

Научная статья

УДК 666.3

doi: 10.17223/19988621/82/12

Статистическая оценка механических характеристик горячепрессованной керамики в системе $\text{ZrB}_2\text{--SiC}$

Сукяс Семенович Орданьян¹, Дмитрий Дмитриевич Несмелов²,
Евгений Сергеевич Новоселов³

^{1, 2, 3} Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

² dnesmelov@yandex.ru

³ lehmann330@gmail.com

Аннотация. Исследовано влияние введения добавки 5 мол. % LaB_6 на модуль Вейбулла горячепрессованной керамики в системе $\text{ZrB}_2\text{--SiC}$, полученной методом горячего прессования при температуре изотермической выдержки 1 900°C и давлении 30 МПа в течение 15 мин в среде аргона. Получены образцы с относительной плотностью 91–92%, пределом прочности при изгибе 300–315 МПа и твердостью по Виккерсу 14–15 ГПа. Введение в состав керамики добавки LaB_6 сопровождается увеличением модуля Вейбулла от $m = 9.5$ до $m = 15.5$ в случае расчета с использованием значений предела прочности и от $m = 22.0$ до $m = 31.4$ в случае расчета с использованием значений твердости. Величина m , рассчитанная по значениям твердости, несколько завышена в связи с локальным характером воздействия пирамиды Виккерса. Увеличение модуля Вейбулла при введении добавки LaB_6 связано с повышением однородности структуры керамики за счет формирования более развитой сети межфазных границ в образцах трехкомпонентного состава.

Ключевые слова: керамика, прочность, твердость, структура, модуль Вейбулла

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-73-10180 с использованием оборудования инжинирингового центра СПбГТИ(ТУ).

Для цитирования: Орданьян С.С., Несмелов Д.Д., Новоселов Е.С. Статистическая оценка механических характеристик горячепрессованной керамики в системе $\text{ZrB}_2\text{--SiC}$ // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 82. С. 150–160. doi: 10.17223/19988621/82/12

Statistical evaluation of mechanical characteristics of hot-pressed ceramics in $\text{ZrB}_2\text{--SiC}$ system

Sukyas S. Ordan'yan¹, Dmitriy D. Nesmelov², Evgeniy S. Novoselov³

^{1,2,3} Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation

² dnesmelov@yandex.ru

³ lehmann330@gmail.com

Abstract. The effect of the addition of 5 mol.% LaB_6 on the Weibull modulus of hot-pressed ceramics in $\text{ZrB}_2\text{--SiC}$ is studied in this paper. The samples with a relative density of 91–92%, a flexural strength of 300–315 MPa, and a Vickers hardness of 14–15 GPa are obtained by hot pressing at an isothermal holding temperature of 1900°C and a pressure of 30 MPa within 15 minutes in an argon atmosphere. The addition of LaB_6 induces an increase in the Weibull modulus of ceramics from 9.5 up to 15.5 when calculating using the bending strength, and from 22.0 up to 31.4 when calculating using the hardness. The values calculated using the hardness are somewhat overestimated due to the local impact of the Vickers pyramid. An increase in the Weibull modulus with the addition of LaB_6 is associated with increasing homogeneity of the ceramic structure due to the formation of a more developed system of interphase boundaries in three-component samples.

Keywords: ceramics, strength, hardness, structure, Weibull modulus

Acknowledgments: This work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 19-73-10180) using the equipment of the Engineering Centre of Saint-Petersburg State Institute of Technology.

For citation: Ordan'yan, S.S., Nesmelov, D.D., Novoselov, E.S. (2023) Statistical evaluation of mechanical characteristics of hot-pressed ceramics in $\text{ZrB}_2\text{--SiC}$ 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

Введение

Как известно, керамика – хрупкий материал, чувствительный к дефектам структуры. Значения механических характеристик керамики распределяются в широком диапазоне даже при испытании в одинаковых условиях номинально одинаковых образцов из одной партии, что связано со случайным распределением пор, микротрещин, инородных включений различных размеров в объеме образца. Таким образом, для того чтобы получить по возможности полную информацию о механических характеристиках керамики, необходимо проводить статистическую оценку прочности. Оценка методами статистической обработки данных выборки результатов предела прочности при изгибе керамики показала хорошее совпадение экспериментальных данных с несколькими видами распределения [1–7]. В частности, распределение Вейбулла позволяет оценить структурную неодно-

