

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

- Абдульменова Е. В., Ваулина О. Ю., Кульков С. Н.* Структура и свойства железоникелевых инварных сплавов, полученных спеканием порошков ..... 7
- Лукина Е. А., Зайцев Д. В., Заводов А. В.* Состав и строение фазовых образований в жаропрочном никелевом сплаве в зависимости от параметров синтеза при селективном лазерном сплавлении и режимов термообработки ..... 14
- Свичкарь А. С., Шибеев Е. А., Гарибян Г. С., Еремин Е. Н.* Влияние предсудачного расширения на размерную точность отливок из высокопрочного чугуна ..... 23
- Савченко А. М., Коновалов Ю. В.* Сопоставление традиционного и классического подходов ко второму закону термодинамики и фазовым равновесиям ..... 29

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Дмитрюк А. И., Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Самоделкин Е. А., Соколова Н. А., Фармаковский Б. В.* Наноструктурированный сплав на основе кобальта для восстановления и ремонта деталей прецизионного машиностроения ..... 38
- Фармаковский Б. В., Улин И. В., Яковлева Н. В.* Создание каталитического объемно-пористого покрытия на металлическом электропроводящем носителе ..... 44
- Виноградова Т. С., Гюлиханов Е. Л., Улин И. В., Фармаковский Б. В., Яковлева Н. В.* Каталитически активные порошковые композиции для систем снижения токсичности вредных выбросов в атмосферу ..... 51
- Бобкова Т. И., Быстров Р. Ю., Геращенко Д. А., Песков Т. В., Фармаковский Б. В.* Разработка сплава на основе серебра для коррозионно-стойких ультрадисперсных и наноструктурированных покрытий ..... 60
- Кравцов Н. А., Фармаковский Б. В.* Получение сверхтонких литых микропроводов в стеклянной изоляции для создания на их основе метаматериалов ..... 67
- Шарин П. П., Акимова М. П., Яковлева С. П., Никифоров Л. А., Попов В. И.* Особенности формирования структуры межфазной зоны при термодиффузионной металлизации алмаза переходными металлами ..... 75

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Данилова С. Н., Дьяконов А. А., Васильев А. П., Герасимова Ю. С., Охлопкова А. А., Слепцова С. А.* Исследование триботехнических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного серой, дифенилгуанидином и 2-меркаптобензотиазолом ..... 91
- Валуева М. И.* Достижения и перспективы в области сырьевых источников для получения углеродных волокон (Обзор) ..... 99
- Малаховский С. С., Валуева М. И., Имамединов Э. Ш.* Сверхвысокомолекулярный полиэтилен как перспективный компонент в армированных полимерных композиционных материалах (Обзор) ..... 116

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

- Голосиенко С. А., Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Михайлов М. С., Мотовилина Г. Д., Петров С. Н., Садкин К. Е.* Сопrotивление хрупкому разрушению высокопрочной среднелегированной стали и его связь с параметрами структурного состояния ..... 128
- Митрофанов А. С., Крайнюк Е. А., Гоженко С. В., Воеводин В. Н., Василенко Р. Л.* Взаимосвязь коррозионных повреждений с неметаллическими включениями в элементах трубных металлоконструкций АЭС ..... 148

## **РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

*Гурович Б. А., Фролов А. С., Кулешова Е. А., Мальцев Д. А., Сафонов Д. В., Кочкин В. Н., Решетников А. А.* Эволюция структурно-фазового состояния оболочек твэлов из сплава Э110 под действием повышенных температур и напряжений..... 157

## **ХРОНИКА**

*Орыщенко А. С., Цуканов В. В., Милейковский А. Б., Савичев С. А., Нигматулин О. Э.* Сварочные технологии в танкостроении в период 1939–1945 гг. .... 175

**Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов** ..... 196

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВЫХ ИНВАРНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СПЕКАНИЕМ ПОРОШКОВ

Е. В. АБДУЛЬМЕНОВА<sup>1,2</sup>, О. Ю. ВАУЛИНА<sup>2</sup>, канд. техн. наук,  
С. Н. КУЛЬКОВ<sup>1,2</sup>, д-р физ.-мат. наук

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН»  
(ИФПМ СО РАН), 634055, Томск, пр. Академический, 2/4, E-mail: root@ispms.tomsk.ru

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»  
(НИ ТПУ), 634050, Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 22.05.2019

После доработки 7.06.2019

Принята к публикации 11.06.2019

Исследованы структура и физико-механические свойства железоникелевых инварных сплавов, полученных спеканием порошков. Показано, что при спекании порошков железа и никеля формируется сплав с гранецентрированной кубической структурой, параметры решеток которого соответствуют инварным составам. Полученные инварные сплавы имеют твердость, модуль Юнга, и коэффициент термического расширения, сопоставимые с литературными данными. Модуль Юнга находится в интервале от 83 до 126 ГПа в зависимости от состава и температуры спекания, коэффициент термического расширения в интервале температур от 0 до 150°C составляет  $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , в интервале температур от 300 до 500°C –  $15,8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Показано, что при температуре 225°C происходит фазовый переход, связанный с потерей магнитных свойств.

