

**ПОЛУЧЕНИЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ КАРБИДОКРЕМНИЕВОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ПОЛИКАРБОСИЛАНОВ\***

**PRODUCTION OF SILICON CARBIDE FIBER MATERIAL FROM POLYCARBOSILANES BY ELECTROFORMING**

*С.И. БЕЛОУСОВ, М.А. СОКОЛОВ, Т.Х. ТЕНЧУРИН, С.Н. ЧВАЛУН*  
*S.I. BELOUSOV, M.A. SOKOLOV, T.KH. TENCHURIN, S.N. CHVALUN*

(НИЦ «Курчатовский институт»)

(NRC "Kurchatov Institute")

E-mail: serbell@gmail.com

*В статье представлены результаты получения карбидокремниевых матриц пиролизом волокнистых нетканых материалов, полученных методом электроформования из растворов поликарбосилана. Оптимизированы параметры электроформования и волокнообразующие свойства прядильных растворов. Полимерные и керамические волокна изучены методами электронной микроскопии, ИК-спектроскопии, элементного анализа. Предложенный способ получения карбидокремниевых матриц технологически значительно проще и экономически выгоднее существующих методов.*

*The paper presents the results of obtaining silicon carbide matrices by pyrolysis of fiber nonwoven materials obtained by electroforming from polycarbosilane solutions. Parameters of electroforming and fiber-forming properties of spinning solutions are optimized. Polymeric and ceramic fibers have been studied by electron microscopy, infrared spectroscopy, elemental analysis. The proposed method of obtaining the silicon carbide matrices is technologically much easier and economically more profitable than the existing methods.*

**Ключевые слова:** поликарбосиланы, карбидокремниевые волокна, электроформование.

**Keywords:** polycarbosilanes, silicon carbide fibers, electrospinning.

---

\* Работа выполнена в рамках тематического плана НИЦ «Курчатовский институт» с использованием оборудования его ресурсных центров.

## Введение

Производство керамик из полимерных прекурсоров было открыто более 60 лет назад [1]. Это привело к появлению керамических волокон, покрытий, высокотемпературных прочных керамических композитов, что способствовало прорыву во множестве технологических отраслей: энергетической, аэрокосмической, транспортной и других. Предкерамические полимеры являются объектами интенсивных научных исследований благодаря их потенциалу для формирования высокочистых керамик, особенно кремнийсодержащих [2]. Такой прогресс стал возможен благодаря большому количеству имеющихся способов формования полимеров, что позволило придать керамикам существенное разнообразие форм, что было недоступно при использовании традиционного порошкового метода [3, 4]. Существенный шаг вперёд был сделан профессором Яджимой, который получил непрерывные карбидокремниевые (SiC) керамические волокна пиролизом поликарбосилана (ПКС) [5, 6]. Сегодня разработано множество типов керамик из прекурсоров, таких, как  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , SiC, BN, AlN, SiCN, SiCO, SiCNO, SiBCN и др. Существуют достаточно исчерпывающие обзоры, охватывающие историю развития и современные достижения в области керамик из полимерных прекурсоров [7, 8].

Технология керамических волокон сегодня является старейшим и самым успешным применением полимерных прекурсоров. Технология синтеза становилась все совершеннее, что привело к созданию трёх поколений SiC волокон [9]. Разработаны различные методы формования волокон, такие, как сухое и мокрое прядение, прядение из расплава [10], используемые для получения микроволокна диаметром порядка десятка микрометров. Электроформование – это простой и эффективный метод, предложенный в 1940-х годах, позволяющий получать волокна с диаметром от десятка нанометров до нескольких микрометров, где вытягивающая сила имеет не механическую, а электростатическую природу. Такие нановолокна имеют множе-

ство применений, например, в медицине (тканевая инженерия, медицинские устройства, доставка лекарств, диагностика), производстве фильтров, конструкционных материалов. Нанокompозиты на основе нановолокон могут обладать дополнительными достоинствами по сравнению с композитами на основе микроволокон благодаря размерным эффектам, что может позволить нанокompозитам иметь лучшие механические характеристики, высокую удельную поверхность, регулируемую пористость и др. [11, 12]. На сегодняшний день нановолокна получены из более чем сотни полимеров.

