

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**TECHNICAL SCIENCES**

УДК 539.216,661.65,615.466

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-3-250-256>

Поступило в редакцию 10.05.2023

Received 10.05.2023

**М. И. Демиденко¹, Д. В. Адамчук¹, А. П. Русанов², С. В. Сироткин²,
Л. В. Иванько², С. А. Максименко¹**

¹Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

²Завод «Электронмаш», Минск, Республика Беларусь

**ЛЕГИРОВАННЫЙ БОРОМ ПИРОЛИТИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД: МАТЕРИАЛ
ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКОГО И ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

(Представлено академиком О. Г. Пенязьковым)

Аннотация. Представлено описание технологической установки и методики синтеза пиролитического углерода, легированного бором. Синтез такого материала основан на методе химического осаждения из газовой фазы (CVD). Синтез протекает на внутренней поверхности косвенно нагреваемой до 1450–1570 °С цилиндрической графитовой сборки, через которую пропускаются контролируемые газовые потоки азота, трихлорида бора и углеродсодержащих газов при низком давлении. Реализованная технология на базе разработанной установки позволяет синтезировать пластинки легированного бором пиролитического углерода, отмеченного совокупностью характеристик химической инертности и биосовместимости с высокими значениями твердости, упругости и длительности использования. Представлено исследование морфологии и состава материала, проведенное методами сканирующей электронной микроскопии и рамановской спектроскопии. Материал находит свое применение в качестве створок эндопротезов клапанов сердца на ОАО «Завод «Электронмаш».

Ключевые слова: пиролитический углерод, карбид бора, химическое осаждение из газовой фазы, высокотемпературный пиролиз, эндопротез клапана сердца

Для цитирования. Легированный бором пиролитический углерод: материал для биомедицинского и инженерно-технического применения / М. И. Демиденко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 3. – С. 250–256. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-3-250-256>

**Marina I. Demidenko¹, Dmitry V. Adamchuk¹, Andrey P. Rusanov², Sergey V. Sirotkin²,
Leonid V. Ivanko², Sergey A. Maksimenko¹**

¹Institute for Nuclear Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Electronmash-plant, Minsk, Republic of Belarus

**BORON-ENRICHED PYROLITIC CARBON: MATERIAL
FOR BIOMEDICAL AND ENGINEERING APPLICATIONS**

(Communicated by Academician Oleg G. Penyazkov)

Abstract. The article describes a technological set-up and the synthesis methodology of boron-enriched pyrolytic carbon (B-PyC). The chemical vapor deposition (CVD) approach lies in the basis of the methodology. The synthesis occurs on the inner surface of a cylindrical graphite assembly indirectly heated to the temperatures of 1450–1570 °C. Controlled low-density flows of nitrogen, boron trichloride and carbonaceous gases react in the assembly, producing a B-PyC film deposited on the graphite substrate. The set-up has been designed to provide fabrication of B-PyC plates possessing features required for heart valve endoprosthesis: chemical inertia and biocompatibility combined with high hardness, high elasticity, and long operating life. The morphology and chemical composition of the material have been studied by electron scanning microscopy and Raman spectroscopy. The material is used at the “Electronmash Plant” for fabrication of heart valve endoprosthesis leaflets.

Keywords: pyrolytic carbon, boron carbide, chemical vapor deposition, high temperature pyrolysis, heart valve endoprosthesis

For citation. Demidenko M. I., Adamchuk D. V., Rusanov A. P., Sirotkin S. V., Ivanko L. V., Maksimenko S. A. Boron-enriched pyrolytic carbon: material for biomedical and engineering applications. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 3, pp. 250–256 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-3-250-256>

Введение. На сегодняшний день семейство углеродных материалов отличается огромным разнообразием форм: алмаз, графит, пиролитический углерод, углеродные волокна, сажа, различные наноразмерные структуры, такие как фуллерены, графен, углеродные нанотрубки, угле-