*Ключевые слова:* железоникелевые сплавы, инвар, спекание, микроструктура, модуль Юнга, твердость, коэффициент линейного термического расширения, фазовый состав

### ЛИТЕРАТУРА

1. Guillaume C. E. Recherches sur les aciers au nickel. Dilatations aux temperatures elevees: resistance electrique // Comptes rendus de l'Académie des Sciences. – 1897. – N 125. – P. 235–238.
2. Maslyuk V. A., Panasyuk O. A., Vlasova, O. V. Physical, technological and magnetic properties of powder iron–nickel alloys // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2003. – N 42. – P. 536–539.
3. German R. M. Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing. – Metal Powder Industries Federation. – 2005. – Princeton. – New Jersey. – 528 p.
4. Chang I., Zhao Y. Advances in powder metallurgy: Properties, processing and applications. – Woodhead Publishing Limited. – 2013. – 604 p.
5. Кипарисов С. С. Порошковая металлургия. – М.: Металлургия, 1980. – 496 с.
6. Synthesis of controlled-chemistry ultrafine Fe-Ni<sub>1-x</sub> ferromagnetic powders / C. Duhamel, Y. Champion et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2005. – N 393. – P. 204–210.
7. Mechanical and functional properties of Invar alloy for  $\mu$ -MIM / J. Hidalgo, A. Jiménez-Morales, T. Barriere et al. // Powder Metallurgy. – 2014. – N 2. – P. 127–136.
8. Оглезнева С. А., Саенков К. Л., Гревнов Л. М. Исследование физико-механических свойств и температур фазовых превращений порошковых Fe–Ni-сплавов // Вестник ПНИПУ. – 2017. – № 3. – С. 34–48.
9. German R. Metal powder injection molding (MIM): key trends and markets: Handbook of metal injection molding. – Woodhead Publishing Limited, 2012. – P. 1–12.
10. Randall M. Markets applications, and financial aspects of global metal powder injection moulding (MIM) technologies. – MPR, 2012. – P. 18–26.
11. Petzoldt F. Current status and future perspectives of the MIM technology // Ceram. Forum Int. – 2012. – N 89. – P. 11–15.
12. Scherrer P. Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen // Göttinger Nachrichten Gesellschaft. – 1918. – N 2. – P. 98–101.

13. Stokes A. R., Wilson A. J. C. The diffraction of X rays by distorted crystal aggregates // Proceedings of the Physical Society, 1944. – P. 174–181.
14. ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577-1:2002). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. – М.: Стандартиформ, 2013. – 28 с.
15. Корицкий Ю. В. Справочник по электротехническим материалам. Т. 3. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 726 с.
16. Chamberod A., Laugier J., Penisson J. M. Electron irradiation effects on iron-nickel invar alloys // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1979. – N 10. – P. 139–144.
17. Prabhu Y., Rao K. X-Ray analysis by Williamson-Hall and size-Strain plot methods of ZnO nanoparticles with fuel variation // World Journal of Nano Science and Engineering. – 2014. – N 4. – P. 21–28.
18. Davies J. R. Special-purpose nickel alloys // ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt and their Alloys. – ASM International, 2000. – 421 p.
19. Davies J. R. 36% nickel-iron alloy for low temperature service // ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt and their Alloys. – ASM International, 2000. – 421 p.
20. Hidalgo J., Jimenez-Morales A. Water soluble Invar 36 feedstock development for  $\mu$ -PIM // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – N 214. – P. 436–444.
21. Cubberly W. H. Properties and selection – nonferrous alloys and pure metals. – ASM Metals handbook. V. 2. – ASM International, 1979. – 3470 p.
22. Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия. 1980. – 320 с.
23. Angular dependence of sputtering for nickel in ferro- and paramagnetic states / D. A. Konov, A. S. Mosunov, G. V. Adamov et al. // Vacuum. – 2002. – P. 47–53.

