

УДК 620.171.2
DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4614
Шифр специальности ВАК: 2.6.5

Физико-механические свойства керамики на основе ZrN-ZrO₂, полученной методом искрового плазменного спекания

Е.Д. Кузьменко✉, С.В. Матренин, А.Р. Насырбаев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉kuzmenko70egor@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Повышение ресурса работы инструмента горнодобывающей отрасли является важной задачей в развитии геологии, связанной с разработкой новых керамических материалов функционального назначения. Возможность снизить износ и термическое и химическое воздействие пород на рабочие элементы горнопроходческого оборудования обуславливает вектор развития применения сверхтвердых, высокопрочных и тугоплавких керамик. Одновременно с этим ставится задача повышения показателей вязкости разрушения применяемых материалов для решения проблемы сохранения работоспособности оборудования в условиях критических деформаций. Для выполнения данной задачи необходимо исследование закономерностей консолидирования керамических материалов и поиск оптимального сочетания параметров консолидирования для достижения улучшенных физико-механических свойств. **Цель:** разработать метод получения высокоплотной прочной керамики на основе коммерчески доступных порошков нитрида циркония с применением искрового плазменного спекания в условиях вакуума, исследовать фазовый состав и физико-механические свойства полученных образцов с установлением зависимости механических свойств от достигаемой пористости образцов. **Методы:** рентгенофазовый анализ исследуемых образцов, наноиндентирование, микроскопический анализ. **Результаты.** Были изучены физико-механические свойства нитрида циркония, консолидированного методом искрового плазменного спекания при температуре 2000 °С, давлении 30–60 МПа и времени выдержки при заданной температуре 5–10 минут. Был проведен качественный и количественный рентгенофазовый анализ, в рамках которого определено содержание основной фазы нитрида циркония и фазы диоксида циркония. В ходе работы установлено, что увеличение прикладываемого при консолидации давления и времени выдержки способствует лучшему уплотнению и снижению пористости образцов с 8,52 до 2,72 %. Было установлено, что со снижением пористости модуль упругости увеличивался в интервале от 320 до 378 ГПа, а твердость от 7,3 до 10,4 ГПа. При этом экстраполированием данных было установлено, что беспористые образцы нитрида циркония будут иметь модуль упругости 395 ГПа, а твердость по Мартенсу 11,56 ГПа. Для исследуемых образцов были определены критические коэффициенты интенсивностей напряжений. Установлено, что при пористости меньше 5 % критический коэффициент интенсивности напряжений нитрида циркония, консолидированного методом искрового плазменного спекания, имеет значения не ниже 4 МПа·м^{1/2}.

Ключевые слова: нитрид циркония, керамика, искровое плазменное спекание, индентирование, пористость

Для цитирования: Кузьменко Е.Д., Матренин С.В., Насырбаев А.Р. Физико-механические свойства керамики на основе ZrN-ZrO₂, полученной методом искрового плазменного спекания // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 7. – С. 166–173. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4614

UDC 620.171.2
DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4614

Physical and mechanical properties of ceramics based on ZrN-ZrO₂ obtained by spark plasma sintering method

E.D. Kuzmenko✉, S.V. Matrenin, A.R. Nassyrbayev

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉kuzmenko70egor@yandex.ru

Abstract. Relevance. Increasing the service life of mining tools is an important task in the development of geology associated with the investigation of new ceramic materials for functional purposes. The ability to reduce wear and thermal and chemical effects of rocks on the working elements of mining equipment determines the vector of development of the use of super-hard, high-strength and refractory ceramics. The task is to increase the fracture toughness of the materials used to solve the problem of maintaining the operability of equipment under conditions of critical deformations. To accomplish this task, it is necessary to study the patterns of consolidation of ceramic materials and search for the optimal combination of consolidation parameters to achieve improved physical and mechanical properties. **Aim.** To develop a method for producing high-density durable ceramics based on commercially available zirconium nitride powders using spark plasma sintering under vacuum conditions, to study the phase composition and physical and mechanical properties of the resulting samples. **Methods.** X-ray phase analysis of the studied samples, nanoindentation, microscopic analysis. **Results and conclusion.** The authors have studied the physical and mechanical properties of zirconium nitride consolidated by spark plasma sintering at 2000°C, a pressure of 30–60 MPa and holding time at a given temperature of 5–10 minutes. Qualitative and quantitative X-ray phase analysis was carried out, within which the content of the main phase of zirconium nitride and zirconium dioxide phase was determined. It was found that an increase in the pressure applied during consolidation and holding time contributes to better compaction and a decrease in the porosity of the samples from 8.52 to 2.72%. It was found that with a decrease in porosity, the elastic modulus increased in the range from 320 to 378 GPa, and the hardness from 7.3 to 10.4 GPa. At the same time, by extrapolating the data, it was established that non-porous zirconium nitride samples will have an elastic modulus of 394 GPa and a martens hardness of 11.56 GPa. For the samples under study, critical stress intensity factors were determined. It was established that at a porosity of less than 5%, the critical stress intensity factor of zirconium nitride consolidated by spark plasma sintering has values of at least 4 MPa·m^{1/2}.