родность материала. Распределение вероятности по теории Вейбулла может быть определено либо двухпараметрическим выражением:

$$P(x_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x_i}{x_0} \right)^m \right], \quad (1)$$

либо трехпараметрическим:

$$P(x_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x_i - x_n}{x_0} \right)^m \right], \quad (2)$$

где x_n – минимальное значение измеренной характеристики; x_0 – нормирующий параметр распределения Вейбулла; m – показатель однородности материала (модуль Вейбулла), является безразмерной величиной и указывает меру разброса данных. Величина m увеличивается с уменьшением разброса; x_i – значение измеренной характеристики.

Величины x_i , x_0 , m не являются константами материала, они характеризуют конкретную технологию, партию образцов определенной геометрии с определенным состоянием поверхности.

Расчет по уравнениям (1) и (2) для керамики позволяет получать близкие значения m и x_0 , следовательно, обработка результатов измерений может проводиться по более простой зависимости (1) [5–7].

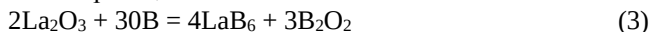
Для керамических материалов, работающих в условиях экстремально высоких температур и механических воздействий, оценка однородности структуры и воспроизводимости механических характеристик имеет особенно важное значение. В большинстве работ, посвященных надежности сверхвысокотемпературной керамики (УНТС), для статистической оценки прочности и других механических свойств применяется распределение Вейбулла [8–13].

Структура спеченных сверхвысокотемпературных материалов (а следовательно, и их механические свойства) в значительной степени зависит от фазового состава спекаемой порошковой системы. В последние годы наблюдается тенденция к усложнению состава композиционных керамик на основе ZrB_2 [13–17]. В частности, помимо традиционного компонента сверхвысокотемпературных керамик SiC применяют модифицирующие добавки гексаборидов РЗМ [16, 17].

Цель настоящей работы – статистическая оценка предела прочности при изгибе горячепрессованной керамики в системе ZrB_2 –SiC с добавкой LaB_6 с использованием двухпараметрического уравнения Вейбулла. Также предпринята попытка применить распределение Вейбулла к оценке разброса значений твердости, определенной методом индентирования пирамиды Виккерса.

Материалы и методы

В работе использовали коммерческие порошки ZrB_2 квалификации «Ч» производства ОАО ДЗХР и порошок SiC Sika Tech GC13 (Saint-Gobain, 99,5% SiC). Порошок LaB_6 синтезировали по реакции



с использованием в качестве исходных компонентов порошков оксида лантана La_2O_3 (ЛАО-Д, 99,999%) и аморфного бора (Б-99А, 99%). Чистоту синтезированного LaB_6 контролировали методами рентгеновской дифракции и рентгеноспектрального микроанализа. Порошок был представлен фазой кубического гексаборида лантана без содержания других кристаллических фаз. Примесь кислорода,

адсорбированного поверхностью частиц, составила 1,2 мас. %. Было приготовлено два опытных состава: ZS (80 мол. % ZrB_2 ; 20 мол. % SiC) и ZSL (80 мол. % ZrB_2 ; 15 мол. % SiC ; 5 мол. % LaB_6). В составе ZSL добавка гексаборида лантана предназначена для ограничения роста зерен основной фазы.

Смешение порошков проводили в атриторе Union Process HD-01 при частоте вращения вала 300 об./мин в течение 2 ч в среде высокоочищенного бензина БР-2 с использованием мелющих тел из SiC . Образцы в виде таблеток диаметром 35 мм и высотой 5 мм получали методом горячего прессования с использованием установки Thermal Technology HP20-3560-20 при температуре изотермической выдержки 1900°C и давлении 30 МПа в течение 15 мин в среде аргона. После горячего прессования образцы были разрезаны с помощью отрезного станка с алмазным диском на прямоугольные призмы габаритами $3 \times 3 \times 30$ мм для проведения испытания на прочность при изгибе, а также отполированы для проведения микроструктурного и микромеханического анализа.

