

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.1.03

УДК 661.313: 623.7: 666

В.М. Бушуев¹, И.Л. Синани²¹ОАО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов», Пермь, Россия²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ ОСНОВЫ ГЕРМЕТИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

К настоящему времени ряд отраслей российской промышленности нуждаются в разработке новых конструкционных материалов, устойчивых в экстремальных условиях высокотемпературного и химического воздействий агрессивных металлических расплавов и химических сред. Наиболее перспективными материалами для изготовления крупногабаритных и сложнопрофильных конструкций практически любого размера, эксплуатируемых в жестких условиях высокотемпературного и агрессивного воздействий, являются углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), обладающие высокой коррозионной стойкостью и комплексом повышенных физико-механических свойств.

Настоящая работа посвящена исследованию и разработке технологического процесса изготовления несущей основы для создания нового класса герметичных углерод-углеродных композиционных материалов, устойчивых в экстремальных условиях эксплуатации высоких температур и агрессивных металлических расплавов и химических сред. Одним из экономически выгодных способов насыщения несущей основы герметичной конструкции пироуглеродом является термоградиентный метод с использованием радиально движущейся зоны пиролиза. Простота аппаратного оформления, высокие скорости насыщения углеродных каркасов пироуглеродом за счет ускоренного массопереноса и высокой концентрации метана при атмосферном давлении делают этот метод экономически и технологически выгодным для изготовления несущей основы герметичных конструкций.

Экспериментально обоснованы технологические параметры процесса насыщения пироуглеродом тканепрошивных каркасов термоградиентным способом с использованием радиально движущейся зоны пиролиза. Скорость движения зоны пиролиза по толщине каркаса составила 0,25–0,35 мм/ч, а градиент температур в зоне пиролиза 20–30 °С/мм. Установленные технологические параметры обеспечили высокую производительность технологического процесса и максимально возможную плотность материала.

Для двух типов несущих основ, изготовленных из высокомодульной ткани УТ-900 (материал «Луч») и низкомодульной ткани Урал ТМ-4 (материал «Углекон»), исследован комплекс физико-механических свойств и проведен тщательный металлографический контроль. Сравнительный анализ физико-механических свойств и результаты металлографического контроля двух типов углерод-углеродных материалов позволил осуществить выбор основного варианта материала несущей основы из ткани Урал ТМ-4 (материал «Углекон»).

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, материал «Углекон», материал «Луч», термоградиентный метод, зона пиролиза, углеродный каркас, высокомодульная ткань УТ-900, низкомодульная ткань Урал ТМ-4, пористость, плотность, герметизирующие покрытия, скорость движения зоны пиролиза.

V.M. Bushuev¹, I.L. Sinani²

¹OJSC “Ural Scientific Research Institute of Composite Materials”,
Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

TECHNOLOGICAL PROCESS DEVELOPMENT OF BASE SUPPORT PRODUCTION OF THE SEALED CONSTRUCTIONS BASED ON CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS

So far a number of branches of the Russian industry need development of new constructional materials of steady high-temperature and chemical impacts of aggressive metal fusions and chemical environments in extreme conditions. The most perspective materials for production of the large-size and figurine designs practically any type of the size operated in severe conditions of high-temperature and aggressive influences are the carbon-carbon composite materials (CCCM), possessing high corrosion resistance and a complex of the increased physico-mechanical properties.

The real work is devoted to research and development of technological process of production of the bearing basis for creation of a new class tight carbon-carbon composite materials of steady high temperatures and aggressive metal fusions and chemical environments in extreme service conditions. One of economic ways of saturation of the bearing basis of a tight design pyrocarbon, is the thermogradient method with use of radially moving zone of pyrolysis. Simplicity of hardware registration, high speeds of saturation of carbon frameworks pirouglrody at the expense of the accelerated mass transfer and high concentration of methane with an atmospheric pressure do this method economically and technologically favorable to production of the bearing basis of tight designs.