Keywords: zirconium nitride, ceramics, spark plasma sintering, indentation, porosity

For citation: Kuzmenko E.D., Matrenin S.V., Nassyrbayev A.R. Physical and mechanical properties of ceramics based on ZrN-ZrO₂ obtained by spark plasma sintering method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 7, pp. 166–173. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4614

Введение

Горный инструмент предназначен для оснащения исполнительных органов проходческих и очистных комбайнов. Влияние устойчивости данной части горных машин к механическому абразивному воздействию напрямую влияет на производительность и в значительной степени обуславливает качество получаемой продукции. Воздействие на горный инструмент возрастает при увеличении скорости резания и подачи комбайна, вызывая критические нагрузки на режущей кромке и её значительный износ. При этом при скоростях более 1,5 м/с достигаются критические температуры для твердых сплавов, вызывающие снижение твердости и, как следствие, нелинейное увеличение абразивного воздействия на инструмент [1]. Для решения данной проблемы актуально применять керамические материалы. Керамические материалы, как и твердые сплавы, производятся методами порошковой металлургии, обеспечивающими схожие способы получения инструмента. Перспективными материалами в классе инструментальных керамик являются соединения переходных металлов с азотом – нитриды. В ряду соединений ZrN-TiN-HfN выделяется нитрид циркония в связи с его высокой температурой плавления 2955 °С, значительной твердостью и стойкостью к агрессивным химическим средам [2]. Нитрид циркония имеет высокую электропроводность, что обеспечивает возможность его консолидации методом искрового плазменного спекания [3]. В литературе имеются данные о преимуществах различных методов консоли-

дации и их влиянии на плотность и прочность спекаемых образцов [4–8]. Одним из наиболее перспективных методов консолидации, обеспечивающих малую пористость образцов, является искровое плазменное спекание (ИПС).

ИПС в последние два десятилетия вызвало огромный интерес со стороны исследователей и инженеров, так что сейчас трудно представить развитие современного материаловедения без преимуществ, предлагаемых этим методом. ИПС использует комбинацию одноосного давления и импульсного постоянного тока для нагрева и спекания образца порошка, помещенного в матрицу, обычно изготовленную из графита [9]. Когда порошки, спрессованные в пресс-форме, являются проводящими, ток проходит непосредственно через образец и быстро нагревает материал. Непроводящие материалы обычно нагреваются за счет теплопроводности стенок матрицы. Роль импульсов включения-выключения заключается в создании расплавленных зон на межчастичных контактах, постоянно перемещающихся внутри образца во время цикла спекания.

Спекание проводится в вакууме, защищающем материалы от окисления и одновременно обеспечивающем процессы химического восстановления. Основным преимуществом метода ИПС перед традиционным спеканием без давления и горячим прессованием является возможность сокращения времени уплотнения, снижения температуры спекания и получения практически полностью плотных или полностью плотных материалов с ограниченным ростом зерна.

О высокой активности исследований в области ИПС в различных лабораториях свидетельствуют обзоры и научные статьи, в которых обсуждаются особенности и механизмы процесса [10–15].

Обеспечение высокой плотности консолидированных образцов ведет к улучшению механических свойств, в силу того, что остаточная пористость выступает в роли концентратора внутренних напряжений и центров зарождения хрупких трещин, ограничивающих возможности повышения эксплуатационных характеристик инструмента.

Цель исследования – разработать метод получения высокоплотной прочной керамики на основе коммерчески доступных порошков нитрида циркония с применением искрового плазменного спекания в условиях вакуума, исследовать фазовый состав и физико-механические свойства полученных образцов с установлением зависимости механических свойств от достигаемой пористости образцов.

Объекты и методика исследования

Коммерчески доступный порошок нитрида циркония был консолидирован методом ИПС в графитовых матрицах с диаметром 12,7 мм при скорости нагрева при следующих прикладываемых давлениях, температур спекания и времени выдержки при заданной температуре в условиях высокого вакуума:

- при давлении 30 МПа, температуре 2000 °С, времени выдержки 5 минут;
- при давлении 30 МПа, температуре 2000 °С, времени выдержки 10 минут;
- при давлении 60 МПа, температуре 2000 °С, времени выдержки 5 минут;
- при давлении 60 МПа, температуре 2000 °С, времени выдержки 10 минут.

Консолидированные образцы полировались на алмазном диске. Подготовленная поверхность образцов необходима для проведения дальнейшего рентгенофазового анализа, индентирования, микроскопического исследования наведенных трещин.