род луковичной структуры и т. п. Это разнообразие определяет и богатство инженерно-технических применений в различных отраслях, начиная от традиционной электротехники и далее в современных системах беспроводной связи, биомедицины и индустрии новых технологических материалов. Достаточно полный список работ по многим технологическим применениям углеродных структур представлен в [1]. В частности, в медицинских технологиях актуальной проблемой является разработка материалов с сочетанием таких характеристик, как высокая твердость, износостойкость и биосовместимость, химическая инертность. Конечно, этим характеристикам удовлетворяет алмаз, однако технически нет возможности синтезировать данный материал в необходимых количествах и формах. Поэтому возникает техническая задача синтеза углеродного материала с характеристиками, близкими к характеристикам алмаза, но при этом являющегося приемлемым по стоимости и допускающего до определенной степени формообразование и механическую обработку. Одним из важнейших направлений применения таких материалов является хирургия [2; 3] и, в частности, изготовление искусственных клапанов сердца [2; 4].

Графит не удовлетворяет указанным выше механическим характеристикам в силу слабой связи между слоями графена в его кристаллической структуре. Однако при определенных условиях межслоевые связи в графите могут быть существенно усилены путем его легирования атомами других элементов, что может изменить распределение электронов в графитовых плоскостях и потенциально улучшить механические характеристики и стойкость к высокотемпературному окислению.

Одним из перспективных химических элементов с этой точки зрения является бор, который соседствует с углеродом в периодической таблице Менделеева и, следовательно, обладает сходным размером атома. По этой причине замена атома углерода на атом бора не приводит к возникновению критических напряжений в кристаллической структуре материала. Теоретическое обоснование такого варианта решения задачи представлено в [5], где приведены расчетные значения механических характеристик различных бор-углеродных соединений.

Углеродные материалы, легированные бором B_xC_{1-x} ($0 < x < 0,25$) изучались теоретически, методом численного моделирования электронной структуры [5–7] и экспериментально [8–11]. Было показано, что данный материал обладает высокими механическими характеристиками даже в окислительных средах в условиях высоких температур и является перспективным для использования в медицине, авиакосмической индустрии. Избыточная концентрация бора с большой вероятностью приводит к нарушению гексагональной решетки графита и появлению в структуре материала дефектов [2], т. е. к образованию монокристаллических включений карбида бора (B_4C) [3].

Соединения B_xC_{1-x} с высокими концентрациями бора термодинамически метастабильны и могут быть получены только путем неравновесного химического синтеза, таким как метод химического осаждения из газовой фазы (Chemical Vapour Deposition, CVD) [9] и различные его модификации, например, пиролиз при температуре >2000 °C для получения графитоподобного материала B_xC_{1-x} [11; 12]. Методами CVD были синтезированы материалы с концентрациями бора B_xC_{1-x} в диапазоне 15–19 ат. % [9; 13]. В [14] показано, что материалы B_xC_{1-x} с высоким содержанием бора (более 20 ат. %) обладают сверхвысокой твердостью и хрупкостью, что не позволяет использовать данный материал в механическом эндопротезе клапана сердца.

Задача разработки в Республике Беларусь технологии синтеза материала для изготовления створок эндопротезов клапанов сердца была поставлена перед НИИ ядерных проблем БГУ руководством ОАО «Завод «Электронмаш», входящего в состав научно-производственного холдинга точного машиностроения «Планар». На заводе имеется значительный опыт производства таких клапанов из импортируемого сырья. Именно возникший в последние годы дефицит поставок исходного материала на предприятие послужил мотивацией для организации работ. Экспериментальная лабораторная установка синтеза и технология разрабатывались в НИИ ЯП БГУ в тесной кооперации с указанным заводом. Для изготовления ряда узлов установки привлекались специалисты ООО «Вактайм» (г. Сморгонь).