Анализ структуры и элементного состава образцов проводили с помощью РЭМ Tescan VEGA 3 SBH с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа Aztec X-Act. Фазовый состав исследовали методом рентгеновской дифракции с помощью порошкового дифрактометра Rigaku SmartLab 3 ($\text{Cu-K}\alpha$ излучение, Ni-фильтр, диапазон углов 2θ от 10 до 80°).

Измерение предела прочности при изгибе проводили по трехточечной схеме на установке Shimadzu AG-50kNXD с постоянной скоростью нагружения. Погрешность измерения составляла 1% от измеряемой величины. Для каждого исследованного состава было проведено пятнадцать измерений.

Измерение твердости проводили методом индентирования по пятнадцати отпечаткам алмазной пирамиды Виккерса на модернизированном твердомере ПМТ-3 под нагрузкой 30 Н. Погрешность измерения составляла 5% от измеряемой величины. Расчет значения твердости вели по формуле

$$Hv = 1854 \cdot \frac{P}{D^2}, \text{ ГПа}, \quad (4)$$

где P – нагрузка на индентор, Н; D – диагональ отпечатка, мкм.

Распределение Вейбулла строили с использованием двухпараметрического уравнения (1).

Результаты и обсуждение

В результате горячего прессования были получены спеченные образцы с относительной плотностью 92% (ZS) и 91% (ZSL). SEM-снимки микроструктуры образцов представлены на рис. 1.

В структуре образцов ZS (см. рис. 1, а) присутствует две твердых фазы: светлая фаза – диборид циркония, темная фаза – карбид кремния. Пористость образцов ZS составляет около 8%, однако на снимке поры трудно различить вследствие близости их оттенка к цвету зерен SiC . Аналогичная структура характерна и для состава ZSL (см. рис. 1, б). Зерна LaB_6 серого оттенка равномерно распределены в структуре между зернами ZrB_2 и SiC . Пористость керамики ZSL составляет около 9%.

Фазовый состав образцов был представлен только исходными фазами ZrB_2 , SiC и LaB_6 . Микрофотографии отпечатков алмазной пирамиды Виккерса представлены на рис. 2.

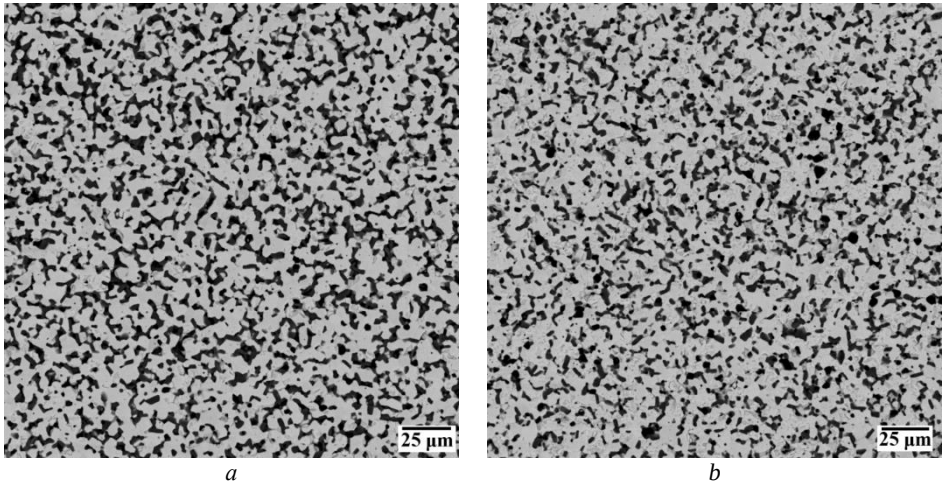


Рис. 1. SEM-снимки микроструктуры горячепрессованных образцов ZS (a) и ZSL (b)
Fig. 1. SEM micrographs of hot-pressed samples of (a) ZS and (b) ZSL