Рентгенофазовый анализ исследуемых образцов выполнялся на приборе Shimadzu. Расшифровка пиков дифрактограмм осуществлялась в программе PowderCell 2.4 с использованием карточек из базы данных Search Match. Индентирование выполнялось на приборе NanoIndenter G200. Методика измерений реализована по способу установления нагрузки и дальнейшего измерения вызываемого ею перемещения индентора. При индентировании были установлены твердости исследуемых образцов по Мартенсу и модули упругости. Нагрузка на индентор составила 500 мН, время приложения испытательной нагрузки 30 секунд, время выдержки под нагрузкой 10 секунд. Для определения трещиностойкости применялась зависимость Маршалла–Эванса [16]:

$$K_{IC} = 0,036 \cdot E^{0,4} \cdot P^{0,6} \cdot a^{-0,7} \cdot (c/a)^{-1,5}.$$

Трещины Палмквиста были получены на приборе ПМТ-3 при усилии 2 Ньютона. Измерение осуществлялось по схеме (рис. 1).

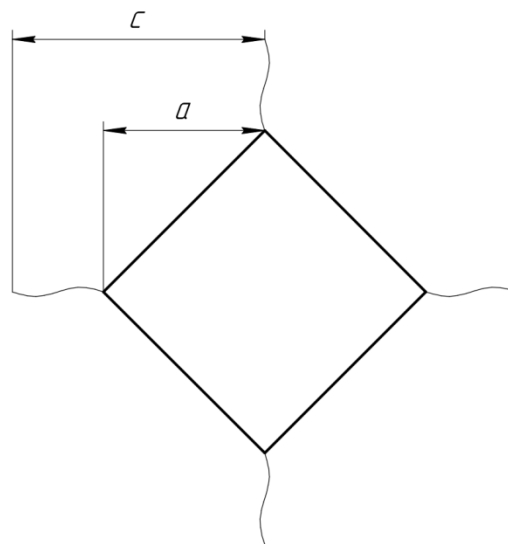


Рис. 1. Схема измерения наведенных трещин: c – длина наведенной трещины; a – половина диаметра отпечатка Виккерса

Fig. 1. Scheme for measuring induced cracks: c – length of induced crack; a – half the diameter of the Vickers imprint

Пористость образцов определялась с использованием установленных истинной и кажущейся плотностей. Истинная плотность рассчитывается по правилу аддитивности [17]:

$$\rho_c = \frac{100\rho_1\rho_2 \dots \rho_n}{P_1\rho_2\rho_3 \dots \rho_n + P_2\rho_1\rho_3 \dots \rho_n + P_n\rho_1\rho_2\rho_3 \dots \rho_{n-1}},$$

где $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ – плотность компонентов в беспористом состоянии, г/см³; $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ – процентное (по массе) содержание компонентов в смеси.

Результаты исследования и их обсуждение

Качественный рентгенофазовый анализ показал, что исследуемые консолидированные образцы, как и исходный порошок, содержали нитрид и диоксид циркония (рис. 2).

При проведении количественного рентгенофазового анализа по отношению высот интенсивностей дифракционных максимумов было установлено, что содержание остаточной оксидной фазы в матрице нитрида циркония для консолидируемых образцов увеличивается по сравнению с исходным порошком нитрида циркония, что свидетельствует об окислении в процессе консолидации. В ходе количественного рентгенофазового анализа было

установлено, что содержание диоксида циркония в исследуемых образцах находится в пределах от 5,7 до 11,8 % (таблица).

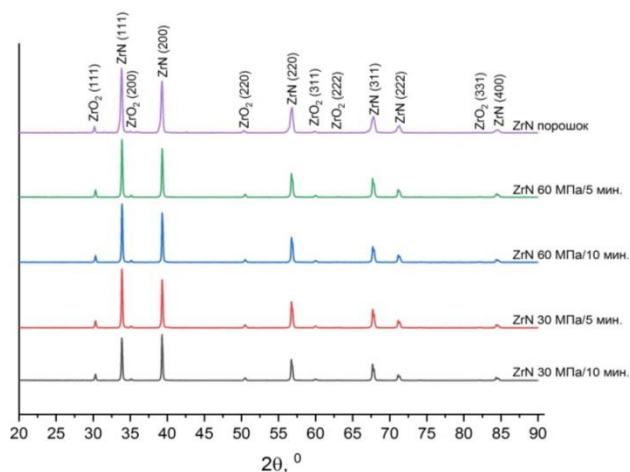


Рис. 2. Дифрактограммы исследуемых образцов и исходного порошка

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the studied samples and the original powder

Таблица. Количественный рентгенофазовый анализ

Table. Quantitative X-ray phase analysis

Давление, МПа Pressure, MPa	Выдержка при заданной температуре, мин. Holding time at a given temperature, min.	Содержание Content, %	
		ZrN	ZrO ₂
ZrN порошок/ZrN powder		94,3	5,7
ZrN 60	5	90,3	9,7
ZrN 60	10	92,8	7,2
ZrN 30	5	90,1	9,9
ZrN 30	10	88,2	11,8

С использованием прибора NanoIndenter G200 были определены механические свойства образцов: модуль упругости и твердость по Мартенсу. Для определения модулей упругости исследуемых образцов программное обеспечение NanoIndenter G200 анализирует кривую нагружения образца, а именно часть кривой, соответствующей снятию нагрузки. Кривые нагружения исследуемых образцов представлены на рис. 3.

