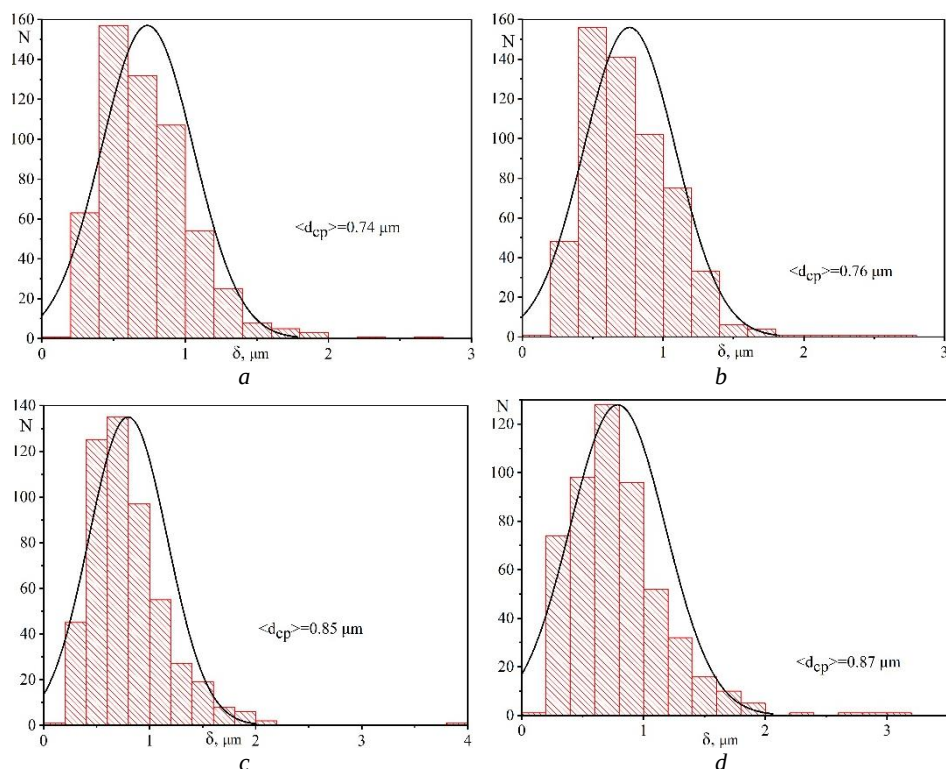


Рис. 6. Распределение частиц керамических материалов системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N в зависимости от температуры горячего прессования по размерам: *a* – 1 300°C, *b* – 1 350°C, *c* – 1 400°C, *d* – 1 450°C

Fig. 6. Particle distribution of ceramic materials of the Hf–Ti–Cr–Fe–V–N system depending on hot-pressing temperature by size: (*a*) 1300, (*b*) 1350, (*c*) 1400, and (*d*) 1450 °C

Таблица 2

Плотность и твердость керамических композиционных материалов системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N в зависимости от температуры горячего прессования

Температура горячего прессования, °C	Плотность, г/см ³	Твердость, HV
1 300	$8.6 \pm 0,05$	$1\,247 \pm 30$
1 350	$8.67 \pm 0,05$	$1\,424 \pm 30$
1 400	$8.86 \pm 0,05$	$1\,678 \pm 50$
1 450	$9.09 \pm 0,05$	$1\,858 \pm 50$

Анализ табл. 2 позволяет сделать заключение о том, что наибольшие значения плотности и твердости образцов достигаются при температуре прессования около 1 450°C. Очевидно, что при данном температурном режиме происходят наилучшее уплотнение материала и повышение механических характеристик.

Экспериментально установлено, что повышение температуры порядка 1 500°C приводит к жидкофазному плавлению образца, при котором часть образца вытекает сквозь технологические зазоры между пресс-формой и пуансонами, что приводило к разрушению пресс-форм при извлечении из них образцов.