УДК 669.245.018.44:621.762.32:621.785

## **СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ЖАРОПРОЧНОМ НИКЕЛЕВОМ СПЛАВЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ СПЛАВЛЕНИИ И РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ**

Е. А. ЛУКИНА, канд. техн. наук, Д. В. ЗАЙЦЕВ, А. В. ЗАВООДОВ

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»  
(ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: admin@viam.ru*

Поступила в редакцию 29.05.2019

После доработки 17.06.2019

Принята к публикации 18.06.2019

Исследована структура образцов из сплава ЖС6К-ВИ, полученных методом селективного лазерного сплавления в инертной атмосфере азота, при скоростях сканирования 600, 1000 и 1200 мм/с, а также после дополнительной термической обработки. Распределение легирующих элементов в структуре синтезированных и термообработанных образцов, фазовый состав, морфологию и строение фаз изучали методом просвечивающей электронной микроскопии. Показано влияние скорости сканирования на структуру синтезированного материала и распределение легирующих элементов в пределах ячеек кристаллизации.

*Ключевые слова:* селективное лазерное сплавление, жаропрочный никелевый сплав,  $\gamma'$ -фаза, карбиды, оси дендритов, ячейки

### ЛИТЕРАТУРА

1. Carter L.N., Attallah M. M., Reed R.C. Laser powder bed fabrication of nickel-base superalloys: Influence of parameters characterisation, quantification and mitigation of cracking // Superalloys. Part 3. – John Wiley & Sons, Inc., 2012. – P. 577–586.

2. Yadroitsev I., Krakhmalev P., Yadroitsava I., Johansson S., Smurov I. Energy in put effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – N 213. – P. 606–613.
3. Nanostructural self-organization under selective laser sintering of exothermic powder mixtures / I. Shishkovsky, et al. // *Applied Surface Science*. – 2009. – V. 255. – P. 5565–5568.
4. Волхонский А. Е., Дудков К. В. Методы изготовления прототипов и деталей агрегатов различных изделий промышленности с помощью аддитивных технологий // *Образовательные технологии*. – 2014. – № 1. – С. 127–143.
5. Каблов Е. Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. – 2015. – № 2 (11). – С. 52–55.
6. Каблов Е. Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. – 2017. – № 1. – С. 2–6.
7. Магеррамова Л. А., Ножницкий Ю. А., Васильев Б. Е., Кинзбургский В. С. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей перспективных газотурбинных двигателей // *Технология легких сплавов*. – 2015. – № 4. – С. 7–13.
8. Wang Z., Guan K., Gao M., Li X., Chen X., Zeng X. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting // *J. Alloys and Compounds*. – 2012. – V. 513. – P. 518–523.
9. Герасимов В. В. От монокристаллических неохлаждаемых лопаток к лопаткам турбин с проникающим (транспирационным) охлаждением, изготовленным по аддитивным технологиям (обзор по технологии литья монокристаллических лопаток ГТД) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.*, 2016. – № 10. Ст.01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 7.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-1-1
10. Неруш С. В., Евгенов А. Г. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава марки ЭП648-ВИ применительно к лазерной LMD-наплавке, а также оценка качества наплавки порошкового материала на никелевой основе на рабочие лопатки ТВД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2014. – № 3. Ст.01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 7.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1
11. Евгенов А. Г., Рогалев А. М., Неруш С. В., Мазалов И. С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2015. – № 2. Ст.02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 7.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2
12. Евгенов А. Г., Горбовец М. А., Прагер С. М. Структура и механические свойства жаропрочных сплавов ВЖ159 и ЭП648, полученных методом селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. – 2016. – № S1. – С. 3–7. DOI 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15
13. Назаркин Р. М., Петрушин Н. В., Рогалев А. М. Структурно-фазовые характеристики сплава ЖС32-ВИ, полученного методами направленной кристаллизации, гранульной металлургии и селективного лазерного сплавления // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2017. – № 2. Ст.02 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 7.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-2-2
14. Дынин Н. В., Заводов А. В., Оглодков М. С., Хасиков Д. В. Влияние параметров процесса селективного лазерного сплавления на структуру алюминиевого сплава системы Al–Si–Mg // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2017. – № 10. Ст.01. (58). URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 7.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-1-1
15. Каблов Е. Н., Лукина Е. А., Сбитнева С. В., Хохлатова Л. Б., Зайцев Д. В. Формирование метастабильных фаз при распаде твердого раствора в процессе искусственного старения Al-сплавов // *Технология легких сплавов*. – 2016. – № 3. – С. 7–17.
16. Лукина Е. А., Базалева К. О., Цветкова Е. В., Петрушин Н. В. Особенности формирования структуры жаропрочного никелевого сплава ЖС6К-ВИ при селективном лазерном сплавлении // *Цветные металлы*. – 2016. – № 3. – С. 57–63.
17. Lukina E. A., Bazaleeva K. O., Petrushin N. V., Zaytsev D. V. Regularity of grain structure formation in alloy Ni–Al–W–Co–Nb–Cr–Ti–Mo, synthesized by SLM method during melting, heat treatment and heat isostatic pressure // *Proceedings of the VIII International conference "Beam technologies and*