Среди полученных кривых нагружения наибольшим углом наклона обладает кривая нагружения, построенная при индентировании образца, консолидированного при давлении 60 МПа с выдержкой 10 минут при заданной температуре 2000 °С. Это свидетельствует о наибольшем модуле упругости среди исследуемых образцов. При этом также для данного образца характерна наименьшая глубина индентирования, что свидетельствует и о его наибольшей твердости.

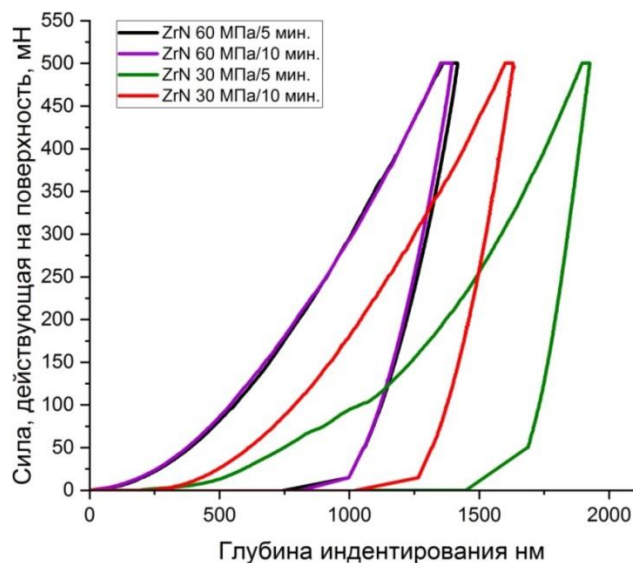


Рис. 3. Кривая нагружения исследуемых образцов

Fig. 3. Loading curve of the samples under study

Для исследуемых образцов были получены следующие данные значений модулей упругости (рис. 4). Отклонение данных при измерении модуля упругости связано с попаданием индентора в поры, имеющиеся на исследуемой поверхности образцов.

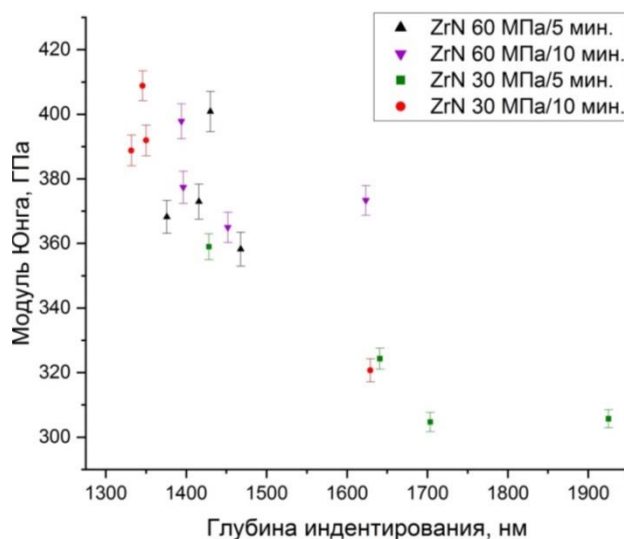


Рис. 4. Модули упругости исследуемых образцов

Fig. 4. Elastic moduli of the studied samples

Были определены плотности спеченных образцов в компактном состоянии (кажущиеся плотности) с использованием базовых физических параметров образцов: массы и плотности. Истинная плотность нитрида циркония в беспористом состоянии установлена по литературным данным [18]:

$$\rho_{\text{ZrN}} = 7,09 \text{ г/см}^3.$$

На основании установленных плотностей были определены относительные пористости исследуемых образцов (рис. 5).

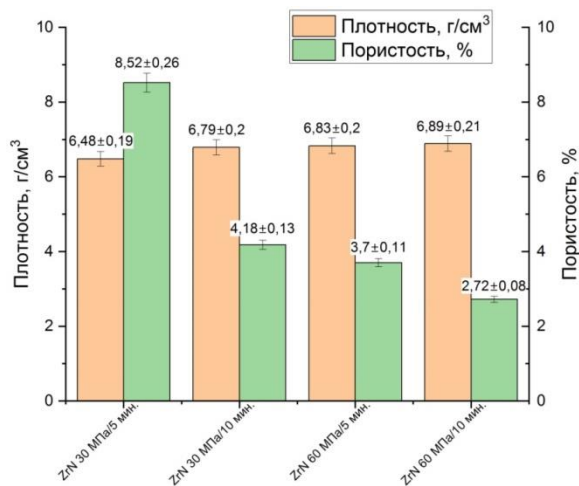


Рис. 5. Кажущаяся плотность и пористость исследуемых образцов, %

Fig. 5. Apparent density and porosity of the studied samples, %

Было установлено, что с увеличением времени и прикладываемого давления плотность образцов возрастает, пористость снижается, что, согласно [1], должно положительно сказаться на механических свойствах исследуемых образцов в силу снижения внутренних напряжений.