Заключение

В работе рассмотрено влияние температурного режима процесса горячего прессования на структуру и свойства керамических образцов системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N. Анализ микроструктуры полученных композиционных керамик системы Hf–Ti–Cr–Fe–V–N показал наличие пористости во всем рассматриваемом температурном диапазоне прессования (1 300–1 450°C) при одномодальном распределении частиц исходной порошковой смеси с размером менее 50 мкм. При этом максимально достигнутое значение твердости составило $1\,858 \pm 50$ HV. Получению более плотных керамических структур с меньшим объемным содержанием пор могут способствовать использование исходной порошковой смеси с бимодальным гранулометрическим составом [23] и более тщательная корректировка режима горячего прессования. Экспериментально установлено, что наибольшим пределом прочности на изгиб обладают образцы, полученные при температуре горячего прессования 1 450°C.

Список источников

1. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // *Nature reviews materials*. 2019. V. 4 (8). P. 515–534. doi: 10.1038/s41578-019-0121-4
2. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. V. 375. P. 213–218. doi: 10.1016/j.msea.2003.10.257
3. Rost C.M., Sachet E., Borman T., Moballeggh A., Dickey E.C., Hou D., Jones J.L., Stefano Curtarolo S. Entropy-stabilized oxides // *Nature communications*. 2015. V. 6 (1). Art. 8485. doi: 10.1038/ncomms9485
4. Ye Y.F., Wang Q., Lu J., Liu C.T., Yang Y. High-entropy alloy: challenges and prospects // *Materials Today*. 2016. V. 19 (6). P. 349–362. doi: 10.1016/j.mattod.2015.11.026
5. Yeh J.W. Overview of high-entropy alloys // *High-entropy alloys: fundamentals and applications*. Springer, 2016. P. 1–19. doi: 10.1007/978-3-319-27013-5_1
6. Yan X., Guo H., Yang W., Pang S., Wang Q., Liu Y., Liaw P.K., Zhang T. Al_{0.3}Cr_xFeCoNi high-entropy alloys with high corrosion resistance and good mechanical properties // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. V. 860. Art. 158436. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.158436
7. Joseph J., Haghdadi N., Shamlaye K., Hodgson P., Barnett M., Fabijanic D. The sliding wear behaviour of CoCrFeMnNi and Al_xCoCrFeNi high entropy alloys at elevated temperatures // *Wear*. 2019. V. 428. P. 32–44. doi: 10.1016/j.wear.2019.03.002
8. Kao Y.F., Chen T.J., Chen S.K., Yeh J.W. Microstructure and mechanical property of as-cast, homogenized, and-deformed Al_xCoCrFeNi (0 ≤ x ≤ 2) high-entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. V. 488 (1). P. 57–64. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.08.090