Материалы и методы исследования. В представленной на рис. 1 установке синтез проводился на внутренней поверхности нагреваемой цилиндрической осесимметричной графитовой сборки.

Для обеспечения однородности синтезируемого материала ось графитовой сборки ориентирована вертикально. В этом случае образующиеся в горячем потоке газов агломераты падают на дно фильтра грубой очистки. В качестве углеродсодержащего газа использовались метан и пропан-бутановая смесь. Добавление последней составляющей приводит к существенному ускорению роста материала из-за наличия большего количества атомов углерода в заданном объеме. Источником бора является газообразный трихлорид бора.

Образующиеся в ходе реакции пары соляной кислоты утилизируются в адсорбере. Принципиальная схема процесса представлена на рис. 2.

Состав и структура бор-углеродного композиционного материала контролируются скоростью потока газа, типом участвующих в синтезе углеводородов, температурой и площадью поверхности подложки. Контроль скорости потока газа реализован регуляторами расхода газа, а также дроссельным клапаном на входе вакуумного насоса, которым можно снизить пропускную способность вакуумной магистрали и уменьшить скорость откачки газообразных продуктов реакции. Следует отметить, что в процессе синтеза образуется большое количество водорода, препятствующего осаждению из газовой фазы слоев пиролитического углерода с высокой степенью упорядоченности. Для откачки водорода предусмотрена возможность напуска азота в линию откачки.

В ходе работ было экспериментально установлено, что температура в реакторе является фактором, во многом определяющим механические характеристики синтезируемого материала. По этой причине контроль температуры синтеза и поддержание ее стабильности явились первоочередной задачей в процессе отработки технологии. В синтезированном материале концентрация бора поддерживалась на уровне 15–19 ат. %. Давление в реакторе устанавливалось в диапазоне 900–1300 Па (низкое абсолютное давление углеродсодержащего газа применяется для



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки CVD синтеза обогащенного бором пиролитического углерода (НИИ ЯП БГУ)

Fig. 1. Appearance of the CVD set-up for boron-enriched pyrolytic carbon synthesis (Institute of Nuclear Problems of Belarusian University)

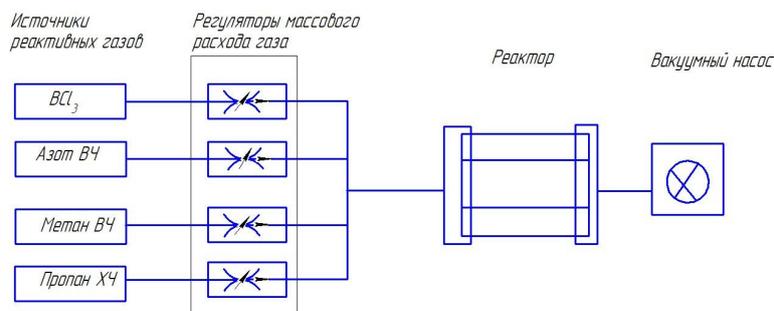


Рис. 2. Схема процесса синтеза пиролитического углерода, легированного бором

Fig. 2. Boron-enriched pyrolytic carbon synthesis scheme

избежания избыточного сажеобразования). Нами установлено, что при давлении менее 500 Па значительно снижается скорость роста материала, в то время как давление выше 2 кПа приводит к существенному снижению твердости. Отметим, что в отличие от температуры и состава газового потока, изменение давления в реакторе в указанном выше диапазоне не оказывает существенного влияния на структуру материала.

При температуре синтеза в диапазоне от 1420 до 1520 °С наблюдается формирование однородного материала с микротвердостью в диапазоне 60–150 HV. На рис. 3 представлена одна из шести пластинок материала (*a*), получаемого в ходе одного цикла синтеза, и створка эндопротеза клапана сердца (*b*).