Зависимость твердости от пористости показана на рис. 6.

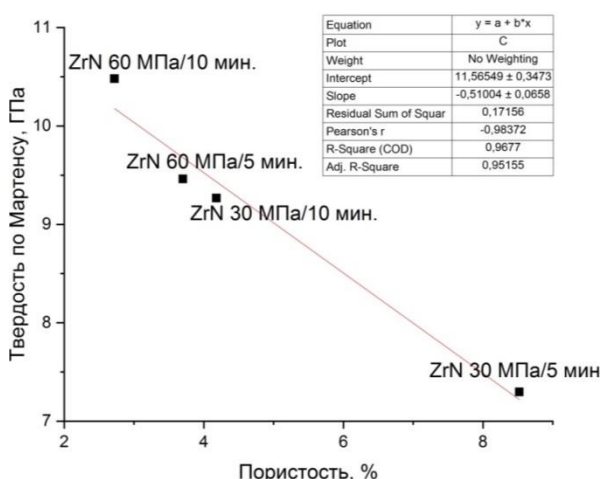


Рис. 6. Зависимость твердости от пористости

Fig. 6. Dependence of hardness on porosity

Было установлено, что при снижении пористости достигается наибольшая твердость. Наблюда-

ется прямо пропорциональная зависимость твердость–пористость. Для исследуемых образцов значения твердости находились в интервале от 7,3 ГПа до 10,4 ГПа. При экстраполировании данных было установлено, что беспористый образец будет иметь твердость по Мартенсу 11,56 ГПа.

Зависимость модуля упругости от пористости показана на рис. 7.

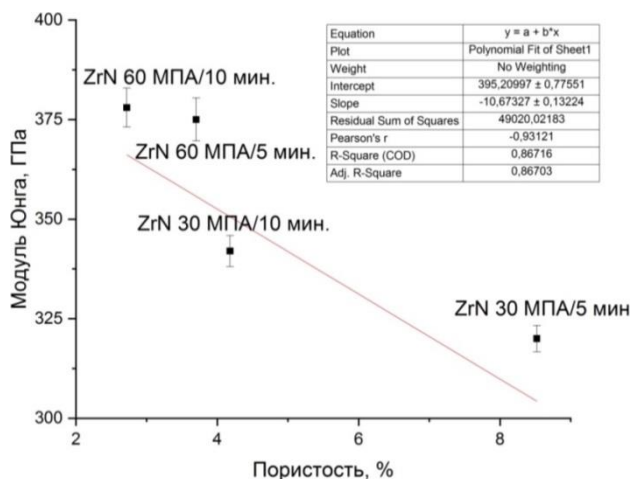


Рис. 7. Зависимость модуля Юнга от пористости

Fig. 7. Dependence of Young's modulus on porosity

Также было установлено, что при снижении пористости достигается наибольший модуль Юнга. Наблюдается прямо пропорциональная зависимость модуль Юнга – пористость. Для исследуемых образцов значения модуля Юнга находились в интервале от 320 до 378 ГПа. При экстраполировании данных было установлено, что беспористый образец будет иметь модуль Юнга 395 ГПа.

Для определения параметров вязкости разрушения исследуемых образцов был применен метод индентирования. Изображение наведенной трещины на исследуемом образце представлено на рис. 8.

При индентировании пирамиды Виккерса с усилием 2 Ньютона были наведены радиальные трещины.

С использованием полученных данных были определены количественные показатели трещиностойкости – критические коэффициенты интенсивности напряжений. Зависимость критического коэффициента интенсивности напряжений от пористости показана на рис. 9.

Было установлено, что при снижении пористости критический коэффициент интенсивности напряжений достигает 4,13 МПа·м^{1/2}, при этом полученные параметры трещиностойкости выходят на данный уровень при пористости меньше 5 %, и незначительно снижается для наиболее плотного образца до 3,97 МПа·м^{1/2}. С учетом установленной

погрешности следует отметить достижение плато в данном интервале плотностей, следовательно, для беспористого образца критический коэффициент интенсивности напряжений также должен составить $4,13 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