9. MacDonald B.E., Fu Z., Wang X., Li Z., Chen W., Zhou Y., Raabe D., Schoenung J., Hahn H., Lavernia E.J. Influence of phase decomposition on mechanical behavior of an equiatomic CoCuFeMnNi high entropy alloy // *Acta Materialia*. 2019. V. 181. P. 25–35. doi: 10.1016/j.actamat.2019.09.030
10. Evseev N.S., Matveev A.E., Nikitin P.Yu., Abzaev Yu.A., Zhukov I.A. A theoretical and experimental investigation on the SHS synthesis of (HfTiCN)-TiB₂ high-entropy composite // *Ceramics International*. 2022. V. 48 (11). P. 16010–16014. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.02.144
11. Gelchinski B., Balyakin I., Ilinykh N., Rempel A. Analysis of the Probability of Synthesizing High-Entropy Alloys in the Systems Ti-Zr-Hf-V-Nb, Gd-Ti-Zr-Nb-Al, and Zr-Hf-V-Nb-Ni // *Physical Mesomechanics*. 2021. V. 24. P. 701–706. doi: 10.1134/S1029959921060084
12. Junjie H., Guo H., Jing L., Jingchao T. New class of high-entropy defect fluorite oxides RE₂(Ce_{0.2}Zr_{0.2}Hf_{0.2}Sn_{0.2}Ti_{0.2})₂O₇ (RE = Y, Ho, Er, or Yb) as promising thermal barrier coatings // *Journal of the European Ceramic Society*. 2021. V. 41 (12). P. 6080–6086. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.05.044
13. Yan X., Constantin L., Lu Y., Silvain J.F., Nastasi M., Cui B. (Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}Ti_{0.2})C high-entropy ceramics with low thermal conductivity // *Journal of the American Ceramic Society*. 2018. V. 101 (10). C. 4486–4491. doi: 10.1111/jace.15779
14. Harrington T.J., Gild J., Sarker P., Toher C., Rost C.M., Dippo O.F., McElfresh C., Kaufmann K., Marin E., Borowski L., Hopkins P.E., Luo J., Curtarolo S., Brenner D.W., Vecchio K.S. Phase stability and mechanical properties of novel high entropy transition metal carbides // *Acta Materialia*. 2019. V. 166. P. 271–280. doi: 10.1016/j.actamat.2018.12.054
15. Kanzamanova G.Z., Kinelovsky S.A., Kozulin A.A. Shaped-Charge Treatment Effects Accompanying the Formation of Hard Structure and New Phase States in Coatings on Titanium // *Behavior of Materials under Impact, Explosion, High Pressures and Dynamic Strain Rates*. Springer, 2023. P. 69–82. doi:10.1007/978-3-031-17073-7_5
16. Zhang Z., Zhu S., Liu Y., Liu L., Ma Z. Phase structure, mechanical properties and thermal properties of high-entropy diboride (Hf_{0.25}Zr_{0.25}Ta_{0.25}Sc_{0.25})B₂ // *Journal of the European Ceramic Society*. 2022. V. 42 (13). C. 5303–5313. doi: 10.1111/jace.18751
17. Dippo O.F., Mesgarzadeh N., Harrington T.J., Schrader G.D., Vecchio K.S. Bulk high-entropy nitrides and carbonitrides // *Scientific reports*. 2020. V. 10 (1). Art. 21288. doi: 10.1038/s41598-020-78175-8
18. Jiang C., Li R., Wang X., Shang H., Zhang Y., Liaw P.K. Diffusion Barrier Performance of AlCrTaTiZr/AlCrTaTiZr-N High-Entropy Alloy Films for Cu/Si Connect System // *Entropy*. 2020. V. 22. Art. 234. doi: 10.3390/e22020234
19. Guo Y., Shang X., Liu Q. Microstructure and properties of in-situ TiN reinforced laser cladding CoCr₂FeNiTi_x high-entropy alloy composite coatings // *Surf. Coat. Technol.* 2018. V. 344. P. 353–358. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.03.035
20. Evseev N., Matveev A., Belchikov I., Zhukov I. Self-propagating high-temperature synthesis of high-entropy ceramic composition (Hf_{0.25}Ti_{0.25}Cr_{0.25}(FeV)_{0.25})N // *Materials Letters*. 2023. V. 346. Art. 134562. doi: 10.1016/j.matlet.2023.134562
21. Евсеев Н.С., Матвеев А.Е., Бельчиков И.А., Жуков И.А., Ворожцов А.Б., Мубараков Р.Г. Получение высокоэнтروпийных композитов на основе Hf-Ti-Cr-FeV-N в режиме высокотемпературных экзотермических реакций // *Известия вузов. Физика*. 2023. Т. 66, № 8 (789). С. 131–133. doi: 10.17223/00213411/66/8/15
22. Орданьян С.С., Несмелов Д.Д., Новоселов Е.С. Статистическая оценка механических характеристик горячепрессованной керамики в системе ZrB₂-SiC // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2023. № 82. С. 150–160. doi: 10.17223/19988621/82/12
23. Гордеев Ю.Н., Абкарян А.К., Ковалевская О.В. Перспективные композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, матрично-наполненные сверхтонкими порошками оксида алюминия // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2011. № 1 (34). С. 128–132.