Technological parameters of process of saturation pirouglrody the tkaneproshivnykh of frameworks with use of radially moving zone of pyrolysis are experimentally proved in the thermogradient way. Speed of the movement of a zone of pyrolysis on thickness of a framework made 0,25-0,35 mm/h, and a gradient of temperatures in a pyrolysis zone 20-30 °C/мм. The set technological parameters provided high efficiency of technological process and the greatest possible density of material.

For two types of the bearing bases made of high-modular UT-900 fabric (material “Luch”) and low-modular fabric the URALS by TM-4 (the material “Uglekon”) is investigated a complex of physico-mechanical properties and careful metalgraphic control is carried out them. The comparative analysis of physico-mechanical properties and results of metalgraphic control of two types carbon-carbon materials allowed to carry out the choice of the main option of material of the bearing basis from fabric the URALS of TM-4 (material “Uglekon”).

Keywords: carbon-carbon composite material, “Uglecon” material, “Luch” material, thermogradient method, pyrolysis zone, carbon framework, high modulus fabric material UT-900, low modulus fabric material URAL TM-4, porosity, density, sealing coating, velocity of the pyrolysis zone.

Введение

Наиболее перспективными материалами для изготовления крупногабаритных и сложнопрофильных конструкций практически любого типоразмера, эксплуатируемых в жестких условиях высокотемпературного и агрессивного воздействий, являются углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), обладающие высокой коррозионной стойкостью [1–3] и комплексом повышенных физико-механи-

ческих свойств [4, 5]. Основным недостатком этого класса УУКМ является их высокая проницаемость.

В литературе отсутствуют сведения о каких-либо методах и подходах, касающихся разработки УУКМ и конструкций на их основе, обладающих герметичностью в сложных условиях эксплуатации. Однако нами впервые показано [6–8], что этот класс композиционных материалов, несущая основа которых изготовлена из низкомодульной ткани Урал ТМ-4 («Углекон») с дополнительно герметизирующими покрытиями, можно с успехом применять в металлургической, полупроводниковой и химико-металлургической промышленности, в конструкциях, работающих в экстремальных условиях высокотемпературного и химического воздействия металлических расплавов и химических сред [2].

Настоящая работа ставит целью отработку кинетических параметров насыщения несущей основы пироуглеродом в термоградиентном режиме с использованием радиально движущейся зоны пиролиза [9–11] и выбор материала несущей основы.

Методика постановки экспериментальных исследований

Одним из эффективных и экономически выгодных способов изготовления несущей основы герметичной конструкции является термоградиентный метод с использованием радиально движущейся зоны пиролиза.

Метод заключается в резистивном нагреве пористой среды с помощью молибденового или графитового стержня в потоке природного газа [12, 13]. Вокруг стержня создается узкая зона пиролиза (рис. 1). Координате X_1 соответствует некоторая критическая температура T_k , за пределы которой молекулы метана не диффундируют, так как участок X_0 – X_1 представляет уплотненный пироуглеродом материал. Координате X_2 соответствует пороговая

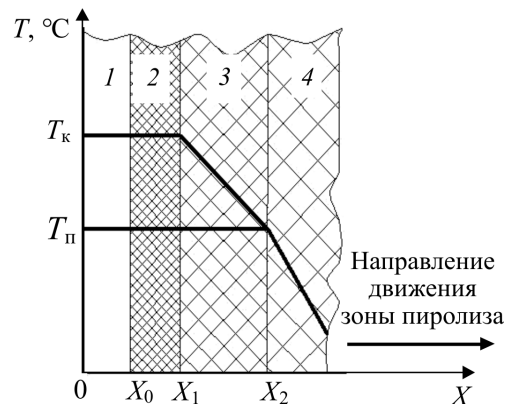


Рис. 1. Распределение температуры по толщине уплотняемого пироуглеродом каркаса: 1 – зона нагрева; 2 – уплотненная часть; 3 – зона пиролиза; 4 – неуплотненная часть

температура T_p , при которой реакция разложения метана практически не протекает. Участок $0-X_0$ контактирует с источником нагрева.

