

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ И ТВЕРДОСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Г.М. Квашнин, Д.А. Овсянников, Б.П. Сорокин, М.Ю. Попов

Геннадий Михайлович Квашнин, Данила Алексеевич Овсянников *, Борис Павлович Сорокин, Михаил Юрьевич Попов

Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: genmih@yandex.ru, dao@tisnum.ru*, bpsorokin1953@yandex.ru, mikhail.popov@tisnum.ru

В работе исследованы упругие свойства и прочностные характеристики углеродных материалов, полученных на основе производных фаз 3D-полимеризованного фуллерита, а также керамических материалов на основе карбида бора и фуллерена C₆₀. Использовали метод горячего прессования в камерах типа "Тороид", варьируя операционное давление, время и температуру спекания. Были разработаны методики синтеза таких материалов с применением катализаторов на основе сероуглерода CS₂ и тиофена C₄H₄S. Для исследования упругости использовали ультразвуковой метод длинного импульса на частотах 10 ... 50 МГц. При комнатной температуре были измерены фазовые скорости объемных акустических волн продольного и сдвигового типов, значения которых были затем использованы для расчёта модулей упругости и коэффициента Пуассона (в изотропном приближении). Экспериментально исследованы твердость (для индентирования использовали пирамиду Виккерса) и трещиностойкость образцов, синтезированных в различных условиях. Показано, что увеличение операционного давления приводит к улучшению упругих свойств керамик составов В₄С и 50% В₄С&50% С₆₀, синтезированных с применением катализаторов, при этом лучшие результаты получены с использованием сероуглерода. Сравнение керамик В₄С, синтезированных с использованием катализаторов и без них, показало, что применение катализатора улучшает трещиностойкость. Сравнение упругих свойств образцов фуллеритов показало, что получение более жестких материалов этого ряда, прежде всего, связано с увеличением давления, а не с увеличением температуры и продолжительности синтеза. Более высокие значения твердости как для керамик на основе В₄С, так и фуллеритов хорошо коррелируют с увеличением модулей упругости.

Ключевые слова: упругие свойства, твердость, горячее прессование, фуллерит, карбид бора, сероуглерод, тиофен

INVESTIGATION OF ELASTIC PROPERTIES AND HARDNESS OF NANOSTRUCTURED CARBON MATERIALS

G.M. Kvashnin, D.A. Ovsyannikov, B.P. Sorokin, M.Yu. Popov

Gennady M. Kvashnin, Danila A. Ovsyannikov *, Boris P. Sorokin, Mikhail Yu. Popov

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

E-mail: genmih@yandex.ru, dao@tisnum.ru*, bpsorokin1953@yandex.ru, mikhail.popov@tisnum.ru

The elastic properties and strength characteristics of carbon materials obtained on the basis of phase derivatives of 3D-polymerized fullerite, as well as ceramic materials based on boron carbide and fullerene C₆₀ are investigated. The method of hot pressing in "Toroid" type chambers was used, varying the operating pressure, sintering time and temperature. Methods have been developed for the synthesis of such materials using catalysts based on carbon disulfide CS₂ and thiophene C₄H₄S. To study the elasticity, the ultrasonic method of a long pulse at frequencies of 10 ... 50 MHz was used. At room temperature, the phase velocities of bulk acoustic waves of longitudinal and shear types were measured, then the values of which were used calculating the elastic modulus and

Poisson's ratio (in the isotropic approximation). The hardness (Vickers pyramid was used for indentation) and crack resistance of samples synthesized under various conditions were experimentally investigated. It is shown that an increase in operating pressure leads to an improvement in the elastic properties of ceramics of compositions B_4C and 50% B_4C &50% C_{60} synthesized using catalysts, while the best results were obtained using carbon disulfide. Comparison of B_4C ceramics synthesized with and without catalysts showed that the use of a catalyst improves crack resistance. Comparison of the elastic properties of fullerite samples showed that the production of more rigid materials of this series is primarily associated with an increase in pressure, and not with an increase in temperature and duration of synthesis. Higher hardness values for both B_4C -based ceramics and fullerites correlate well with an increase in elastic modulus.