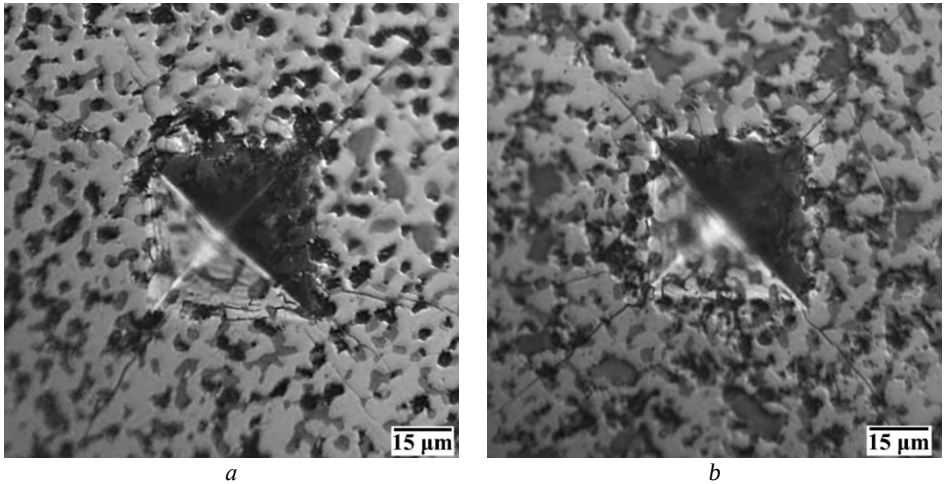


Рис. 2. Оптические микрофотографии отпечатков пирамиды Виккерса
 в образцах ZS (a) и ZSL (b)

Fig. 2. Optical micrographs of Vickers pyramid indentations in (a) ZS and (b) ZSL samples

Вокруг отпечатков наблюдается выкрашивание зерен SiC из матрицы ZrB_2 , что характерно как для состава ZS, так и для ZSL. Радиальные трещины в углах отпечатка имеют среднюю длину 50 мкм.

Результаты определения предела прочности и твердости образцов сведены в табл. 1, 2. Там же представлены результаты расчета параметров уравнения Вейбулла по уравнению (1), в котором в качестве измеренной величины фигурировал предел прочности при изгибе $\chi = \sigma_n$ (см. табл. 1) или твердость по Виккерсу $\chi = Hv$ (см. табл. 2).

Таблица 1

Предел прочности и параметры уравнения Вейбулла образцов ZS и ZSL

№ испытания, состав	$\sigma_{изг}$, МПа	$P(\sigma_{изг})$	m	R^2	№ испытания, состав	$\sigma_{изг}$, МПа	$P(\sigma_{изг})$	m	R^2
1, ZS	262	0.06	9.5	0.94	1, ZSL	263	0.06	15.5	0.97
2, ZS	271	0.13			2, ZSL	275	0.13		
3, ZS	286	0.19			3, ZSL	282	0.19		
4, ZS	287	0.25			4, ZSL	289	0.25		
5, ZS	296	0.31			5, ZSL	292	0.31		
6, ZS	297	0.38			6, ZSL	293	0.38		
7, ZS	301	0.44			7, ZSL	300	0.44		
8, ZS	313	0.50			8, ZSL	301	0.50		
9, ZS	321	0.56			9, ZSL	306	0.56		
10, ZS	323	0.63			10, ZSL	307	0.63		
11, ZS	333	0.69			11, ZSL	310	0.69		
12, ZS	335	0.75			12, ZSL	314	0.75		
13, ZS	343	0.81			13, ZSL	321	0.81		
14, ZS	365	0.88			14, ZSL	326	0.88		
15, ZS	387	0.94			15, ZSL	341	0.94		
Среднее	315				Среднее	301			