Для проведения экспериментальных работ по разработке УУКМ, пригодных к герметизации, формировали малогабаритные пакеты в форме пластин из низкокомодульной ткани марки Урал ТМ-4 и высококомодульной ткани марки УТ-900. Затем пакет прошивали на швейной машине углеродной нитью марки Урал-Н или Урал-НШ с расстоянием между строчками 5–10 мм. Наличие в каркасе третьей координаты способствовало повышению межслоевой прочности УУКМ.

В каждом из экспериментов на оправку-нагреватель, выполненную из графита в виде пластины, размещали с одной ее стороны каркас из низкокомодульной ткани Урал-ТМ-4, с другой – каркас из высококомодульной ткани УТ-900. После их размещения на оправке-нагревателе каркасы обматывали двумя слоями асботкани марки АТ-3. После этого оправку-нагреватель с размещенными на ней каркасами монтировали в реакционном аппарате. Затем в одном из каркасов сверлили отверстие под кварцевый капилляр, который устанавливали до упора в оправку-нагреватель. Контроль температуры осуществляли хромель-алюмелевой термопарой, перемещаемой в течение процесса в кварцевом капилляре с заданной скоростью. После насыщения пластин-каркасов пироуглеродом они обрабатывались механическим способом до размеров $200 \times 830 \times 10$ мм. УУКМ, полученному насыщением пироуглеродом каркаса из высококомодульной ткани УТ-900, было присвоено название «Луч», а из низкокомодульной ткани Урал ТМ-4 – «Углекон». В качестве углеродсодержащего газа использовали сетевой газ по ГОСТ 5542–87, содержащий не менее 95 % CH_4 . Непосредственно на пластинах измеряли среднюю плотность и открытую пористость полученных материалов. После этого пластины разрезали на стандартные образцы для исследования физико-механических характеристик материала несущей основы.

В задачу этого этапа исследования входило определение градиента температур по длине зоны пиролиза и скорости движения созданного фронта по толщине насыщаемого каркаса, которые обеспечили бы максимально возможную плотность УУКМ и высокую производительность технологического процесса, а также анализ структурно-чувствительных свойств двух материалов с целью выбора материала несущей основы.

Экспериментальные результаты и их анализ

Для экспериментальной отработки технологических параметров изготовления несущей основы в термоградиентном режиме были проведены две серии экспериментов. При выполнении первой серии изучали зависимость плотности и открытой пористости тканепрошивных каркасов от градиента температур при постоянной скорости зоны пиролиза. Температура в зоне пиролиза $T_k = (980 \pm 15)^\circ\text{C}$, расход метана 4–5 м³/ч. Результаты этой серии экспериментов приведены на рис. 2.

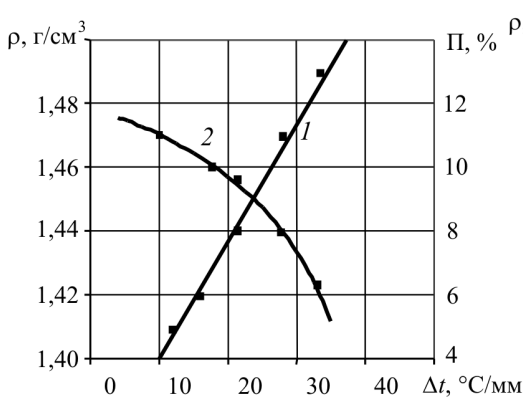


Рис. 2. Зависимость плотности (1) и открытой пористости (2) от градиента температур Δt при скорости движения зоны пиролиза 0,25 мм/ч

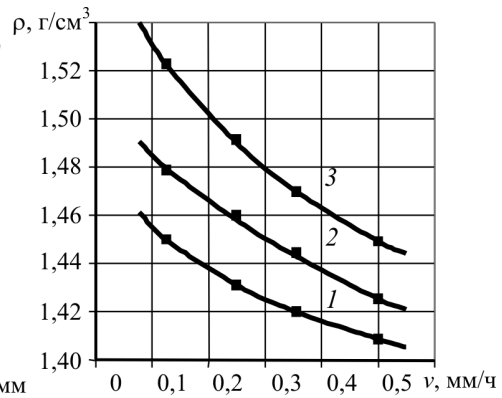


Рис. 3. Зависимость плотности от скорости движения зоны пиролиза при градиентах температур, $^\circ\text{C}/\text{мм}$: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30

Как видим, с увеличением градиента температур плотность увеличивается линейно, а пористость уменьшается.