По данной теме написано несколько подробных обзоров, описывающих как детали методики электроформования, так и различные приложения [13, 14].

Впервые керамические SiC нановолокна методом пиролиза нетканого мата, полученного электроформованием, получены Shinetal в 2008 г. [15]. Дальнейшие исследования в этом направлении были посвящены контролю толщины нановолокон [16-20], их морфологии [21-25], а также модификации полученных материалов [26-30].

Превращение полимера в керамику обычно требует предварительной стадии межмолекулярной сшивки, иначе полимер расплавится при пиролизе. Основным методом сшивки является нагрев на воздухе, способствующий появлению аморфной фазы  $\text{SiC}_x\text{O}_y$  в составе будущей керамики, что негативно сказывается на ее свойствах. И если для непрерывных микроволокон разработаны другие методы, не приводящие к включению кислорода [9] (такие, как сшивка электронным пучком или использование высокомолекулярного неплавящегося прекурсора), то для керамических нановолокон этой проблеме уделено меньше внимания.

В данной работе описано получение карбосиланового мата методом электроформования. Полученный волокнистый материал подвергался пиролизу в инертной атмосфере без предварительной кислородной сшивки, в ходе которого претерпел изменение морфологии, однако может

быть использован в качестве керамической матрицы.

#### *Материалы и методы*

ПКС с заявленной структурной формулой  $[-SiH(CH_3)-CH_2-]_n$  был закуплен у Alfa Chemical Co., Ltd (Китай), хлороформ – у Sigma-Aldrich. Реагенты использовали без дополнительной очистки. ПКС дополнительно охарактеризовали. Молекулярно-массовые характеристики определили, используя высокоэффективный жидкостный хроматограф KNAUER. Согласно данным хроматографии средневесовая молекулярная масса равна  $M_w = 1300$  Да, полидисперсность равна  $PDI = 2.0$ . Элементный анализ провели методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, используя растровый электронно-ионный микроскоп Helios Nanolab 600i (FEI, США). По данным элементного анализа, полимер неравномерно загрязнен кислородом, доля атомов кислорода варьируется от 4 до 8 %. Керамический остаток после пиролиза до  $1000^{\circ}C$  в потоке азота был определен при помощи термогравиметрического анализатора Perkin Elmer Pyris 1 TGA и составляет 68%. Раствор ПКС в хлороформе концентрацией 40 масс. % гомогенизировали при помощи магнитной мешалки в течение 24 часов и использовали в качестве прядильного раствора.

Для получения нетканого материала методом электроспиннинга использовали следующую установку. Прядильный раствор подавали через капилляр. Для вытяжки струи раствора использовали высокое постоянное напряжение. Струя затвердевает за счёт испарения растворителя до достижения заземленного металлического диска, на котором постепенно нарастает нетканый материал в виде переплетенных тонких полимерных волокон. Проводимость прядильного раствора равна  $\sigma = 6,1$  мкСм/см, расстояние до электрода составляет  $L = 25$  см, напряжение равно  $U = 30$  кВ. Прядильный раствор быстро затвердевает, потому во избежание закупоривания капилляра его обдували парами растворителя. Расход контролировали изменением давления, оказываемого на рас-