Key words: elastic properties, hardness, hot pressing, fullerite, boron carbide, carbon disulfide, thiophene

Для цитирования:

Квашнин Г.М., Овсянников Д.А., Сорокин Б.П., Попов М.Ю. Исследование упругих свойств и твердости наноструктурированных углеродных материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 12. С. 66–70

For citation:

Kvashnin G.M., Ovsyannikov D.A., Sorokin B.P., Popov M.Yu. Investigation of elastic properties and hardness of nanostructured carbon materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 12. P. 66–70

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое количество исследований было посвящено новым сверхтвердым материалам и их применению как в научных, так и в практических целях [1-11]. Сверхтвердые материалы имеют большое значение в различных областях промышленности в качестве износостойких покрытий, абразивных материалов, в качестве инструментов для огранки и полировки и др. Одной из приоритетных задач современного материаловедения являются поиск и создание новых высокопрочных материалов и экономически выгодных методов их получения. На сегодняшний день материалы на основе корунда и алмаза занимают лидирующее положение в промышленности. Алмаз до сих пор считается самым твердым материалом из известных веществ, применяемых в промышленности, с самыми высокими скоростями звука и модулями упругости. Тем не менее, применимость алмаза ограничена из-за его химической активности по отношению к черным металлам и склонности к окислению при повышенных температурах. Таким образом, поиск и синтез новых высокопрочных и сверхтвердых материалов с твердостью, сравнимой или даже тверже, чем у алмаза, является важной задачей.

На сегодняшний день существуют сверхтвердые материалы на основе углерода, такие как ультратвердый фуллерит [3]. Однако природа ультратвердости фуллерита, который, согласно экспериментальным данным, является более твердым веществом, чем алмаз, до сих пор не получила объяснения. Одной из причин является проблема по-

лучения фуллерита с воспроизводимыми свойствами, связанная с технологией синтеза в условиях высокого давления.

Проблема создания материалов, превосходящих по механическим свойствам алмаз, широко обсуждается [12], начиная с расчета модуля объемного сжатия отдельной молекулы фуллерена (903 ГПа) и гипотетического материала, образованного из молекул C_{60} (668 ГПа) [13], и последующего открытия ультратвердого фуллерита [3], имеющего еще более высокий модуль объемного сжатия (от 500 до 1000 ГПа в зависимости от структуры и условий синтеза).

Ультратвердый фуллерит – это полимеризованный фуллерит, полученный благодаря применению технологии НРНТ (High Pressure High Temperature). Полимеры, сформированные при давлении 13-18 ГПа, имели трехмерную молекулярную сетку и демонстрировали некоторые интересные свойства, такие как необычно высокая твердость. Ультратвердый фуллерит обладал твердостью 200-300 ГПа и модулем объемного сжатия 500-1000 ГПа, превышающим таковые у алмаза (150 ГПа и 443 ГПа соответственно) [3].

Также был открыт метод получения 3D-полимеризованного фуллерита при меньших давлениях за счет добавления катализатора. Таким катализатором оказался сероуглерод CS_2 [8-10]. Он образует твердый раствор с молекулярным кристаллом фуллерена и имеет насыщение до 7%. Сероуглерод подвергается разложению при температурах выше 1100 °С, выделяя при этом элементарную серу, которая действует как инициатор разветвленной полимерной цепи. Таким образом, использова-

ние CS₂ позволило получить объемные образцы полимеризованного фуллерена с выдающимися свойствами [14].

В работах [15, 16] были получены образцы высокотвердой керамики на основе полимеризованного фуллерита и карбида бора в присутствии катализатора CS₂. Также были проведены исследования по модификации углеродных композитов за счет полимеризации фуллерена с целью улучшения их прочностных характеристик [17,18].