laser application" (BTLA-2015). 21–24 September 2015, Saint-Petersburg / Ed. by G. A. Turichin. <URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/k16-3.pdf>

18. Лукина Е. А., Базалева К. О., Тренингов И. А., Петрушин Н. В. Цветкова Е. В. Влияние параметров селективного лазерного плавления на структурно-фазовое состояние жаропрочного никелевого сплава ЖС6К-ВИ // *Металлы*. – 2017. – № 4. – С. 63–70.

19. Тренингов И. А., Филонова Е. В., Медведев П. Н., Лукина Е. А. Исследование кристаллографической текстуры в жаропрочном никелевом сплаве после селективного лазерного сплавления и термической обработки // *МИТОМ*. – 2019. – № 2 (764). – С. 65–68.

УДК 669.13:621.746.019

### **ВЛИЯНИЕ ПРЕДУСАДОЧНОГО РАСШИРЕНИЯ НА РАЗМЕРНУЮ ТОЧНОСТЬ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА**

А. С. СВИЧКАРЬ, Е. А. ШИБЕЕВ, канд. техн. наук, Г. С. ГАРИБЯН, канд. техн. наук,  
Е. Н. ЕРЕМИН, д-р техн. наук

*ФГБОУ ВО Омский государственный технический университет, 644050, Омск, пр. Мира, 11.  
E-mail: alena\_svichkar@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.05.2019

После доработки 12.08.2019

Принята к публикации 12.08.2019

Рассмотрено влияние графитовых включений на предусадочное расширение в отливках из высокопрочного чугуна. Предложены имитационная модель и программное обеспечение. Установлено, что на предусадочное расширение и, следовательно, на размерную точность отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом влияет количество и размер данных включений. Показано, что при мелкодисперсной фазе графита расширение образца в 1,74 раза меньше, чем при крупнозернистой фазе, а размерная точность образца на 2 класса выше.

*Ключевые слова:* высокопрочный чугун, шаровидный графит, предусадочное расширение, размерная точность

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Skaland T. Контроль за усадкой высокопрочных чугунов посредством формирования и роста включений графита // *Литейщик России*. – 2011. – № 7. – С. 16–22.

2. Влияние модифицирующих добавок на образование графита в высокопрочном чугуне и усадочные дефекты в отливках / Ю. А. Зиновьев, А. А. Колпаков, С. В. Кузнецов и др. // *Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. Металлургия и материаловедение*. – 2015. – № 2 (109). – С. 226–233.

3. Анисимова А. А., Шибеев Е. А. К вопросу о предусадочном расширении чугуновых отливок // *Материалы Четвертой междунар. студ. науч.-практ. конф. «Техника и технологии машиностроения»*, 25–30 марта, 2015 г., ОмГТУ. – Омск, 2015. – С.11–14.

4. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теория упругости. – М.: Наука, 1965. – 204 с.

5. ГОСТ Р 53464–2009. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку. Введ. 2010-07-01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 56 с.

6. QForm2D/3D. Сайт компании QuantorForm. URL: <http://www.qform3d.ru> (дата обращения 22.10.2018).

7. Покровский А. И., Луцки П. Е. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и особенности структурообразования чугуна при горячем вдавливании // *Литье и металлургия*. – 2014. – № 4 (77). – С. 33–43.