Во второй серии экспериментов температуры T_k оставались прежними, а для трех градиентов температур 10, 20 и 30 $^\circ\text{C}/\text{мм}$ исследовалась зависимость плотности от скорости движения зоны пиролиза. Результаты этой серии экспериментов приведены на рис. 3. Как видно из рисунка, с увеличением скорости движения зоны пиролиза плотность материала уменьшается в тем в большей степени, чем меньше градиент температур¹.

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что для сохранения сравнительно высокой плотности и производительности

¹ Пат. 2457176 Рос. Федерация кл. С01В31/00. Способ герметизации изделий из углеграфитовых материалов / Бушуев В.М., Синани И.Л. Оpubл. 27.07.2012. Бюл. № 21.

процесса насыщения каркасов пироуглеродом скорость движения зоны пиролиза по толщине каркаса следует назначить 0,25–0,35 мм/ч, а градиент температур в пределах 20–30 °С/мм.

При исследовании прочностных характеристик УУКМ установлено, что достаточно высокой прочностью обладают материалы с относительной плотностью не ниже 1,35–1,45 г/см³, которую вполне обеспечивают выбранные выше параметры процесса. В связи с этим исследования проводились на образцах с плотностью не ниже указанной [14].

Прочностные и некоторые другие характеристики, определенные стандартными методами, представлены в таблице.

Физико-механические свойства УУКМ различных типов

| Наименование характеристик | «Луч» | «Углекон» |
|---|-----------|-----------|
| Плотность, г/см ³ | 1,45–1,67 | 1,35–1,51 |
| Открытая пористость, % | 12,8–16,8 | 8,5–9,0 |
| Предел прочности при растяжении, кг/мм ² , по ТУ1916-007-07523132–2007: | | |
| в осевом направлении | 11,0–17,8 | 6,0–7,3 |
| в радиальном направлении | 14,6–17,0 | |
| Предел прочности при сжатии, кг/мм ² , по ГОСТ 2. 602–80: | | |
| в осевом направлении | 8,6–12,0 | 11,6–15,5 |
| в радиальном направлении | 12,4–16,1 | Ср. 12,6 |
| Предел прочности при изгибе, кг/мм ² , по ОСТ 92-462–77: | | |
| в осевом направлении | 15,1–20,4 | Ср. 11,4 |
| в радиальном направлении | 15,4–22,0 | 5,9–8,9 |
| Модуль упругости при растяжении, Е-10, кг/мм ⁻³ , по ОСТ 92-1461–77 | 4,02–4,45 | 1,55 –2,0 |
| Ударная вязкость, кгс-см/см ² , по ГОСТ 4647–80 (по Шарпи): | | |
| в осевом направлении | 8,1–11,4 | 8,0 |
| в радиальном направлении | 12,8–14,1 | 7,5 |
| Коэффициент линейного термического расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}$ град ⁻¹ , по методике 934.004–2008М: | | |
| в осевом направлении 20–1000 °С | 0,95–1,60 | 2,80 |
| 20–2000 °С | 3,20 | 4,40 |
| в радиальном направлении 20–1000 °С | 1,32 | 2,75–2,80 |
| 20–2000 °С | 1,81 | 3,30 |

Исходя из анализа прочностных характеристик в качестве материала несущей основы целесообразнее выбрать материал «Луч». Однако после уплотнения ткани УТ-900 на основе высокомодульных волокон металлографическим путем были зафиксированы трещины, в то время как на УУКМ, изготовленном на основе ткани Урал ТМ-4, прошедшей аналогичную обработку, трещины обнаружены не были (рис. 4, а, б).