Прочностные характеристики, такие как твердость, напрямую связаны с силовыми константами кристаллической решетки исследуемого материала. Особенностью ультратвердого фуллерита является то, что в молекуле C₆₀ отсутствуют оси симметрии 4-го или 6-го порядков. Поэтому построить кристалл, состоящий из молекул C₆₀, ковалентно связанных бесконечной трансляцией в трех направлениях, невозможно. По данным работы [19], ультратвердый фуллерит имеет, по меньшей мере, 70% таких связей. Подобные структуры обозначаются как углеродные нанокластерные фазы, для которых нет теоретического описания механизмов, подобных наблюдаемым в кристаллических структурах. Примером углеродного кристалла с полностью sp³-связанным состоянием является алмаз, который уникален тем, что теоретическое предельное сдвиговое напряжение равно экспериментальному значению предела текучести и сдвиговому напряжению, при котором решетка алмаза теряет устойчивость, и начинается фазовый переход [20], и также равно напряжению, при котором начинается движение дислокаций [21]. Следовательно, фактически прочность и твердость алмаза определяются его упругими модулями 2-го и 3-го порядков. Последние определяют характер и величину отклонений поведения образцов от закона Гука [22, 23].

Для керамических материалов также существует тесная корреляция между модулем упругости и прочностью керамических материалов [24].

Основной задачей данной работы является экспериментальное изучение корреляции между упругими модулями, твердостью, а также методами синтеза экспериментальных образцов на основе наноструктурированных углеродных материалов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе проведен сравнительный анализ механических характеристик углеродных материалов, полученных на основе полимеризованного фуллерита, и карбида бора при различных способах спекания. Измерены скорости звука, упругие модули и микротвердость полученных образцов.

В целях снижения величины операционного давления нами была применена полимеризация образцов наноструктурированных углеродных материалов – фуллеритов и карбида бора (с добавлением фуллерена), используя катализаторы, содержащие серу (сероуглерод CS₂ или тиофен C₄H₄S). Образцы подвергались горячему прессованию в камерах типа "Тороид" при различных давлениях, временах и температурах спекания (табл. 1).

Для исследования упругих свойств с помощью ультразвуковой установки RITEC RAM-5000 измеряли скорости продольной V_L и сдвиговой V_S объемных акустических волн (ОАВ). Использован импульсно-фазовый метод в диапазоне частот 10-50 МГц. Длительность и амплитуда радиоимпульса составляли 5 мкс и 100 В соответственно. Образцы представляли собой пластины или цилиндры с двумя параллельными плоскостями толщиной от 1,8 до 3 мм с отклонением от плоскопараллельности ±2-3 мкм.

Таблица 1

Образцы для исследований
Table 1. Samples for studying

№	Состав для спекания	ρ, кг/м ³	P, ГПа	t, мин	T, °C
1	C ₆₀ &CS ₂	2106±10	5	0.5	1400
2	C ₆₀ &C ₄ H ₄ S	2060±10	5	0.5	1000
3	C ₆₀ &CS ₂	2050±10	8	3	1000
4	C ₆₀	3100±70	13	-	1400
5	B ₄ C&C ₄ H ₄ S	2218±10	2,5	5	1000
6	B ₄ C&C ₄ H ₄ S	2268±10	5	3	1000
7	50% B ₄ C&50% C ₆₀ &C ₄ H ₄ S	2143±10	4,5	2	1000
8	50% B ₄ C&50% C ₆₀ &CS ₂	2477±2	5	2	1000

Примечание: Здесь ρ – плотность образцов; P, t и T – операционное давление, длительность и температура синтеза соответственно

Note: Here ρ is the density of the samples; P, t and T - operating pressure, duration and temperature of synthesis, respectively

Упругие модули C_{11} , C_{12} и C_{44} были рассчитаны в изотропном приближении с помощью соотношений:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \rho V_L^2, \\ C_{44} &= \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) = \rho V_S^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – плотность материала. Исходя из погрешности определения скоростей ОАВ, точность вычисления модулей упругости оценивается как 5-7%. Были также рассчитаны модули Юнга E , сдвига G и всестороннего сжатия K , и коэффициент Пуассона ν , используя известные соотношения для изотропной упругой среды:

$$\begin{aligned} E &= \frac{C_{44}(3C_{11} - 4C_{44})}{C_{11} - C_{44}}, \\ G &= C_{44}, \\ K &= \frac{1}{3}(C_{11} + 2C_{12}) = \frac{1}{3}(3C_{11} - 4C_{44}), \\ \nu &= \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}} = \frac{1}{2} \frac{C_{11} - 2C_{44}}{C_{11} - C_{44}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Микротвердость H измеряли с помощью индентирования пирамидой Виккерса с нагрузками от 1 до 10 Н. Образцы имели упругое восстановление отпечатков более 90%. Твердость измеренных образцов приведена в табл. 2. Образцы керамики V_4C , синтезированной с применением катализаторов, имеют высокую трещиностойкость $K_C = 12 \pm 3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Результаты по упругим свойствам и микротвердости приведены в табл. 2. В последней

строке таблицы для сравнения приводятся ранее опубликованные данные [25] по упругим свойствам горячепрессованной керамики на основе чистого карбида бора с плотностью 2510-2550 кг/м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение результатов по образцам № 5 и 6 показывает, что увеличение операционного давления приводит к улучшению упругих свойств керамики V_4C . Исследование керамик состава 50% V_4C & 50% C_{60} , синтезированных с применением тиофена или сероуглерода (образцы № 7 и 8 соответственно) указывает на улучшение упругих свойств при использовании сероуглерода. Однако горячепрессованная при давлении 5 ГПа керамика V_4C является более плотной с более высокими характеристиками упругости. Сравнение упругих свойств образцов фуллеритов № 1, 2, 3 и 4 показывает, что получение более жестких материалов этого ряда, прежде всего, связано с увеличением давления, а не с увеличением температуры и продолжительности синтеза. Более высокие значения твердости как для керамик на основе V_4C , так и фуллеритов хорошо коррелируют с увеличением модулей упругости. Интересно, что в образце № 3 обнаружено малое значение упругого модуля C_{12} и, соответственно, коэффициента Пуассона ν , т.е. такие образцы при одноосном сжатии практически не деформируются в поперечных к оси давления направлениях.

Таблица 2

Скорости ОАВ, упругие модули (ГПа), коэффициент Пуассона и микротвердость H (ГПа) исследованных образцов при комнатной температуре

Table 2. BAW phase velocities, elastic constants (in GPa), Poisson's coefficient and hardness H (in GPa) of the investigated samples at room temperature

Образец №	Скорости ОАВ, м/с		C_{11}	C_{12}	$G = C_{44}$	E	K	ν	H
	L	S							
1	5460	3420	62,8	13,6	24,6	58,0	30,0	0,18	7±1
2	6270	4180	81,0	9,0	36,0	79,2	33,0	0,1	14±2
3	5800	4000	69,0	3,40	32,8	68,9	25,3	0,05	10±2
4	16590	10980	852,7	105,3	373,7	829,6	354,4	0,11	-
5	8030	4930	143,0	35,2	53,9	129,1	71,1	0,2	18±4
6	8185	5114	151,9	33,3	59,3	139,9	72,8	0,18	25±5
7	6940	4305	103,2	23,8	39,7	92,8	50,3	0,18	23±5
8	11140	7430	307,4	34,0	136,7	300,6	125,1	0,1	27±5
Керамика V_4C *	13930	8618	486,3	114,1	186,1	443	238	0,19	35

Примечание: * Литературные данные взяты из работы [25]

Note: * Literature data are taken from work [25]

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 20-12-000-97.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФГБНУ ТИСНУМ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation in the framework of the scientific project No. 20-12-000-97.

The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use of the Federal State Budgetary Scientific Institution TISNUM.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