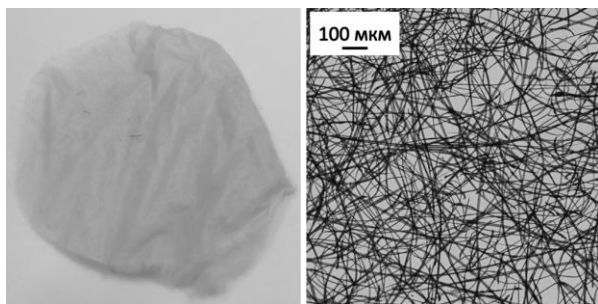
твор, и вычисляли, измеряя массу полученного материала за определенное время. Нетканый материал получали со скоростью 1,0 мг/ч. Полученный мат аккуратно снимали с электрода при помощи лезвия и отжигали в муфельной печи ПМ-1400 (ООО «Русуниверсал»). Пиролиз для получения керамического мата проводили в атмосфере аргона при температуре  $1200^{\circ}C$  в течение 1 ч. Скорость нагрева до температуры отжига составляла  $5^{\circ}C/мин$ .

Полученные полимерный и керамический маты изучали методами ИК-Фурье спектроскопии при помощи ИК-спектрометра NICOLET IS5, элементного анализа (Helios), оптической микроскопии с использованием микроскопа CARL ZEISS AXIO IMAGER.M2M.

#### *Результаты и обсуждение*

Получение полимерного мата приемлемого качества оказалось возможным лишь в узком диапазоне параметров установки. Так, раствор концентрацией 35 масс. % не позволяет получить волокна – струя разрывается на капли. Раствор с концентрацией 45 масс. % также обладает низкой вязкостью (раствор медленно капает из капилляра даже без приложения дополнительного давления), однако образующийся конус Тейлора быстро затвердевает, останавливая процесс (волокна все еще можно получать, если регулярно очищать капилляр). Затвердевание удалось замедлить при оптимальной концентрации раствора 40 масс. %, обдувая капилляр парами растворителя. Низкая вязкость растворов обусловлена невысокой молекулярной массой полимера, однако это же позволяет достичь высокого наполнения.

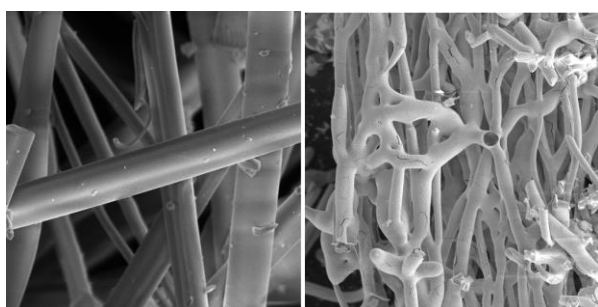
Полученные волокна отличаются хрупкостью. Если расстояние до электрода  $L$  увеличить с оптимального 25 см до 35 см (также соответственно увеличить напряжение  $U$ ), то мат будет состоять из коротких обломков. Мат легко снимается с приёмного электрода. Оптические фотографии полимерного волокна, полученного при оптимальных параметрах, представлены на рис.1.



а) б)  
Рис. 1

Полимерные волокна неоднородны по толщине, диаметр варьируется в диапазоне от 5 до 10 мкм. Поверхность волокон гладкая, мат не содержит дефектов в виде капель и пор.

При пиролизе в атмосфере аргона нетканый материал частично оплавился, что ожидаемо с учетом отсутствия стадии термической сшивки на воздухе. Однако структура материала частично сохранилась. Полученные на электронном микроскопе фотографии отдельных полимерных волокон, а также керамической матрицы представлены на рис. 2.



а) б)  
Рис. 2

Поверхность полученной матрицы шероховатая, присутствуют дефекты в виде трещин. Такие дефекты обычно обусловлены слишком быстрым выходом газов при пиролизе, чего можно избежать медленным нагревом.

Элементный анализ керамической матрицы представлен на рис. 3. Содержание кислорода в центре волокна соответствует таковому в исходном прекурсоре. Увеличение его содержания при движении к периферии говорит о протекании и процессов окисления. Для устранения этого эф-

фекта необходимо более тщательно контролировать состав атмосферы при пиролизе. Ответственен ли кислород в составе за частичное сохранение структуры нетканого материала при пиролизе, остаётся неясным.