Таблица 2

Твердость по Виккерсу и параметры уравнения Вейбулла образцов ZS и ZSL

№ испытания, состав	H_v , ГПа	$P(\sigma_{изг})$	m	R^2	№ испытания, состав	H_v , ГПа	$P(\sigma_{изг})$	m	R^2
1, ZS	13.2	0.06	22.0	0.91	1, ZSL	13.8	0.06	31.4	0.93
2, ZS	13.2	0.13			2, ZSL	14.5	0.13		
3, ZS	13.3	0.19			3, ZSL	14.7	0.19		
4, ZS	13.5	0.25			4, ZSL	14.8	0.25		
5, ZS	13.7	0.31			5, ZSL	14.9	0.31		
6, ZS	13.7	0.38			6, ZSL	15.0	0.38		
7, ZS	14.0	0.44			7, ZSL	15.0	0.44		
8, ZS	14.1	0.50			8, ZSL	15.1	0.50		
9, ZS	14.1	0.56			9, ZSL	15.1	0.56		
10, ZS	14.2	0.63			10, ZSL	15.2	0.63		
11, ZS	14.3	0.69			11, ZSL	15.2	0.69		
12, ZS	14.6	0.75			12, ZSL	15.2	0.75		
13, ZS	14.9	0.81			13, ZSL	15.4	0.81		
14, ZS	15.0	0.88			14, ZSL	15.7	0.88		
15, ZS	15.1	0.94			15, ZSL	15.8	0.94		
Среднее	14.1				Среднее	15.0			

По полученным данным строили распределение Вейбулла, представленное на рис. 3, 4. Значения, рассчитанные из экспериментальных данных, аппроксимировали линейным уравнением

$$y = \alpha_0 x - \alpha_1, \quad (5)$$

где параметры α_0 и α_1 определяли с помощью метода наименьших квадратов, при этом модуль Вейбулла соответствует параметру α_0 . Нормирующий параметр находили из соотношения

$$\sigma_0 = e^{\frac{\alpha_1}{\alpha_0}}. \quad (6)$$

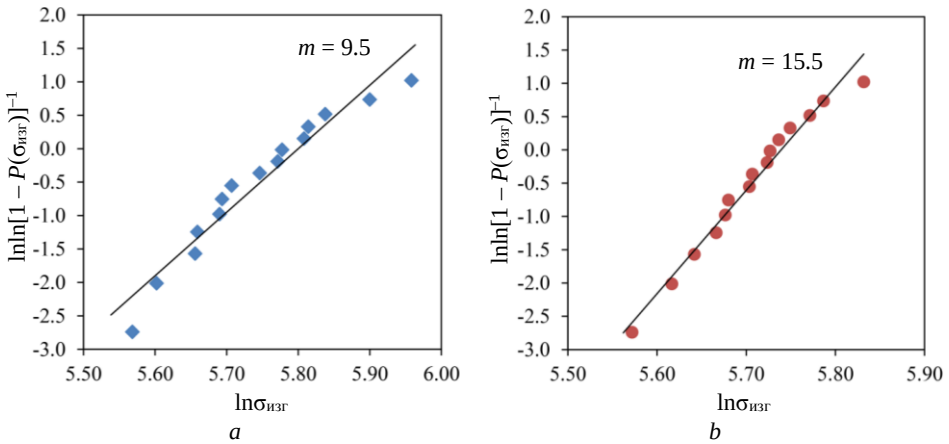


Рис. 3. Распределение Вейбулла, построенное по значениям предела прочности при изгибе образцов ZS (a) и ZSL (b)

Fig. 3. Weibull plots of the bending strength of (a) ZS and (b) ZSL samples

Коэффициент детерминации R^2 составил 0.94 для образцов ZS и 0.97 для ZSL, что свидетельствует об адекватности модели. Значения модуля Вейбулла для двух составов существенно различаются (для ZS $m = 9.5$ и для ZSL $m = 15.5$), что в первую очередь связано с более широким разбросом значений предела прочности образцов ZS. Опираясь на известные литературные данные [8–10], полученные значения m можно назвать достаточно высокими для керамических материалов, что указывает на высокую однородность структуры спеченных материалов.