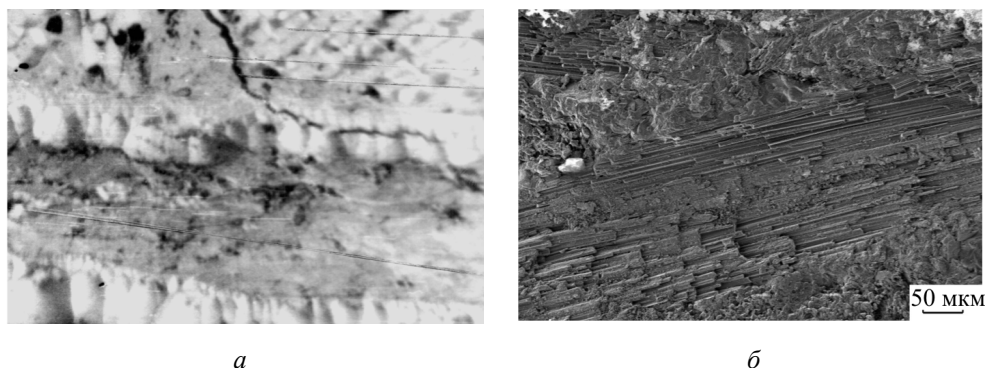


Рис. 4. Микроструктура УУКМ после насыщения пироуглеродом, $\times 1000$:
а – образование трещин в материале «Луч»; б – отсутствие трещин в материале «Углекон»

Этот экспериментальный факт можно объяснить тем, что ткань Урал ТМ-4 как материал наполнителя имеет хорошую совместимость с материалом матрицы (пироуглеродом) по таким основным критериям, как коэффициент линейного термического расширения, хорошая адгезия на границе матрицы и армирующего элемента, термодинамическая устойчивость при работе в условиях высоких температур.

На основании этих исследований можно заключить следующее. Несмотря на комплекс высоких физико-механических показателей материала «Луч», его использование для материала несущей основы герметичных конструкций не представляется возможным, и в качестве основного варианта для изготовления несущей основы был выбран материал «Углекон», изготовленный из ткани Урал ТМ-4. Как показали дальнейшие исследования, наши предположения полностью оправдались и несущая основа из материала «Углекон» с нанесенными на нее герметизирующими слоями обеспечила надежную работоспособность изделий в экстремальных условиях высокотемпературного и химического воздействий агрессивных сред [2, 3, 9, 15].

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для достижения высокой плотности и производительности термоградиентного процесса насыщения тканепрошивных каркасов скорость движения зоны пиролиза по толщине каркаса следует назначить 0,25–0,35 мм/ч, градиент температур в зоне пиролиза – 20–30 °С/мм.

2. В качестве основы герметичных конструкций из УУКМ выбран материал «Углекон», изготовленный из ткани Урал ТМ-4 с плотностью $1,35\text{--}1,51\text{ г/см}^3$, что обеспечивает высокие механические свойства материала несущей основы и ее надежные эксплуатационные характеристики.

Список литературы

1. Бушуев В.М., Удинцев П.Г., Чунаев В.Ю. Перспективы применения углеродных композиционных материалов в химическом аппаратоостроении // Хим. промышленность. – 2003. – Т. 80, № 3. – С. 38–45.

2. Синани И.Л., Бушуев В.М. Стойкость углерод-углеродных композиционных материалов семейства «Углекон» в агрессивных средах // Коррозия: материалы, защита. – 2013. – № 9. – С. 36–40.

3. Синани И.Л., Бушуев В.М. Герметичность и стойкость углерод-углеродных композиционных материалов типа «Углекон» в агрессивных средах // Металлург. – 2015. – № 11. – С. 120–124.

4. Костиков В.И., Варенков А.И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы. – М.: Интермет. Инжиниринг, 2003. – 574 с.