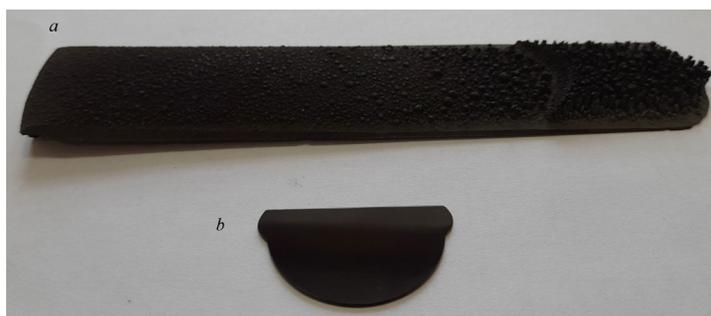


Рис. 3. *a* – пластинка легированного бором пиролитического углерода, размер пластины 130 × 25 × 2 мм. Температура синтеза $T = 1570$ °С; *b* – створка клапана сердца, изготовленного из легированного бором пиролитического углерода

Fig. 3. *a* – 130 × 25 × 2 mm boron-enriched pyrolytic carbon plate. Synthesis temperature $T = 1570$ °С; *b* – leaflet of heart valve fabricated from boron-enriched pyrolytic carbon

Исследование механических свойств синтезированного материала проводилось на микротвердометре HV-1000 при нагрузке 100 г и времени выдержки 1 мин. Нами установлено, что при температуре синтеза 1420 °С микротвердость материала не превышает величину 60–85 HV. С ростом температуры и времени синтеза твердость увеличивается до величины 130–150 HV, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления створок искусственного клапана сердца. Отметим, что синтезируемый материал полностью повторяет форму подложки. Это свидетельствует о поверхностном росте покрытия и, следовательно, об отсутствии диффузии ионов в объеме и на поверхности синтезируемого материала в процессе осаждения.

Из анализа микрофотографий образцов (рис. 4), полученных на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ, SEMS-4800 Hitachi), можно сделать вывод, что в результате CVD синтеза при низких температурах в микроструктуре материала наблюдается формирование крупных графитовых листов, которые снижают общую твердость материала. Влияние этого эффекта снижается с ростом температуры синтеза.

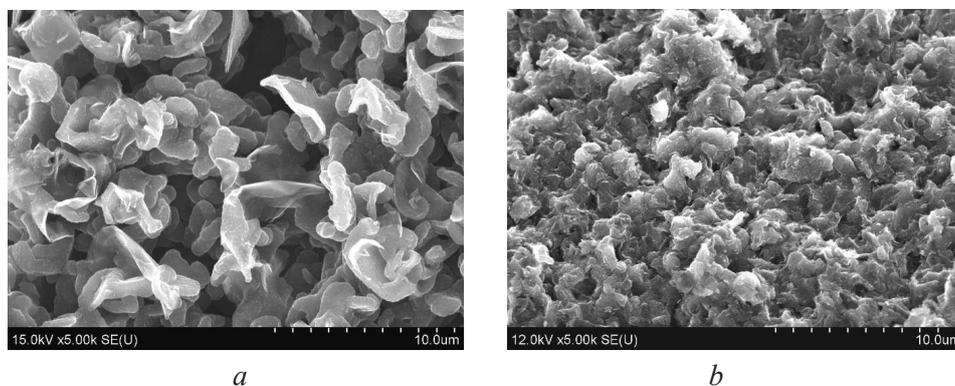


Рис. 4. Микроструктура легированного бором пиролитического углеродного материала, синтезированного при температуре 1420 °С (*a*) и 1570 °С (*b*). Изображения получены на СЭМ SEM S-4800 Hitachi

Fig. 4. Microstructure of boron-enriched pyrolytic carbon material synthesized at the temperatures of 1420°C (*a*) and 1570 °С (*b*). Pictures were obtained on SEM S-4800 Hitachi

Для увеличения твердости за счет обеспечения возможности поверхностной диффузии бора и его встраивания в решетку в процессе роста материала температура синтеза была повышена до 1570 °С. При этом наблюдается существенное изменение механизма роста покрытия. Поверхность синтезируемого материала покрыта сферическими выступами, что свидетельствует об островковом росте материала на поверхности графитовой подложки. Отдельные островки сливаются в процессе роста и формируют плотный материал. В результате синтезируется пленка с однородной структурой и значениями твердости 105–125 HV. Изображение микроструктуры при высокой температуре представлено на рис. 4, *b*.