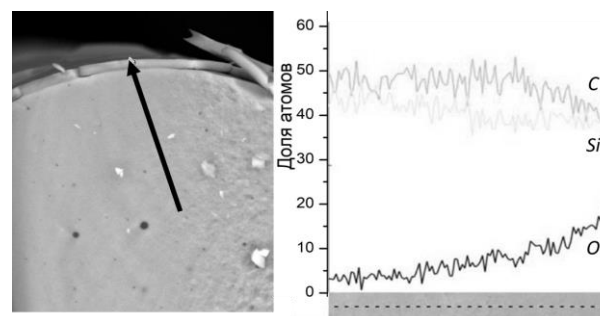


Рис. 3

Превращение полимера в керамику контролировали при помощи ИК-спектроскопии (рис. 4). При превращении полимера в керамику исчезли пики 2096, отвечающие валентному колебанию Si-H связи, пики 1406, 1250, 817, отвечающие деформационному колебанию C-H связей в SiCH<sub>3</sub> группе, а также 1356, 1014 пики, отвечающие деформационному колебанию Si-C связи в Si-CH<sub>2</sub>-Si группе. В спектре керамики присутствует пик 797, отвечающий колебаниям решетки карбида кремния, а также ярко выраженный пик 1098 деформационного Si-O-Si колебания. Однако пики 2950, 2900, отвечающие валентному колебанию связи C-H, не исчезли полностью, что говорит о незавершенности процесса пиролиза. Решением данной проблемы является увеличение времени выдержки при высокой температуре.