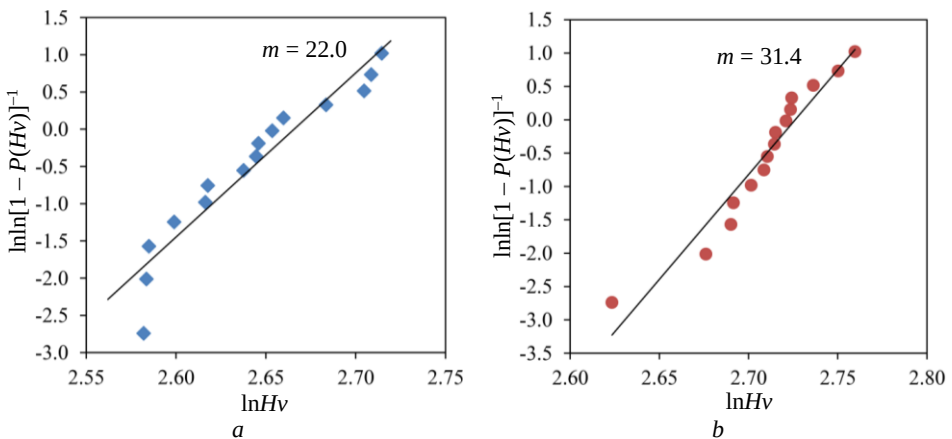


Рис. 4. Распределение Вейбулла, построенное по значениям твердости по Виккерсу образцов ZS (a) и ZSL (б)

Fig. 4. Weibull plots of Vickers hardness of (a) ZS and (b) ZSL samples

Задачей оценки разброса значений твердости было сравнение двух экспериментальных составов между собой. При этом не ставилась цель получения абсолютных значений модуля Вейбулла, поскольку построение распределения Вейбулла с использованием значений твердости по Виккерсу не является общепринятой практикой, и в литературе нет прямых аналогов для сопоставления результатов. Как и в случае статистической оценки предела прочности при изгибе, модуль Вейбулла образцов ZSL ($m = 31.4$) оказался выше, чем у образцов ZS ($m = 22.0$). Следует отметить, что разброс значений твердости образцов ZS при этом меньше, чем у образцов ZSL. Адекватность уравнения регрессии расчетным точкам в случае твердости была несколько ниже, чем в случае предела прочности, на что указывают более низкие значения R^2 (см. табл. 2).

Завышенные значения m можно объяснить локальным характером воздействия пирамиды Виккерса. Повлиять на значение твердости способен только тот дефект структуры, который расположен вблизи отпечатка индентора. Вероятность существования такого дефекта существенно ниже, чем вероятность нахождения дефекта в случайном месте в объеме образца при поперечном изгибе.

Таким образом, введение в керамику на основе системы $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ добавки LaB_6 сопровождается увеличением модуля Вейбулла, рассчитанного как по значениям предела прочности при изгибе, так и по значениям твердости по Виккерсу. Увеличение модуля Вейбулла можно трактовать как повышение однородности структуры. При этом средние значения предела прочности, твердости и пористости образцов ZS и ZSL различаются незначительно. Этот факт позволяет предположить, что основной вклад в повышение однородности структуры происходит за счет формирования более развитой сети межфазных границ в образцах трехкомпонентного состава.

Заключение

Методом горячего прессования при температуре изотермической выдержки 1 900°C и давлении 30 МПа в течение 15 мин в среде аргона получены спеченные материалы в системе $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ как без добавок, так и с добавкой 5 мол. % LaB_6 . Образцы характеризуются относительной плотностью 91–92%, пределом прочности при изгибе 300–315 МПа и твердостью по Виккерсу 14–15 ГПа. Введение в состав керамики добавки LaB_6 сопровождается увеличением модуля Вейбулла. В случае расчета с использованием значений предела прочности при поперечном изгибе модуль Вейбулла увеличивается от $m = 9.5$ до $m = 15.5$. Модуль Вейбулла, рассчитанный с использованием значений твердости по Виккерсу, увеличивается от $m = 22.0$ для образцов без добавки до $m = 31.4$ для образцов с добавкой LaB_6 . Величина m , рассчитанная по значениям твердости, несколько завышена в связи с локальным характером воздействия пирамиды Виккерса. Увеличение модуля Вейбулла при введении добавки LaB_6 можно объяснить повышением однородности структуры керамики за счет формирования более развитой сети межфазных границ в образцах трехкомпонентного состава.