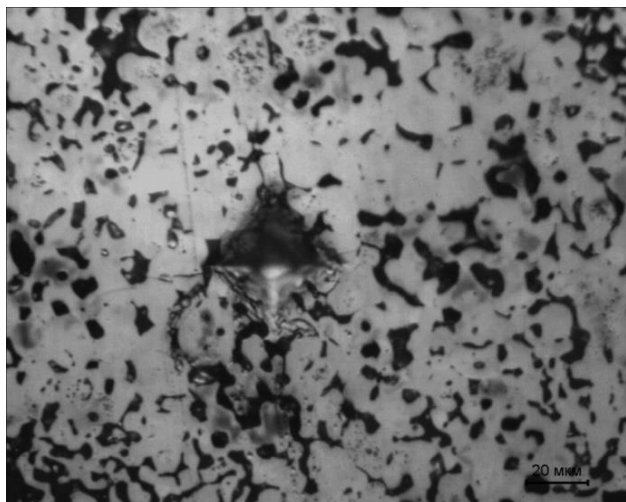


Рис. 8. Отпечаток индентора на поверхности образца при нагрузке 200 г

Fig. 8. Indenter imprint on the sample surface at a load of 200 g

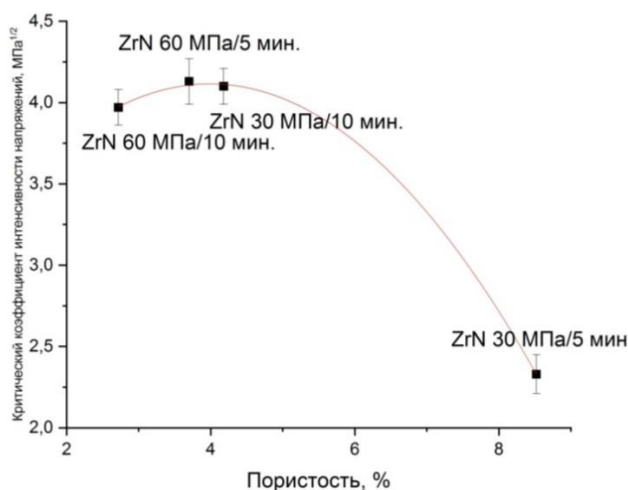


Рис. 9. Зависимость критического коэффициента интенсивности напряжений от пористости

Fig. 9. Dependence of the critical stress intensity factor on porosity

Заключение

В ходе исследования было установлено, что содержание остаточной оксидной фазы в матрице нитрида циркония для консолидируемых образцов увеличивается по сравнению с исходным порошком нитрида циркония, что свидетельствует об окислении в процессе консолидации, однако пори-

стость оказывает большее влияние на достигаемые механические свойства по сравнению с влиянием содержания оксидной фазы. Снижение пористости материала обусловлено увеличением прикладываемого при консолидации давления и времени выдержки, способствующих лучшему уплотнению образцов. Так, при применяемых в работе давлении и временем выдержки пористость исследуемых образцов снижается с 8,52 до 2,72 %. При этом с уменьшением пористости образцов возрастают их механические свойства, такие как модуль Юнга и твердость. Показано, что с уменьшением пористости модуль упругости увеличивался в интервале от 320 до 378 ГПа, а твердость – от 7,3 до 10,4 ГПа. При этом с экстраполированием данных было установлено, что беспористые образцы нитрида циркония будут иметь модуль упругости 395 ГПа, а твердость по Мартенсу – 11,56 ГПа. Для исследуемых образцов были определены критические коэффициенты интенсивностей напряжений. Установлено, что при пористости меньше 5 % критический коэффициент интенсивности напряжений нитрида циркония, консолидированного методом искрового плазменного спекания, не ниже $4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Полученные данные механических свойств керамики подтверждаются рядом научных исследований по смежным тематикам. В исследованиях ученых N. Alexandre и M. Desmaison-Brut были определены модули Юнга керамики на основе нитрида циркония, полученной методом горячего изостатического прессования при давлении 195 МПа и температуре 2223 К. Измерения модуля упругости в данной статье были проведены с учетом зависимости данного параметра от пористости. Образцы с малой пористостью (1 %) имели модуль Юнга 390 ГПа, уменьшающийся до 290 ГПа с увеличением пористости (8 %) [19].

J. Adachi с соавторами измеряли модули упругости для нитрида циркония, спекленного методом искрового плазменного спекания. Авторы наблюдали схожую картину, для образца с пористостью 8 % модуль упругости составил 288 ГПа, который уменьшился до 156 ГПа при возрастании пористости до 18 %. При этом Adachi с соавторами также уделяли внимание зависимости твердости от пористости. Для образца с пористостью 8 % твердость составила 10 ГПа, которая уменьшилась до 5 ГПа при возрастании пористости до 18 % [20].

A. Eskandariyun с соавторами наблюдали увеличение твердости образцов нитрида циркония, спекленных методом мгновенного спекания (метод близок к искровому плазменному спеканию) с увеличением времени выдержки образцов. Авторы зафиксировали увеличение твердости до 9,8 ГПа [3].

В проведенной работе по сравнению с представленными исследованиями у образцов нитрида

циркония достигнуты большие твердости, что положительно отразится при введении данной технологии в промышленное использование при производстве горного инструмента.