5. Синани И.Л., Бушуев В.М. Разработка технологических процессов изготовления углерод-углеродных композиционных материалов типа «Углекон» // Коррозия: материалы, защита. – 2013. – № 7. – С. 18–23.

6. Синани И.Л., Бушуев В.М. Кинетика кристаллизации пироуглерода при пиролизе метана // Коррозия: материалы, защита. – 2012. – № 2. – С. 28–32.

7. Синани И.Л., Бушуев В.М. Разработка шликерной композиции для изготовления герметичных конструкций на основе УУКМ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 22–28.

8. Углерод-углеродные материалы для ортопедии и травматологии / И.Л. Синани, А.Г. Щурик, В.М. Бушуев, Ю.К. Осоргин // Российский журнал биомеханики. – 2012. – Т. 16, № 2(56). – С. 74–82.

9. Синани И.Л., Бушуев В.М. Герметичность композита типа «Углекон» в нормальных условиях и условиях термических нагрузок // Коррозия: материалы, защита. – 2015. – № 3. – С. 36–40.

10. Бушуев В.М., Щурик А.Г., Синани И.Л. Выбор материала подложки под нанесение пироуглеродного покрытия применительно

к технологии изготовления малопроницаемых и герметичных деталей // Перспективные материалы. – 2010. – № 9а. – С. 209–212.

11. Гурин В.А., Зеленский В.Ф. Газофазные методы получения углеродных и углерод-углеродных материалов // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков, 1999. – № 4. – С. 15–29.

12. Гурин В.А., Гурин Н.В., Фурсов С.Г. Исследование газофазного уплотнения пироуглеродом пористых сред методом радиально движущейся зоны пиролиза // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков, 1999. – № 5. – С. 13–31.

13. Ковалевский Н.Н. Динамика объемного пироуплотнения углеграфитовых материалов пироуглеродом и расчет параметров процесса // Химия твердого топлива. – 1975. – № 2. – С. 98–105.

14. Синани И.Л., Бушуев В.М. Степень насыщения пироуглеродом отдельных фрагментов тканепрошивного каркаса несущей основы герметичных конструкций // Коррозия: материалы, защита. – 2014. – № 9. – С. 8–11.

15. Бушуев В.М., Щурик А.Г., Самарин А.В. Разработка перспективных технологических процессов изготовления из УУКМ герметичных к расплавам солей и металлов тиглей различной конструкции и назначений // Перспективные материалы. – 2008. – Март. – С. 71–76.

References

1. Bushuev V.M., Udintsev P.G., Chunaev V.Iu. Perspektivy primeneniia uglerodnykh kompozitsionnykh materialov v khimicheskom apparatostroenii [Prospects for the use of carbon composite materials in the chemical instrument making]. *Khimicheskaiia promyshlennost'*, 2003, vol. 80, no. 3, pp. 38-45.

2. Sinani I.L., Bushuev V.M. Stoikost' uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov semeistva «Uglekon» v agressivnykh sredakh [Persistence of carbon-carbon composite materials family "Uglekon" in aggressive environments]. *Korroziia: materialy, zashchita*, 2013, no. 9, pp. 36-40.

3. Sinani I.L., Bushuev V.M. Germetichnost' i stoikost' uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov tipa «Uglekon» v agressivnykh sredakh [The tightness and resistance of carbon-carbon composite materials such as "Uglekon" in aggressive environments]. *Metallurg*, 2015, no. 11, pp. 120-124.

4. Kostikov V.I., Varenkov A.I. Sverkhvysokotemperaturnye kompozitsionnye materialy [Very high temperature composite materials]. Moscow: Intermet. Inzhiniring, 2003. 574 p.

5. Sinani I.L., Bushuev V.M. Razrabotka tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniia uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov tipa «Uglekon» [Development of technological processes of manufacture of carbon-carbon composite materials such as "Uglekon"]. *Korroziia: materialy, zashchita*, 2013, no. 7, pp. 18-23.