Список источников

1. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // Journal of Applied Mechanics. 1951. V. 18 (3). P. 293–297. doi: 10.1115/1.4010337

2. Richerson D.W., Lee W.E. Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design. Boca Raton : CRC press, 2018. 836 p. doi: 10.1201/9780429488245
3. Murthy D.N.P., Xie M., Jiang R. Weibull models. New York : John Wiley & Sons, 2004. 408 p.
4. Carlsson L.A., Adams D.F., Pipes R.B. Experimental characterization of advanced composite materials. Boca Raton : CRC press, 2014. 379 p.
5. Lu C. A reassessment of the strength distributions of advanced ceramics // Journal of the Australian Ceramic Society. 2008. V. 44 (2). P. 38–41.
6. Ono K. A simple estimation method of Weibull modulus and verification with strength data // Applied Sciences. 2019. V. 9 (8). Art. 1575. P. 1–39. doi: 10.3390/app9081575
7. Danzer R., Supancic P., Pascual J., Lube T. Fracture statistics of ceramics–Weibull statistics and deviations from Weibull statistics // Engineering Fracture Mechanics. 2007. V. 74 (18). P. 2919–2932. doi: 10.1016/j.engfracmech.2006.05.028
8. Liu G., Meng S., An J., Sun S., Ding X. The evaluation of reliability for zirconium diboride composite with additives of graphite // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2009. V. 27 (5). P. 868–871. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2009.04.003
9. Wang L., Kong D., Fang G., Liang J. High-temperature tensile strength and fracture behavior of ZrB₂–SiC-graphite composite // International Journal of Applied Ceramic Technology. 2017. V. 14 (1). P. 31–38. doi: 10.1111/ijac.12613
10. Makurunge P., Sigalas I., Binner J. Scale characterisation of an oxidised (Hf, Ti) C–SiC ultra-high temperature ceramic matrix composite // Journal of the European Ceramic Society. 2021. V. 41 (1). P. 167–175. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.08.048
11. Povolny S.J., Seidel G.D., Tallon C. Numerical investigation of thermomechanical response of multiscale porous ultra-High temperature ceramics // Ceramics International. 2022. V. 48 (8). P. 11502–11517. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.01.006
12. Grigoriev O.N., Galanov B.A., Kotenko V.A., Ivanov S.M., Koroteev A.V., Brodnikovskiy N.P. Mechanical properties of ZrB₂–SiC (ZrSi₂) ceramics // Journal of the European Ceramic Society. 2010. V. 30 (11). P. 2173–2181. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.03.022
13. Zou J., Liu J., Zhao J., Zhang G.J., Huang S., Qian B., Vleugels J., Van der Biest O., Shen J.Z. A top-down approach to densify ZrB₂–SiC–BN composites with deeper homogeneity and improved reliability // Chemical Engineering Journal. 2014. V. 249. P. 93–101. doi: 10.1016/j.cej.2014.03.089
14. Grigoriev O., Neshpor I., Vedel D., Mosina T., Silvestroni L. Influence of chromium diboride on the oxidation resistance of ZrB₂–MoSi₂ and ZrB₂–SiC ceramics // Journal of the European Ceramic Society. 2021. V. 41 (4). P. 2207–2214. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.12.036
15. Sengupta P. et al. Effect of TiC addition on structure and properties of spark plasma sintered ZrB₂–SiC–TiC ultrahigh temperature ceramic composite // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. V. 850. Art. 156668. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.156668
16. Kashyap S.K., Mitra R. Microstructure and composition of multi-layered oxide scale evolved during isothermal exposure of ZrB₂–SiC–LaB₆ composite to air at 1500°C // Philosophical Magazine Letters. 2021. V. 101 (7). P. 265–276. doi: 10.1080/09500839.2021.1912426
17. Kashyap S.K., Mitra R. Densification behavior involving creep during spark plasma sintering of ZrB₂–SiC based ultra-high temperature ceramic composites // Ceramics International. 2020. V. 46 (4). P. 5028–5036. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.10.246

References

1. Weibull W. (1951) A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*. 3(18) pp. 293–297. doi: 10.1115/1.4010337
2. Richerson D.W., Lee W.E. (2018) *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design*. Boca Raton: CRC Press. doi: 10.1201/9780429488245
3. Murthy D.N.P., Xie M., Jiang R. (2004) *Weibull Models*. New York: John Wiley & Sons.
4. Carlsson L.A., Adams D.F., Pipes R.B. (2014) *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*. Boca Raton: CRC Press.