Увеличение прикладываемого давления и времени выдержки при заданной температуре 2000 °C

при консолидации методом искрового плазменного спекания нитрида циркония вызывает снижение пористости образцов до 2,72 %, увеличение твердости по Мартенсу – до 10,4 ГПа, модуля упругости – до 378 ГПа, критического коэффициента интенсивности напряжений – до 4,13 МПа·м^{1/2}.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков П.В., Бурков В.П. Исследование влияние технологии изготовления твердосплавных вставок на качество горного инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 3. – № 12. – С. 125–130.
2. Reactive laser synthesis of ultra-high-temperature ceramics HfC, ZrC, TiC, HfN, ZrN, and TiN for additive manufacturing / A.B. Peters, C. Wang, D. Zhang, A. Hernandez, D.C. Nagle, T. Mueller, J.B. Spicer // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49. – № 7. – P. 11204–11229.
3. Effects of processing conditions on flash sintering of commercial ZrN / A. Eskandariyun, S. Das, D. Dubois, K. Saeedian, A. Durygin, V. Drozd, Z. Cheng // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2024. – Vol. 107. – P. 3735–3750.
4. Almeida T.F., Gonçalves M.P., Kiminami R.H. Microstructure and dielectric properties of hexagonal boron nitride prepared by hot pressing (uniaxial and isostatic) and by spark plasma sintering // *Advances in Applied Ceramics*. – 2020. – Vol. 119. – № 1. – P. 41–48.
5. Extremely hard and tough high entropy nitride ceramics / D. Moskovskikh, S. Vorotilo, V. Buinevich, A. Sedegov, K. Kuskov, A. Khort, A. Mukasyan // *Scientific reports*. – 2020. – Vol. 10. – № 1. – P. 19874.
6. Liang A., Liu C., Brancio P.S. Hot-press sintering of aluminum nitride nanoceramics // *Physical Review Materials*. – 2021. – Vol. 5. – № 9. – P. 096001.
7. Electron microscopy study of ZrB₂-SiC-AlN composites: hot-pressing vs. pressureless sintering / C. Xia, S.A. Delbari, Z. Ahmadi, M.S. Asl, M.G. Kakroudi, Q. van Le, M. Shokouhimehr // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46. – № 18. – P. 29334–29338.
8. Physical, mechanical and microstructural characterization of TiC-ZrN ceramics / T.P. Nguyen, Y. Pazhouhanfar, S.A. Delbari, A.S. Namini, A. Babapoor, Y. Mohammadpourderakhshi, M.S. Asl // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46. – № 14. – P. 22154–22163.
9. Tokita M. Progress of spark plasma sintering (SPS) method, systems, ceramics applications and industrialization // *Ceramics*. – 2021. – Vol. 4. – № 2. – С. 160–198.
10. Review of flash sintering with strong electric field / H. Zhou, X. Li, Y. Zhu, J. Liu, A. Wu, G. Ma, L. Wang // *High Voltage*. – 2022. – Vol. 7. – № 1. – P. 1–11.
11. Stuer M., Bowen P., Zhao Z. Spark plasma sintering of ceramics: from modeling to practice // *Ceramics*. – 2020. – Vol. 3. – № 4. – P. 476–493.
12. Munir Z.A., Ohyanagi M. Perspectives on the spark plasma sintering process // *Journal of Materials Science*. – 2021. – Vol. 56. – № 1. – P. 1–15.
13. Investigation of consolidation mechanisms induced by applied electric/electromagnetic fields during the early stages of spark plasma sintering / A. Aliouat, G. Antou, N. Pradeilles, V. Rat, A. Maitre // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – Vol. 963. – P. 171276.
14. Tan H., Zhang H., Salamon D. Densification behavior and mechanical properties of nano-alumina ceramics prepared by Spark Plasma Sintering with pressure applied at different sintering stages // *Ceramics International*. – 2022. – Vol. 48. – № 20. – P. 30224–30228.
15. Markov A.A. Model of SPS two-stadium synthesis and densification reactor applied for ultrafine zirconium nitride powder // *Materials Science Forum*. – 2023. – Vol. 1085. – P. 113–118.
16. Moradkhani A., Panahzadeh V., Hoseinpour M. Indentation fracture resistance of brittle materials using irregular cracks: a review // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9. – № 9. – 12 p.
17. Матренин С.В., Слосман А.И. Техническая керамика. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 75 с.
18. Самсонов Г.В., Виноцкий И.М. Тугоплавкие соединения: справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
19. Mechanical properties of hot isostatically pressed zirconium nitride materials / N. Alexandre, M. Desmaison-Brut, F. Valin, M. Boncoeur // *Journal of materials science*. – 1993. – Vol. 28. – P. 2385–2390.
20. Effect of porosity on thermal and electrical properties of polycrystalline bulk ZrN prepared by spark plasma sintering / J. Adachi, K. Kurosaki, M. Uno, S. Yamanaka // *Journal of alloys and compounds*. – 2007. – Vol. 432. – № 2. – P. 7–10.