6. Sinani I.L., Bushuev V.M. Kinetika kristallizatsii pirougleroda pri pirolize metana [Kinetics of crystallization of pyrolytic carbon in the pyrolysis of ethane]. *Korroziia: materialy, zashchita*, 2012, no. 2, pp. 28-32.

7. Sinani I.L., Bushuev V.M. Razrabotka shlikernoï kompozitsii dlia izgotovleniia germetichnykh konstruksii na osnove UUKM [Development slip composition for making hermetic structures based on carbon-carbon composites]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2012, vol. 14, no. 2, pp. 22-28.

8. Sinani I.L., Shchurik A.G., Bushuev V.M., Osorgin Iu.K. Uglerod-uglerodnye materialy dlia ortopedii i travmatologii [Carbon-carbon materials for orthopedics and traumatology]. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki*, 2012, vol. 16, no. 2(56), pp. 74-82.

9. Sinani I.L., Bushuev V.M. Germetichnost' kompozita tipa «Uglekon» v normal'nykh usloviakh i usloviakh termicheskikh nagruzok [The tightness of the composite type "Uglekon" in normal conditions and under thermal stress]. *Korroziia: materialy, zashchita*, 2015, no. 3, pp. 36-40.

10. Bushuev V.M., Shchurik A.G., Sinani I.L. Vybor materiala podlozhki pod nanesenie pirouglerodnogo pokrytiia primenitel'no k tekhnologii izgotovleniia malopronitsaemykh i germetichnykh detalei [Selection of the substrate material under the application of pyrocarbon coating applied to manufacturing technology tight and sealed parts]. *Perspektivnye materialy*, 2010, no. 9a, pp. 209-212.

11. Gurin V.A., Zelenskii V.F. Gazofaznye metody polucheniia uglerodnykh i uglerod-uglerodnykh materialov [The gas-phase methods for carbon and carbon-carbon materials]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Khar'kov*, 1999, no. 4, pp. 15-29.

12. Gurin V.A., Gurin N.V., Fursov S.G. Issledovanie gazofaznogo uplotneniia pirouglerodom poristykh sred metodom radial'no dvizhushchiesia zony piroliza [Research gazofaznogo pyrolytic carbon seal porous media metodom radially moving the pyrolysis zone]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Khar'kov*, 1999, no. 5, pp. 13-31.

13. Kovalevskii N.N. Dinamika ob"emnogo pirouplotneniia uglegrafitovykh materialov pirouglerodom i raschet parametrov protsessa [Dynamics volume pirouplotneniya pyrolytic carbon-carbon materials and the calculation of the process parameters]. *Khimiia tverdogo topliva*, 1975, no. 2, pp. 98-105.

14. Sinani I.L., Bushuev V.M. Stepen' nasyshcheniia pirouglerodom ot del'nykh fragmentov tkaneproshivnogo karkasa nesushchei osnovy germetichnykh konstruksii [The degree of saturation of the individual fragments tkaneproshivnogo pyrolytic carbon skeleton of the base substrate sealed designs]. *Korroziia: materialy, zashchita*, 2014, no. 9, pp. 8-11.

15. Bushuev V.M., Shchurik A.G., Samarin A.V. Razrabotka perspektivnykh tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniia iz UUKM germetichnykh k rasplavam solei i metallov tigelei razlichnoi konstruksii i naznachenii [Development of advanced technological processes of manufacture of carbon-carbon composite materials sealed in molten salts and metal crucible of various designs and purposes]. *Perspektivnye materialy*, 2008, March, pp. 71-76.

Получено 28.10.2015

Об авторах

Бушуев Вячеслав Максимович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, главный специалист ОАО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов»; e-mail: uniikm@yandex.ru.

Синани Игорь Лазаревич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sinani.pstu@yandex.ru.

About the authors

Viacheslav M. Bushuev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Chief Specialist, OJSC “Ural Research Institute of Composite Materials”; e-mail: uniikm@yandex.ru.

Igor L. Sinani (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sinani.pstu@yandex.ru.