References

- George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. (2019) High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*. 4. pp. 515–534. doi: 10.1038/s41578-019-0121-4
- Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. (2004) Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 375. pp. 213–218. doi: 10.1016/j.msea.2003.10.257
- Rost C.M., Sachet E., Borman T., Moballeghe A., Dickey E.C., Hou D., Jones J.L., Stefano Curtarolo S. (2015) Entropy-stabilized oxides. *Nature Communications*. 6. Article 8485. doi: 10.1038/ncomms9485
- Ye Y.F., Wang Q., Lu J., Liu C.T., Yang Y. (2016) High-entropy alloy: challenges and prospects. *Materials Today*. 19. pp. 349–362. doi: 10.1016/j.mattod.2015.11.026
- Yeh J.W. (2016) Overview of high-entropy alloys. *High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications*. pp. 1–19. doi: 10.1007/978-3-319-27013-5_1
- Yan X., Guo H., Yang W., Pang S., Wang Q., Liu Y., Liaw P.K., Zhang T. (2021) $\text{Al}_{0.3}\text{Cr}_x\text{FeCoNi}$ high-entropy alloys with high corrosion resistance and good mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 860. Article 158436. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.158436
- Joseph J., Haghdadi N., Shamlaye K., Hodgson P., Barnett M., Fabijanic D. (2019) The sliding wear behaviour of CoCrFeMnNi and $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloys at elevated temperatures. *Wear*. 428. pp. 32–44. doi: 10.1016/j.wear.2019.03.002
- Kao Y.F., Chen T.J., Chen S.K., Yeh J.W. (2009) Microstructure and mechanical property of as-cast, homogenized, and deformed $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($0 \leq x \leq 2$) high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 488. pp. 57–64. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.08.09
- MacDonald B.E., Fu Z., Wang X., Li Z., Chen W., Zhou Y., Raabe D., Schoenung J., Hahn H., Lavernia E.J. (2019) Influence of phase decomposition on mechanical behavior of an equiatomic CoCuFeMnNi high entropy alloy. *Acta Materialia*. 181. pp. 25–35. doi: 10.1016/j.actamat.2019.09.030
- Evseev N.S., Matveev A.E., Nikitin P.Yu., Abzaev Yu.A., Zhukov I.A. (2022) A theoretical and experimental investigation on the SHS synthesis of $(\text{HfTiCN})\text{-TiB}_2$ high-entropy composite. *Ceramics International*. 48. pp. 16010–16014. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.02.144
- Gelchinski B., Balyakin I., Ilinykh N., Rempel A. (2021) Analysis of the probability of synthesizing high-entropy alloys in the systems Ti-Zr-Hf-V-Nb , Gd-Ti-Zr-Nb-Al , and Zr-Hf-V-Nb-Ni . *Physical Mesomechanics*. 24. pp. 701–706. doi: 10.1134/S1029959921060084
- Junjie H., Guo H., Jing L., Jingchao T. (2021) New class of high-entropy defect fluorite oxides $\text{RE}_2(\text{Ce}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2}\text{Sn}_{0.2}\text{Ti}_{0.2})_2\text{O}_7$ ($\text{RE} = \text{Y, Ho, Er, or Yb}$) as promising thermal barrier coatings. *Journal of the European Ceramic Society*. 41. pp. 6080–6086. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.05.044
- Yan X., Constantin L., Lu Y., Silvain J.F., Nastasi M., Cui B. (2018) $(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ti}_{0.2})\text{C}$ high-entropy ceramics with low thermal conductivity. *Journal of the American Ceramic Society*. 101. pp. 4486–4491. doi: 10.1111/jace.15779
- Harrington T.J., Gild J., Sarker P., Toher C., Rost C.M., Dippo O.F., McElfresh C., Kaufmann K., Marin E., Borowski L., Hopkins P.E., Luo J., Curtarolo S., Brenner D.W., Vecchio K.S. (2019) Phase stability and mechanical properties of novel high entropy transition metal carbides. *Acta Materialia*. 166. pp. 271–280. doi: 10.1016/j.actamat.2018.12.054
- Kanzamanova G.Z., Kinelovsky S.A., Kozulin A.A. (2023) Shaped-charge treatment effects accompanying the formation of hard structure and new phase states in coatings on titanium. In: *Behavior of Materials under Impact, Explosion, High Pressures and Dynamic Strain Rates*. Germany: Springer. pp. 69–82. doi: 10.1007/978-3-031-17073-7_5
- Zhang Z., Zhua S., Liu Y., Liu L., Ma Z. (2022) Phase structure, mechanical properties and thermal properties of high-entropy diboride $(\text{Hf}_{0.25}\text{Zr}_{0.25}\text{Ta}_{0.25}\text{Sc}_{0.25})\text{B}_2$. *Journal of the European Ceramic Society*. 42. pp. 5303–5313. doi: 10.1111/jace.18751