Информация об авторах

Егор Дмитриевич Кузьменко, магистрант Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. kuzmenko70egor@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7995-9776>

Сергей Вениаминович Матренин, кандидат технических наук, доцент отделения материаловедения в машиностроении Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vms@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2188-8120>

Артур Ринатович Насырбаев, ассистент Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. arn1@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4761-8863>

Поступила в редакцию: 20.03.2024

Поступила после рецензирования: 05.06.2024

Принята к публикации: 14.06.2024

REFERENCES

1. Burkov P.V., Burkov V.P. Study of the influence of the technology for manufacturing carbide inserts on the quality of mining tools. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2010, vol. 3 (12), pp. 125–130.
2. Peters A.B., Wang C., Zhang D., Hernandez A., Nagle D.C., Mueller T., Spicer J.B. Reactive laser synthesis of ultra-high-temperature ceramics HfC, ZrC, TiC, HfN, ZrN, and TiN for additive manufacturing. *Ceramics International*, 2023, vol. 49 (7), pp. 11204–11229.
3. Eskandariyun A., Das S., Dubois D., Saeedian K., Durygin A., Drozd V., Cheng Z. Effects of processing conditions on flash sintering of commercial ZrN. *Journal of the American Ceramic Society*, 2024, vol. 107, pp. 3735–3750.
4. Almeida T.F., Gonçalves M.P., Kiminami R.H. Microstructure and dielectric properties of hexagonal boron nitride prepared by hot pressing (uniaxial and isostatic) and by spark plasma sintering. *Advances in Applied Ceramics*, 2020, vol. 119 (1), pp. 41–48.
5. Moskovskikh D., Vorotilo S., Buinevich V., Sedegov A., Kuskov K., Khort A., Mukasyan A. Extremely hard and tough high entropy nitride ceramics. *Scientific reports*, 2020, vol. 10 (1), 19874.
6. Liang A., Liu C., Brancio P.S. Hot-press sintering of aluminum nitride nanoceramics. *Physical Review Materials*, 2021, vol. 5 (9), 096001.
7. Xia C., Delbari S.A., Ahmadi Z., Asl M.S., Kakroudi M.G., Van Le Q., Shokouhimehr M. Electron microscopy study of ZrB₂-SiC-AlN composites: hot-pressing vs. pressureless sintering. *Ceramics International*, 2020, vol. 46 (18), pp. 29334–29338.
8. Nguyen T.P., Pazhouhanfar Y., Delbari S.A., Namini A.S., Babapoor A., Mohammadpourderakhshi Y., Asl M.S. Physical, mechanical and microstructural characterization of TiC-ZrN ceramics. *Ceramics International*, 2020, vol. 46 (14), pp. 22154–22163.
9. Tokita M. Progress of spark plasma sintering (SPS) method, systems, ceramics applications and industrialization. *Ceramics*, 2021, vol. 4 (2), pp. 160–198.
10. Zhou H., Li X., Zhu Y., Liu J., Wu A., Ma G., Wang L. Review of flash sintering with strong electric field. *High Voltage*, 2022, vol. 7 (1), pp. 1–11.
11. Stuer M., Bowen P., Zhao Z. Spark plasma sintering of ceramics: from modeling to practice. *Ceramics*, 2020, vol. 3 (4), pp. 476–493.
12. Munir Z.A., Ohyanagi M. Perspectives on the spark plasma sintering process. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56 (1), pp. 1–15.
13. Aliouat A., Antou G., Pradeilles N., Rat V., Maitre A. Investigation of consolidation mechanisms induced by applied electric/electromagnetic fields during the early stages of spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 963, 171276.
14. Tan H., Zhang H., Salamon D. Densification behavior and mechanical properties of nano-alumina ceramics prepared by Spark Plasma Sintering with pressure applied at different sintering stages. *Ceramics International*, 2022, vol. 48 (20), pp. 30224–30228.
15. Markov A. A. Model of SPS two-stadium synthesis and densification reactor applied for ultrafine zirconium nitride powder. *Materials Science Forum*, 2023, vol. 1085, pp. 113–118.
16. Moradkhani A., Panahizadeh V., Hoseinpour M. Indentation fracture resistance of brittle materials using irregular cracks: a review. *Heliyon*, 2023, vol. 9 (9), 12 p.
17. Matrenin S.V., Slosman A.I. *Technical ceramics*. Tomsk, TPU Publ. house, 2004. 75 p. (In Russ.)
18. Samsonov G.V., Vinitsky I.M. *Refractory compounds: a reference book*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 560 p. (In Russ.)
19. Alexandre N., Desmaison-Brut M., Valin F., Boncoeur M. Mechanical properties of hot isostatically pressed zirconium nitride materials. *Journal of materials science*, 1993, vol. 28, pp. 2385–2390.
20. Adachi J., Kurosaki K., Uno M., Yamanaka S. Effect of porosity on thermal and electrical properties of polycrystalline bulk ZrN prepared by spark plasma sintering. *Journal of alloys and compounds*, 2007, vol. 432 (2), pp. 7–10.

Information about the authors

Egor D. Kuzmenko, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. kuzmenko70egor@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7995-9776>

Sergey V. Matrenin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vm-s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2188-8120>

Artur R. Nasyrbayev, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. arn1@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4761-8863>

Received: 20.03.2024

Revised: 05.06.2024

Accepted: 14.06.2024