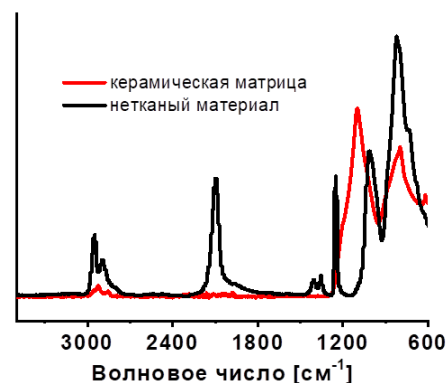


Рис. 4

## ВЫВОДЫ

Получены карбидокремниевые керамические волокнистые матрицы из поликарбосиланов на основе технологии электроформования из растворов полимеров. Электроформование позволяет создавать конструкции сложной формы в зависимости от требуемых изделий, что значительно упрощает технологический процесс, основанный на прядении волокон и изготовлении тканей на их основе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ainger F.W., Herbert J.M. The Preparation of Phosphorus-Nitrogen Compounds as Non-Porous Solids // *Special Ceramics*. 1960. P. 168...182.
2. Bill J., Aldinger F. Precursor-derived covalent ceramics // *Adv. Mater.* 1995, 7, № 9. P. 775...787.
3. Riedel R., Ionescu E., Chen I.-W. Modern trends in advanced ceramics // *Ceramics Science and Technology*. Vol. 1. 2008. P. 3...38.
4. Schulz M. Polymer derived ceramics in MEMS/NEMS – a review on production processes and application // *Adv. Appl. Ceram.* 2009, 108, №8. P. 454...460.
5. Yajima S., Hayashi J., Imori M. Continuous Silicon Carbide Fiber of High Tensile Strength // *Chem. Lett.* 1975, 4, № 9. P. 931...934.
6. Yajima S., Hasegawa Y., Okamura K., Matsuzawa I. Development of High Tensile Strength Silicon Carbide Fibre Using an Organosilicon Polymer Precursor // *Nature (London)*. 1978, 273. P. 525...527.
7. Colombo P., Mera G., Riedel R., Soraru G.D. Polymer-Derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics // *J. Am. Ceram. Soc.* 2010, 93, № 7. P. 1805...1837.
8. Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z., Hilali M., Rafik M., Elharf A. Polymer composite materials: A comprehensive review // *Composite Structures*. 2021, 262. P. 113640.
9. Bunsell A.R., Piant A. A review of the development of three generations of small diameter silicon carbide fibres // *J. Mater. Sci.* 2006, 41. P. 823...839.
10. Walczak Z.K. Processes of Fiber Formation. Elsevier, 2002. 414 p.
11. Baughman R.H., Zakhidov A.A., de Heer W.A. Carbon nanotubes – the route toward applications // *Science*.- 2002, 297. P. 787...792.
12. Lau K.-T., Hui D. The revolutionary creation of new advanced materials-carbon nanotube composites // *Composites Part B*. 2002, 33, № 4. P. 263...277.
13. Huang Z.-M., Zhang Y.-Z., Kotaki M., Ramakrishna S. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites // *Compos. Sci. Technol.* 2003, 63. P. 2223...2253.
14. Jain R., Shetty S., Yadav K.S. Unfolding the electrospinning potential of biopolymers for preparation of nanofibers // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2020, 57. №. 101604.
15. Shin D.-G., Riu D.-H., Kim H.-E. Web-type silicon carbide fibers prepared by the electrospinning of polycarbosilanes // *Journal of Ceramic Processing Research*. 2008, 9, №. 2. P. 209...214.
16. Eick B.M., Youngblood J.P. SiC nanofibers by pyrolysis of electrospunpreceramic polymers // *J. Mater. Sci.* 2009, 44, P. 160...165.
17. Liu H.A., Balkus K.J. Electrospinning of beta silicon carbide nanofibers // *Mater. Lett.* 2009, 63. P. 2361...2364.
18. Choi S.H., Youn D.Y., Seong M.J., Oh S.G., Kim I.D. Micelle-mediated synthesis of single-crystalline  $\beta(3C)$ -SiC fibers via emulsion electrospinning // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2011, 3. P. 1385...1389.
19. Wu N., Wan L.Y., Wang Y.D., Frank K. Electrospun silicon oxycarbide ultrafine fibers derived from polycarbosilane // *J. Inorg. Mater.* 2018, 33. P. 357...362.
20. Hou H., Gao F., Wei G., Wang M., Zheng J., Tang B., Yang W. Electrospinning 3C-SiC mesoporous fibers with high purities and well-controlled structures // *Cryst. Growth Des.* 2012, 12. P. 536...539.
21. Hou H., Dong C., Wang L., Gao F., Wei G., Zheng J., Cheng X., Tang B., Yang W. Electrospinning graphite/SiCmesoporous hybrid fibers with tunable structures // *Cryst. Eng. Comm.* 2013, 15. P. 2002...2008.
22. Wang B., Wang Y., Lei Y., Wu N., Gou Y., Han C., Fang D. Hierarchically porous SiC ultrathin fibers mat with enhanced mass transport, amphipathic property and high-temperature erosion resistance // *J. Mater. Chem. A*. 2014, 2. P. 20873...20881.
23. Liu Y.N., Liu Y., Choi W.C., Chae S., Lee J., Kim B.S., Park M., Kim H.Y. Highly flexible, erosion resistant and nitrogen doped hollow SiC fibrous mats for high temperature thermal insulators // *J. Mater. Chem. A*. 2017, 5. P. 2664...2672.
24. Wu N., Wang B., Wang Y. Enhanced mechanical properties of amorphous SiOC nanofibrous membrane through in situ embedding nanoparticles // *J. Am. Ceram. Soc.* 2018, 101. P. 4763...4772.
25. Lu P., Huang Q., Liu B., Bando Y., Hsieh Y.L., Mukherjee A.K. Macroporous. Silicon oxycarbide fibers with luffa-like superhydrophobic shells // *J. Am. Chem. Soc.* 2009, 131. P. 10346...10347.
26. Yu Y., Chen Y., An L. Flexible hydrophobic and lipophilic aluminum-doped silicon carbide fibrous mats synthesized by electrospinning polyaluminocarbosilane // *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 2014, 11. P. 699...705.
27. Wang Y., Han C., Zheng D., Lei Y. Large-scale, flexible and high-temperature resistant ZrO<sub>2</sub>/SiC ultrafine fibers with a radial gradient composition // *J. Mater. Chem. A*. 2014, 2. P. 9607...9612.
28. Wang B., Wang Y., Lei Y., Xie S., Wu N., Gou Y., Han C., Shi Q., Fang D. Vertical SnO<sub>2</sub> nanosheets  $\alpha$ SiC nanofibers with hierarchical architecture for high-performance gas sensors // *J. Mater. Chem. C*. 2016, 4. P. 295...304.