17. Dippo O.F., Mesgarzadeh N., Harrington T.J., Schrader G.D., Vecchio K.S. (2020) Bulk high-entropy nitrides and carbonitrides. *Scientific Reports*. 10. Article 21288. doi: 10.1038/s41598-020-78175-8
18. Jiang C., Li R., Wang X., Shang H., Zhang Y., Liaw P.K. (2020) Diffusion barrier performance of AlCrTaTiZr/AlCrTaTiZr-N high-entropy alloy films for Cu/Si connect system. *Entropy*. 22(2). Article 234. pp. 1–13. doi: 10.3390/e22020234
19. Guo Y., Shang X., Liu Q. (2018) Microstructure and properties of in-situ TiN reinforced laser cladding CoCr₂FeNiTi_x high-entropy alloy composite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 344. pp. 353–358. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.03.035
20. Evseev N., Matveev A., Belchikov I., Zhukov I. (2023) Self-propagating high-temperature synthesis of high-entropy ceramic composition (Hf_{0.25}Ti_{0.25}Cr_{0.25}(FeV)_{0.25})N. *Materials Letters*. 346. Article 134562. doi: 10.1016/j.matlet.2023.134562
21. Evseev N.S., Matveev A.E., Belchikov I.A., Zhukov I.A., Vorozhtsov A.B., Mubarakov R.G. (2023) Production of high-entropy composites based on Hf-Ti-Cr-FeV-N in the mode of high-temperature exothermic reactions. *Russian Physics Journal*. 66. pp. 131–133. doi: 10.17223/00213411/66/8/15
22. Ordan'yan S.S., Nesmelov D.D., Novoselov E.S. (2023) Statisticheskaya otsenka mekhanicheskikh kharakteristik goryachepressovannoy keramiki v sisteme ZrB₂-SiC [Statistical evaluation of mechanical characteristics of hot-pressed ceramics in ZrB₂-SiC system]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 82. pp. 150–160. doi: 10.17223/19988621/82/12
23. Gordeev Yu.N., Abkaryan A.K., Kovalevskaya O.V. (2011) Perspektivnye kompozitsionnye materialy na osnove sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena, matrichno-napolnennye sverkh-tonkimi poroshkami oksida alyuminiya [Prospective composite materials based on ultrahigh molecular weight polyethylene modified with ultrafine powders of aluminum oxide]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva – Vestnik SibSAU. Aerospace Technologies and Control Systems*. 1. pp. 128–132.

Сведения об авторах:

Евсеев Николай Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной аэромеханики Томского государственного университета (Томск, Россия); научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН (Бийск, Россия). E-mail: evseevns@gmail.com

Жуков Илья Александрович – доктор технических наук, заведующий лабораторией нанотехнологий металлургии Томского государственного университета (Томск, Россия); ведущий научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН (Бийск, Россия). E-mail: gofra930@gmail.com

Мубаракوف Рауль – инженер-исследователь лаборатории нанотехнологий металлургии Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: raul.mub@mail.ru

Бельчиков Иван Алексеевич – инженер-исследователь лаборатории нанотехнологий металлургии Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ivan70422@gmail.com

Information about the authors:

Evseev Nikolay S. (Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation; Researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russian Federation). E-mail: evseevns@gmail.com

Zhukov Ilya A. (Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation; Researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic

Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russian Federation). E-mail: gofra930@gmail.com

Mubarakov Raul' (Researcher, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: raul.mub@mail.ru

Bel'chikov Ivan A. (Researcher, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ivan70422@gmail.com

Статья поступила в редакцию 12.04.2024; принята к публикации 05.08.2024

The article was submitted 12.04.2024; accepted for publication 05.08.2024