1. **Sundqvist B.** Carbon under pressure. *Phys. Rep.* 2021. V. 909. P. 1-73. DOI: 10.1016/j.physrep.2020.12.007.
2. **Pei C., Wang L.** Recent progress on high-pressure and high-temperature studies of fullerenes and related materials. *Matt. Rad. Extr.* 2019. V. 4. N 2. P. 028201. DOI: 10.1063/1.5086310.
3. **Popov M., Kulnitskiy B., Blank V.** Superhard materials, based on fullerenes and nanotubes. *Comprehens. Hard Mater.* 2014. V. 3. P. 515-538. DOI: 10.1016/b978-0-08-096527-7.00057-x.
4. **Kvashnina Y.A., Kvashnin A.G., Chernozatonskii L.A., Sorokin P.B.** Fullerite-based nanocomposites with ultrahigh stiffness. Theoretical Investigation. *Carbon.* 2017. V. 115. P. 546-549. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.01.028.
5. **Tinder R.F.** Tensor Properties of Solids, Part One: Equilibrium Tensor Properties of Solids. *Synth. Lect. Eng.* 2007. V. 2. N 1. P. 1-144. DOI: 10.2200/S00057ED1V01Y200712ENG04.
6. **Yao M., Cui W., Du M., Xiao J., Yang X.** Tailoring building blocks and their boundary interaction for the creation of new, potentially superhard, carbon materials. *Adv. Mat.* 2015. V. 27. N 26. P. 3962-3968. DOI: 10.1002/adma.201500188.
7. **Blank V.D., Buga S.G., Dubitskiy G.A., Serebryanaya N.R., Prokhorov V.M., Mavrin B.N.** Synthesis of superhard and ultrahard materials by 3D-polymerization of C₆₀, C₇₀ fullerenes under high pressure (15 GPa) and temperatures up to 1820 K. *Zeitschrift für Naturforschung B.* 2006. V. 61. N 12. P. 1547-1554. DOI: 10.1515/znb-2006-1211.
8. **Popov M., Mordkovich V., Perfilov S., Kirichenko A., Kulnitskiy B., Perezhogin I., Blank V.** Synthesis of ultrahard fullerite with a catalytic 3D polymerization reaction of C₆₀. *Carbon.* 2014. V. 76. P. 250-256. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.04.075.
9. **Popov M., Kulnitskiy B., Perezhogin I., Mordkovich V., Ovsyannikov D., Perfilov S., Borisova L., Blank V.** Catalytic 3D polymerization of C₆₀. *Fuller., Nanotub. Carb. Nanostr.* 2018. V. 26. N 8. P. 465-470. DOI: 10.1080/1536383X.2018.1448388.
10. **Popov M., Alekseev M., Kirichenko A., Kulnitskiy B., Perezhogin I., Tyukalova E., Blank V.** Catalytic depolymerization of ultrahard fullerite. *J. Mater. Res.* 2015. V. 30. N 11. P. 1772-1778. DOI: 10.1557/jmr.2015.118.
11. **Popov M., Gayazov R., Khadzhitskiy F., Medvedev V., Krivtsun V., Kirichenko A.** C₆₀ three-dimensional polymerization by impulse heating effect. *J. Appl. Phys.* 2014. V. 115. N 15. P. 153506. DOI: 10.1063/1.4871777.
12. **Kvashnina Y.A., Kvashnin A.G., Popov M.Y., Kulnitskiy B.A., Perezhogin I.A., Tyukalova E.V.** Toward the ultra-incompressible carbon materials. Computational simulation and experimental observation. *J. Phys. Chem. Lett.* 2015. V. 6. P. 2147-2152. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b00748.
13. **Ruoff R.S., Ruoff A.L.** Is C₆₀ stiffer than diamond? *Nature.* 1991. V. 350. P. 663-664. DOI: 10.1038/350663b0.
14. **Popov M., Blank V., Perfilov S., Ovsyannikov D., Kulnitskiy B., Tyukalova E.** Unique mechanical properties of fullerite derivatives synthesized with a catalytic polymerization reaction. *MRS Commun.* 2015. V. 5. P. 71-75. DOI: 10.1557/mrc.2015.4.
15. **Овсянников Д.А., Попов М.Ю., Перфилов С.А., Прохоров В.М., Кульницкий Б.А., Пережогин И.А., Бланк В.Д.** Високотвердая керамика на основе карбида бора и производных фуллерита. *ФТТ.* 2017. Т. 59. № 2. С. 318-321. DOI: 10.21883/ФТТ.2017.02.302.