29. Hou Y., Cheng L., Zhang Y., Yang Y., Deng C., Yang Z., Chen Q., Du X., Zheng L. SiC nanofiber mat: a broad-band microwave absorber, and the alignment effect // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017, 9. P. 43072...43080.

30. Hou Y., Cheng L., Zhang Y., Yang Y., Deng C., Yang Z., Chen Q., Du X., Zhao C., Zheng L. Enhanced flexibility and microwave absorption properties of HfC/SiC nanofiber mats // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018, 10. P. 29876...29883.

## REFERENCES

1. Ainger F.W., Herbert J.M. The Preparation of Phosphorus-Nitrogen Compounds as Non-Porous Solids // Special Ceramics. 1960. P. 168...182.

2. Bill J., Aldinger F. Precursor-derived covalent ceramics // Adv. Mater. 1995, 7, № 9. P. 775...787.

3. Riedel R., Ionescu E., Chen I.-W. Modern trends in advanced ceramics // Ceramics Science and Technology. Vol. 1. 2008. P. 3...38.

4. Schulz M. Polymer derived ceramics in MEMS/NEMS – a review on production processes and application // Adv. Appl. Ceram. 2009, 108, №8. P. 454...460.

5. Yajima S., Hayashi J., Imori M. Continuous Silicon Carbide Fiber of High Tensile Strength // Chem. Lett. 1975, 4, № 9. P. 931...934.

6. Yajima S., Hasegawa Y., Okamura K., Matsuzawa I. Development of High Tensile Strength Silicon Carbide Fibre Using an Organosilicon Polymer Precursor // Nature (London). 1978, 273. P. 525...527.

7. Colombo P., Mera G., Riedel R., Soraru G.D. Polymer-Derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2010, 93. № 7. P. 1805...1837.

8. Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z., Hilali M., Rafik M., Elharf A. Polymer composite materials: A comprehensive review // Composite Structures. 2021, 262. P. 113640.

9. Bunsell A.R., Piant A. A review of the development of three generations of small diameter silicon carbide fibres // J. Mater. Sci. 2006, 41. P. 823...839.

10. Walczak Z.K. Processes of Fiber Formation. Elsevier, 2002. 414 p.

11. Baughman R.H., Zakhidov A.A., de Heer W.A. Carbon nanotubes – the route toward applications // Science. 2002, 297. P. 787...792.

12. Lau K.-T., Hui D. The revolutionary creation of new advanced materials-carbon nanotube composites // Composites Part B. 2002, 33, № 4. P. 263...277.

13. Huang Z.-M., Zhang Y.-Z., Kotaki M., Ramakrishna S. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites // Compos. Sci. Technol. 2003, 63. P. 2223...2253.

14. Jain R., Shetty S., Yadav K.S. Unfolding the electrospinning potential of biopolymers for preparation of nanofibers // Journal of Drug Delivery Science and Technology. 2020, 57. №. 101604.

15. Shin D.-G., Riu D.-H., Kim H.-E. Web-type silicon carbide fibers prepared by the electrospinning of

polycarbosilanes // Journal of Ceramic Processing Research. 2008, 9, №. 2. P. 209...214.

16. Eick B.M., Youngblood J.P. SiC nanofibers by pyrolysis of electrospun preceramic polymers // J. Mater. Sci. 2009, 44, P. 160...165.