Исследование полученных образцов пиролитического углерода проводилось методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), которая является эффективным инструментом изучения фазового состава и структуры углеродных материалов, как объемных, так и двумерных [15; 16]. Спектры КРС были записаны с помощью конфокального микроскопа XploRA™ (HORIBA, Франция) с применением лазера с длиной волны возбуждения 532 нм. Все спектры были получены с использованием 100× фокусирующего объектива с $NA = 0,95$ и дифракционной решетки со спектральным разрешением $\sim 7 \text{ см}^{-1}$. Для уменьшения эффектов, связанных с нагревом образца, время накопления на каждую точку составляло $\sim 30 \text{ с}$.

На рис. 5 представлены спектры КРС образцов пиролитического углерода с низкой (60 HV) и оптимальной для применения в кардиохирургии (120 HV) твердостями. Как известно, в спектрах КРС графеноподобных материалов наиболее интенсивными являются три линии, соответствующие D-, G- и 2D-модам. Линия на частоте $\sim 1585 \text{ см}^{-1}$ (G-мода) обусловлена колебаниями атомов углерода, связанных sp^2 -гибридизацией в плоскости решетки. В свою очередь, D-мода с частотой $\sim 1345 \text{ см}^{-1}$ возникает из-за нарушения симметрии идеальной кристаллической структуры графита. Спектр комбинационного рассеяния пиролитического углерода включает в себя также обертона (2D и D+G линии) рассмотренных выше мод. Глубокий провал между D- и G-модами, наблюдаемый на рис. 5, а также наличие 2D-моды ($\sim 2688 \text{ см}^{-1}$) на этом рисунке указывают на высокую кристалличность полученной структуры [15; 16]. Известно, что для графенового монослоя 2D-мода представляет собой одиночный, хорошо описываемый лоренцевым профилем пик на частоте $\sim 2680 \text{ см}^{-1}$. Увеличение числа слоев приводит к частотному сдвигу 2D-моды (наблюдаемому на рис. 5) с одновременным ее уширением и уменьшением интенсивности по сравнению с соответствующей модой графенового монослоя. Ширина линии на полувысоте для полученного образца с микротвердостью 60 HV составляет 200 см^{-1} , а для образца 120 HV – 168 см^{-1} . Таким образом, можно утверждать, что микроструктура полученного материала формируется многослойными графеновыми хлопьями, легированными бором и с малой долей аморфного углерода.

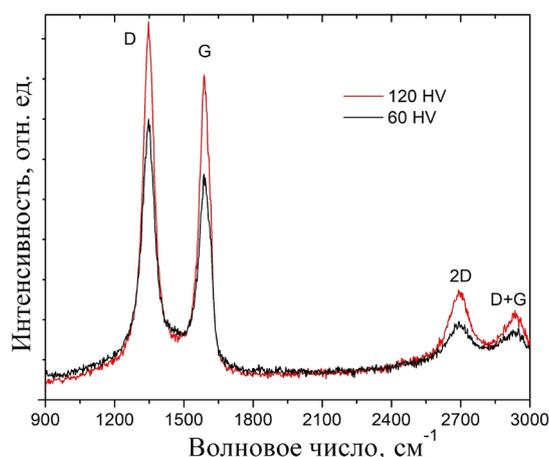


Рис. 5. Спектры комбинационного рассеяния полученных структур низкой (60 HV) и оптимальной (120 HV) твердости

Fig. 5. Combined scattering spectra of the obtained structures of low (60 HV) and optimal (120 HV) hardness