5. Lu C. (2008) A reassessment of the strength distributions of advanced ceramics. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2(44). pp. 38–41.
6. Ono K. (2019) A simple estimation method of Weibull modulus and verification with strength data. *Applied Sciences*. 8(9). Article 1575. pp. 1–39. doi: 10.3390/app9081575
7. Danzer R., Supancic P., Pascual J., Lube T. (2007) Fracture statistics of ceramics–Weibull statistics and deviations from Weibull statistics. *Engineering Fracture Mechanics*. 8(18). pp. 2919–2932. doi: 10.1016/j.engfracmech.2006.05.028
8. Liu G., Meng S., An J., Sun S., Ding X. (2009) The evaluation of reliability for zirconium diboride composite with additives of graphite. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 5(27). pp. 868–871. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2009.04.003
9. Wang L., Kong D., Fang G., Liang J. (2017) High-temperature tensile strength and fracture behavior of ZrB₂–SiC–graphite composite. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 1(14). pp. 31–38. doi: 10.1111/ijac.12613
10. Makurunje P., Sigalas I., Binner J. (2021) Scale characterisation of an oxidised (Hf, Ti) C–SiC ultra-high temperature ceramic matrix composite. *Journal of the European Ceramic Society*. 1(41). pp. 167–175. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.08.048
11. Povolny S.J., Seidel G.D., Tallon C. (2022) Numerical investigation of thermomechanical response of multiscale porous ultra-High temperature ceramics. *Ceramics International*. 48(8). pp. 11502–11517. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.01.006
12. Grigoriev O.N., Galanov B.A., Kotenko V.A., Ivanov S.M., Koroteev A.V., Brodnikovskiy N.P. (2010) Mechanical properties of ZrB₂–SiC (ZrSi₂) ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 11(30). pp. 2173–2181. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.03.022
13. Zou J., Liu J., Zhao J., Zhang G.J., Huang S., Qian B., Vleugels J., Van der Biest O., Shen J.Z. (2014) A top-down approach to densify ZrB₂–SiC–BN composites with deeper homogeneity and improved reliability. *Chemical Engineering Journal*. 249. pp. 93–101. doi: 10.1016/j.cej.2014.03.089
14. Grigoriev O., Neshpor I., Vedel D., Mosina T., Silvestroni L. (2021) Influence of chromium diboride on the oxidation resistance of ZrB₂–MoSi₂ and ZrB₂–SiC ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 4(41). pp. 2207–2214. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.12.036
15. Sengupta P., Sahoo S.S., Bhattacharjee A., Basu S., Manna I. (2021) Effect of TiC addition on structure and properties of spark plasma sintered ZrB₂–SiC–TiC ultrahigh temperature ceramic composite. *Journal of Alloys and Compounds*. 850. Article 156668. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.156668
16. Kashyap S.K., Mitra R. (2021) Microstructure and composition of multi-layered oxide scale evolved during isothermal exposure of ZrB₂–SiC–LaB₆ composite to air at 1500° C. *Philosophical Magazine Letters*. 7(101). pp. 265–276. doi: 10.1080/09500839.2021.1912426
17. Kashyap S.K., Mitra R. (2020) Densification behavior involving creep during spark plasma sintering of ZrB₂–SiC based ultra-high temperature ceramic composites. *Ceramics International*. 4(46). pp. 5028–5036. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.10.246

Сведения об авторах:

Орданьян Сукяс Семенович – профессор кафедры химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), Санкт-Петербург, Россия.

Несмелов Дмитриевич – доцент кафедры химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dnesmelov@yandex.ru

Новоселов Евгений Сергеевич – инженер кафедры химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lehmann330@gmail.com

Information about the authors:

Ordan'yan Sukyas S. (Doctor of Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation).

Nesmelov Dmitriy D. (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: dnesmelov@yandex.ru

Novoselov Evgeniy S. (Engineer, Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: lehmann330@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11.03.2022; принята к публикации 31.03.2023

The article was submitted 11.03.2022; accepted for publication 31.03.2023