17. Liu H.A., Balkus K.J. Electrospinning of beta silicon carbide nanofibers // Mater. Lett. 2009, 63. P. 2361...2364.

18. Choi S.H., Youn D.Y., Seong M.J., Oh S.G., Kim I.D. Micelle-mediated synthesis of single-crystalline  $\beta$ (3C)-SiC fibers via emulsion electrospinning // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2011, 3. P. 1385...1389.

19. Wu N., Wan L.Y., Wang Y.D., Frank K. Electrospun silicon oxycarbide ultrafine fibers derived from polycarbosilane // J. Inorg. Mater. 2018, 33. P. 357...362.

20. Hou H., Gao F., Wei G., Wang M., Zheng J., Tang B., Yang W. Electrospinning 3C-SiC mesoporous fibers with high purities and well-controlled structures // Cryst. Growth Des. 2012, 12. P. 536...539.

21. Hou H., Dong C., Wang L., Gao F., Wei G., Zheng J., Cheng X., Tang B., Yang W. Electrospinning graphite/SiC mesoporous hybrid fibers with tunable structures // Cryst. Eng. Comm. 2013, 15. P. 2002...2008.

22. Wang B., Wang Y., Lei Y., Wu N., Gou Y., Han C., Fang D. Hierarchically porous SiC ultrathin fibers mat with enhanced mass transport, amphipathic property and high-temperature erosion resistance // J. Mater. Chem. A. 2014, 2. P. 20873...20881.

23. Liu Y.N., Liu Y., Choi W.C., Chae S., Lee J., Kim B.S., Park M., Kim H.Y. Highly flexible, erosion resistant and nitrogen doped hollow SiC fibrous mats for high temperature thermal insulators // J. Mater. Chem. A. 2017, 5. P. 2664...2672.

24. Wu N., Wang B., Wang Y. Enhanced mechanical properties of amorphous SiOC nanofibrous membrane through in situ embedding nanoparticles // J. Am. Ceram. Soc. 2018, 101. P. 4763...4772.

25. Lu P., Huang Q., Liu B., Bando Y., Hsieh Y.L., Mukherjee A.K. Macroporous. Silicon oxycarbide fibers with luffa-like superhydrophobic shells // J. Am. Chem. Soc. 2009, 131. P. 10346...10347.

26. Yu Y., Chen Y., An L. Flexible hydrophobic and lipophilic aluminum-doped silicon carbide fibrous mats synthesized by electrospinning polyaluminocarbosilane // Int. J. Appl. Ceram. Technol. 2014, 11. P. 699...705.

27. Wang Y., Han C., Zheng D., Lei Y. Large-scale, flexible and high-temperature resistant ZrO<sub>2</sub>/SiC ultrafine fibers with a radial gradient composition // J. Mater. Chem. A. 2014, 2. P. 9607...9612.

28. Wang B., Wang Y., Lei Y., Xie S., Wu N., Gou Y., Han C., Shi Q., Fang D. Vertical SnO<sub>2</sub> nanosheets/SiC nanofibers with hierarchical architecture for high-performance gas sensors // J. Mater. Chem. C. 2016, 4. P. 295...304.

29. Hou Y., Cheng L., Zhang Y., Yang Y., Deng C., Yang Z., Chen Q., Du X., Zheng L. SiC nanofiber mat: a broad-band microwave absorber, and the alignment effect // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017, 9. P. 43072...43080.

30. Hou Y., Cheng L., Zhang Y., Yang Y., Deng C., Yang Z., Chen Q., Du X., Zhao C., Zheng L. Enhanced flexibility and microwave absorption properties of HfC/SiCnanofiber mats // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018, 10. P. 29876...29883.

Рекомендована тематическим семинаром «Органические и гибридные наноматериалы» Курчатковского КК НБИКС-пт НИЦ «Курчатовский институт». Поступила 06.10.23.

---