Закключение. В нашей работе описан способ синтеза обогащенного бором углеродного материала с использованием метода химического осаждения из газовой фазы смеси трихлорид бора/метан/пропан/азот. Технология разработана в НИИ ЯП БГУ при активном участии специалистов ОАО «Завод «Электронмаш». Материал характеризуется повышенными значениями механических характеристик и их стабильностью в широком интервале температур, химической и биологической инертностью. В зависимости от условий синтеза твердость материала может достигать значений 100–135 HV, что делает его пригодным для изготовления искусственных клапанов сердца. Изготовленные из полученного материала экспериментальные эндопротезы клапанов сердца прошли ресурсные испытания в лаборатории на заводе «Электронмаш» по утвержденным методикам. Внешний вид створки эндопротеза представлен на рис. 3, *b*. В Институте физиологии НАН Беларуси материал прошел испытания на биосовместимость. Основные характеристики материала: плотность – 1800–2100 кг/м³; микротвердость – 75–135 кгс/мм²; модуль упругости – 20–25 ГПа; прочность на изгиб – 250–450 МПа; содержание легирующего материала (бора) – 1–19 ат. %; электрические свойства близки к свойствам графита.

Можно предположить, что данный материал обладает высоким потенциалом для других биомедицинских применений. Отметим также, что высокие механические характеристики и химическая инертность материала, стабильность характеристик в широком диапазоне температур, вплоть до 3000 °С в бескислородной атмосфере и до 800 °С в присутствии кислорода, открывает перспективы использования этого материала в металлургии цветных металлов, авиакосмической инженерии, химически агрессивных технологиях и т. п. [2; 11].

Список использованных источников

1. Актуальные задачи использования композиционных и гибридных материалов на основе различных форм углерода в электромагнитных и биомедицинских приложениях / С. А. Максименко [и др.] // Журн. БГУ. Физика. – 2023. – № 1. – С. 55–69. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2023-1-55-69>
2. Золкин, П. И. Углеродные материалы в медицине / П. И. Золкин, В. С. Островский. – М., 2014. – 140 с.
3. Current use of carbon-based materials for biomedical applications – a prospective and review / G. Rajakumar [et al.] // Processes. – 2020. – Vol. 8, N 3. – Art. 355. <https://doi.org/10.3390/pr8030355>
4. Пироуглероды в сердечно-сосудистой хирургии / Л. А. Бокерия [и др.]. – М., 2020. – 54 с.
5. Li, M. M. First-principle calculations on the structural stability and electronic properties of superhard B_xC_y compounds / M. M. Li, X. Fan, W. T. Zheng // J. Phys. Condens. Matter. – 2013. – Vol. 25, N 42. – Art. 425502. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/25/42/425502>
6. First-principles studies of structural and electronic properties of hexagonal BC₅ / Q. Hu [et al.] // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 73, N 21. – Art. 214116. <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.214116>
7. Computational predictions and microwave plasma synthesis of superhard boron-carbon materials / P. Baker [et al.] // Materials. – 2018. – Vol. 11, N 8. – Art. 1279. <https://doi.org/10.3390/ma11081279>
8. Chasmawala, M. Synthesis of B/C materials from boron-containing phenyl acetylides / M. Chasmawala, T. C. Chung // Carbon. – 1997. – Vol. 35, N 5. – P. 641–650. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(97\)00019-5](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(97)00019-5)
9. Preparation and characterization of B_xC_{1-x} thin films with the graphite structure / B. M. Way [et al.] // Phys. Rev. B. – 1992. – Vol. 46, N 3. – P. 1697–1702. <https://doi.org/10.1103/physrevb.46.1697>
10. Lowell, C. Solid Solution of Boron in Graphite / C. Lowell // J. Am. Ceram. Soc. – 1967. – Vol. 50, N 3. – P. 142–144. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1967.tb15064.x>
11. Hu, R. Synthesis and characterization of novel B/C materials prepared by 9-chloroborabluorene precursor / R. Hu, T. C. Chung // Carbon. – 1996. – Vol. 34, N 10. – P. 1181–1190. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(96\)00064-4](https://doi.org/10.1016/0008-6223(96)00064-4)
12. A novel graphite-like material of composition BC₃, and nitrogen-carbon graphites / J. Kouvetakis [et al.] // J. Chem. Soc. Chem. Commun. – 1986. – N 24. – P. 1758–1759. <https://doi.org/10.1039/c39860001758>
13. An investigation of vapor deposited boron rich carbon—a novel graphite-like material—part I: the structure of BC_x (C₆B) thin films / C. T. Hach [et al.] // Carbon. – 1999. – Vol. 37, N 2. – P. 221–230. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(98\)00166-3](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(98)00166-3)
14. Evidence for the solubility of boron in graphite by electron energy loss spectroscopy / V. Serin [et al.] // Carbon. – 2000. – Vol. 38, N 4. – P. 547–554. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(99\)00128-1](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(99)00128-1)
15. Комбинационное рассеяние света в нанопористом углероде, получаемом из карбидов кремния и титана / А. М. Данишевский [и др.] // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 43, № 1. – С. 132–139.
16. Raman spectroscopy of carbon materials and their composites: Graphene, nanotubes and fibres / Z. Li [et al.] // Progress in Materials Science. – 2023. – Vol. 135. – Art. 101089. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101089>