16. **Ovsyannikov D.A., Popov M.Y., Perfilov S.A.** High-hardness ceramics based on boron carbide fullerite derivatives. *Phys. Solid State.* 2017. V. 59. P. 327-330. DOI: 10.1134/S1063783417020214.
17. **Annenkov M., Blank V., Kulnitskiy B., Larionov K., Ovsyannikov D., Perezhogin I., Popov M., Sorokin P.** Boron carbide nanoparticles for high-hardness ceramics: Crystal lattice defects after treatment in a planetary ball mill. *J. European Ceramic Soc.* 2017. V. 37. P. 1349-1353. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.12.001.
18. **Кареева А.Р., Жукова Е.А., Урванов С.А., Сенатулин Б.Р., Скрылева Е.А., Мордкович В.З.** Модификация поверхности двустенных углеродных нанотрубок фуллереном C₆₀. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 8. С. 12-20. DOI: 10.6060/tcct.20165908.27y.
19. **Кареева А.Р., Жукова Е.А., Урванов С.А., Сенатулин Б.Р., Скрылева Е.А., Мордкович В.З.** Modification of surface of double wall carbon nano tubes by fullerene C₆₀. *ChemChemTech [Изв. Вузов. Учен. Завед. Хим. Хим. Технол.]* 2016. V. 59. N 8. P. 12-20 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20165908.27y.
20. **Зейналов Э.Б., Агагусейнова М.М., Салманова Н.И.** Влияние добавок нанолуглерода на стабильность полимерных композитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 11. С. 4-12. DOI: 10.6060/ivkkt.20206311.6213.
21. **Zeynalov E.B., Agaguseynova M.M., Salmanova N.I.** Effect of nanocarbon additives on stability of polymer composites. *ChemChemTech [Изв. Вузов. Учен. Завед. Хим. Хим. Технол.]* 2020. V. 63. N 11. P. 4-12. DOI: 10.6060/ivkkt.20206311.6213.
22. **Parkhomenko Y.N., Skryleva E.A., Sanakoev B.L., Serebryanaya N.R., Blank V.D., Buga S.G.** Carbon bonds hybridization in fullerenes studied by XPS. In: *Nanotechnologies in the Area of Physics, Chemistry and Biotechnology, Fifth ISTC SAC Seminar, St. Petersburg, 2002.*
23. **Popov M.** Stress-induced phase transition in diamond. *High Pres. Res.* 2010. V. 30. P. 670-678. DOI:10.1080/08957959.2010.525510.
24. **Gilman J.J.** Chemistry and physics of mechanical hardness. John Wiley & Sons, Inc. 2009. DOI: 10.1002/9780470446836.
25. **Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Kuznetsov M.S.** Influence of the temperature and uniaxial pressure on the elastic properties of synthetic diamond single crystal. Proc. of the 2012 IEEE Ultrason. Symp. (Dresden, Germany, 7-10 Oct. 2012). P. 763-766. DOI: 10.1109/ULSYM.2012.0190.
26. **Telichko A.V., Erohin S.V., Kvashnin G.M., Sorokin B.P., Sorokin B.P., Blank V.D.** Diamond's third-order elastic constants: ab initio calculations and experimental investigation. *J. Mater. Sci.* 2017. V. 52. N 6. P. 3447-3456. DOI: 10.1007/s10853-016-0633-x.
27. **Zhou Y., Yang L., Huang Y.** Micro- and macromechanical properties of materials. Science Series: Advances in Materials Science and Engineering. Boca Raton: CRC Press. 2013. 620 p. DOI: 10.1201/b15525.
28. **Бланк В.Д., Прохоров В.М., Сорокин Б.П.** Упругие постоянные второго и третьего порядков керамики В4С. *Физика твердого тела.* 2014. Т. 58. № 8. С. 1523 - 1527. DOI: 10.1134/S1063783414080046.
29. **Blank V.D., Prokhorov V.M., Sorokin B.P.** Second-order and third-order elastic constants of B4C ceramics. *Phys. Solid State.* 2014. V. 56. P. 1574-1578. DOI: 10.1134/S1063783414080046.

Поступила в редакцию (Received) 04.10.2021
Принята к опубликованию (Accepted) 13.10.2021