References

1. Maksimenko S. A., Kulahava T. A., Okotrub A. V., Suslyaev V. I. Actual problems of the usage of composite and hybrid materials based on different forms of nanocarbons in electromagnetic and biomedical applications. *Journal of the Belarusian State University. Physics*, 2023, no. 1, pp. 55–69 (in Russian). <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2023-1-55-69>

2. Zolkin P. I., Ostrovskii V. S. *Carbon materials in medicine*. Moscow, 2014. 140 p. (in Russian).
3. Rajakumar G., Zhang X.-H., Gomathi T., Wang S.-F., Ansari M. A., Mydhili G., Nirmala G., Alzohairy M. A., Chung I.-M. Current use of carbon-based materials for biomedical applications – a prospective and review. *Processes*, 2020, vol. 8, no. 2, art. 355. <https://doi.org/10.3390/pr8030355>
4. Bokeria L. A., Agafonov A. V., Kuznetsov V. O., Gorodkov A. Yu. *Pyrocarbons in cardiovascular surgery*. Moscow, 2020. 54 p. (in Russian).
5. Li M. M., Fan X., Zheng W. T. First-principle calculations on the structural stability and electronic properties of superhard B_xC_y compounds. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2013, vol. 25, no. 42, art. 425502. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/25/42/425502>
6. Hu Q., Wu Q., Ma Y., Zhang L., Liu Z., He J., Sun H., Wang H.-T., Tian Y. First-principles studies of structural and electronic properties of hexagonal BC_5 . *Physical Review B*, 2006, vol. 73, no. 21, art. 214116. <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.214116>
7. Baker P., Catledge S., Harris S., Ham K., Chen W.-C., Chen C.-C., Vohra Y. Computational predictions and microwave plasma synthesis of superhard boron-carbon materials. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 8, art. 1279. <https://doi.org/10.3390/ma11081279>
8. Chasmawala M., Chung T. C. Synthesis of B/C materials from boron-containing phenyl acetylides. *Carbon*, 1997, vol. 35, no. 5, pp. 641–650. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(97\)00019-5](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(97)00019-5)
9. Way B. M., Dahn J. R., Tiedje T., Myrtle K., Kasrai M. Preparation and characterization of B_xC_{1-x} thin films with the graphite structure. *Physical Review B*, 1992, vol. 46, no. 3, pp. 1697–1702. <https://doi.org/10.1103/physrevb.46.1697>
10. Lowell C. Solid Solution of Boron in Graphite. *Journal of the American Ceramic Society*, 1967, vol. 50, no. 3, pp. 142–144. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1967.tb15064.x>
11. Hu R., Chung T. C. Synthesis and characterization of novel B/C materials prepared by 9-chloroborabluorene precursor. *Carbon*, 1996, vol. 34, no. 10, pp. 1181–1190. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(96\)00064-4](https://doi.org/10.1016/0008-6223(96)00064-4)
12. Kouvetakis J., Kaner R. B., Sattler M. L., Bartlett N. A novel graphite-like material of composition BC_3 , and nitrogen-carbon graphites. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1986, no. 24, pp. 1758–1759. <https://doi.org/10.1039/c39860001758>
13. Hach C. T., Jones L. E., Crossland C., Thrower P. A. An investigation of vapor deposited boron rich carbon—a novel graphite-like material—part I: the structure of BC_x (C_6B) thin films. *Carbon*, 1999, vol. 37, no. 2, pp. 221–230. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(98\)00166-3](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(98)00166-3)
14. Serin V., Brydson R., Scott A., Kihn Y., Abidate O., Maquin B., Derré A. Evidence for the solubility of boron in graphite by electron energy loss spectroscopy. *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 4, pp. 547–554. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(99\)00128-1](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(99)00128-1)
15. Danishevskii A. M., Smorgonskaya É. A., Gordeev S. K., Grechinskaya A. V. Raman light scattering in nanoporous carbon obtained from silicon and titanium carbides. *Physics of the Solid State*, 2001, vol. 43, no. 1, pp. 137–144. <https://doi.org/10.1134/1.1340199>
16. Li Z., Deng L., Kinloch I. A., Young R. J. Raman spectroscopy of carbon materials and their composites: Graphene, nanotubes and fibres. *Progress in Materials Science*, 2023, vol. 135, art. 101089. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101089>

Информация об авторах

Демиденко Марина Ивановна – заведующий лабораторией. Институт ядерных проблем БГУ (ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: midemidenko67@gmail.com.

Адамчук Дмитрий Вячеславович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Институт ядерных проблем БГУ (ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: adamchuk.dzmitry@yahoo.com. ORCID: 0000-0003-2845-4744.

Русанов Андрей Павлович – начальник КТБ. Завод «Электронмаш» (пр. Партизанский, 2, 220033, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rusanovandrei94@mail.ru.

Сироткин Сергей Владимирович – главный экономист. Завод «Электронмаш» (пр. Партизанский, 2, 220033, Минск, Республика Беларусь). E-mail: electronmash-plant@yandex.ru.

Иванько Леонид Владимирович – и. о. директора. Завод «Электронмаш» (пр. Партизанский, 2, 220033, Минск, Республика Беларусь). E-mail: electronmash-plant@yandex.ru.

Максименко Сергей Афанасьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Институт ядерных проблем БГУ (ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sergey.maksimenko@gmail.com. ORCID: 0000-0002-8271-0449.

Information about the authors

Demidenko Marina I. – Head of the Laboratory. Institute for Nuclear Problems of the Belarusian State University (11, Bobruiskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: midemidenko67@gmail.com.

Adamchuk Dmitry V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher. Institute for Nuclear Problems of the Belarusian State University (11, Bobruiskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: adamchuk.dzmitry@yahoo.com. ORCID: 0000-0003-2845-4744.

Rusanov Andrey P. – Head of KTB. Electronmash-plant (2, Partizanski Ave., 220033, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rusanovandrei94@mail.ru.

Ivanko Leonid V. – Acting Director. Electronmash-plant (2, Partizanski Ave., 220033, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: electronmash-plant@yandex.ru.

Maksimenko Sergey A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director. Institute for Nuclear Problems of the Belarusian State University (11, Bobruiskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergey.maksimenko@gmail.com. ORCID: 0000-0002-8271-0449.