УДК 536.73

### **СОПОСТАВЛЕНИЕ ТРАДИЦИОННОГО И КЛАССИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ КО ВТОРОМУ ЗАКОНУ ТЕРМОДИНАМИКИ И ФАЗОВЫМ РАВНОВЕСИЯМ**

А. М. САВЧЕНКО, канд. техн. наук, Ю. В. КОНОВАЛОВ, канд. техн. наук

Поступила в редакцию 18.01.2019

После доработки 21.08.2019

Принята к публикации 22.08.2019

Приведены сопоставление и анализ расхождения традиционного (принятого в настоящее время) и классического (основанного на работах классиков в области термодинамики) подходов ко второму закону термодинамики и фазовым равновесиям, а также краткий комментарий их расхождения. Отмечено, в частности, что при физико-химических процессах даже при идеальном смешении (когда выделения или поглощения тепла практически не наблюдается) происходят скрытые энергетические процессы внутри системы, которые взаимно компенсируют друг друга, а именно выделение энергии за счет усиления межатомных связей и ее одновременное поглощение (произведенная работа) за счет увеличения энергии колебаний, т. е. повышения средней теплоемкости.

*Ключевые слова:* термодинамика, свободная энергия, энтропия, энтропия смешения, конфигурационная энтропия, второй закон термодинамики

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cahn R. W., Haasen P. Physical Metallurgy. 4th edition. – Elsevier, 1996. – 2740 p.
2. Gibbs J.W., On the Equilibrium of Heterogeneous Substances // Collected Works of Gibbs J.W. [Yale Univ. Press]. – 1948. – V. 1. – P. 55.
3. Swalin R. A. Thermodynamics of Solids. – NewYork–London: John Wiley & Sons, 1967. – P. 156–160
4. Hume-Rothery W., Haworth C.W., Smallman R.E. The structure of metals and alloys // 5th edition, London, Institute of Metals, 1969. – 407 p.
5. Chen J., Zhou X., Wang W., Liu B., Liu Y. A review on fundamental of high entropy alloys with promising high-temperature properties // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – V. 760. – P. 15–30
6. Lu Y., Jiang H., Guo S., Wang T., Li T. A new strategy to design eutectic high-entropy alloys using mixing enthalpy // Intermetallics. – 2017. – V. 91. – P. 124–128.
7. Ивченко М. В., Пушин В. Г., Wanderka N. Высокоэнтропийные эквивалентные сплавы AlCrFe-CoNiCu: гипотезы и экспериментальные факты // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, вып. 2. – С. 57–69.
8. Бочвар А. А. Металловедение. – М.: Metallurgizdat, 1956. – 495 с.
9. Захаров А. М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем – М.: Metallurgiya, 1978. – 295 с.
10. Ansara I. Comparison of methods of thermodynamic calculation of phase diagrams // International Metals Reviews. – 1979. – N. 1. – P. 20–55.
11. Cottrell A. H. Theoretical Structural Metallurgy. – Arnold London, 1948. – 256 p.
12. Prigogine I., Defay R. Chemical Thermodynamics. – London, New York, Toronto: Longmans Green and Co, 1954. – 576 p.
13. Савченко А. М. «Скрытая термодинамика» – трезвый взгляд на известные вещи. Твердые и жидкие растворы // Атомная стратегия. – 2015. – Вып. 109. – С. 17–23.
14. Савченко А. М., Коновалов Ю. И., Лаушкин А. В Анализ с позиции классической термодинамики экспериментальных данных по изменению температуры и энтальпии плавления эвтектических сплавов при изменении взаимной ориентировки фаз // Письма о материалах. – 2016. – N 6 (2). – С. 194–198.
15. Савченко А. М. Энергетическая природа конфигурационной энтропии. Генерация энтропийных и антиэнтропийных потоков. – Германия, Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2015 – 51 с. EAN: 978-3-659-74093-0,
16. Савченко А. М. Разработка новых подходов к теории сплавов // Препринт ВНИИНМ, 2-98. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1998. – 18 с.

17. Савченко А. М., Коновалов Ю. В., Юферов О. И. Межфазная термодинамическая связь в гетерогенных сплавах и ее влияние на свойства сплавов // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 3. – С. 5–14.

18. Савченко А. М., Чернов В. М. Межфазная термодинамическая связь в гетерогенных сплавах и явление кластерного поглощения энергии в переохлажденных расплавах // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), серия «Материаловедение и новые материалы». – 2005. – Вып. 2 (65). – С. 155–166.

19. Савченко А. М., Юферов О. И., Ногин Н. И.. Изменение температуры и энтальпии плавления эвтектических сплавов при изменении взаимной ориентировки фаз // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), серия «Материаловедение и новые материалы». – 2012. – Вып. 2 (73). – С. 44–51.

20. Савченко А. М., Энтропийные эффекты в многофазных системах // Атомная стратегия. – 2016. – Вып. 111. – С. 28–33.

УДК 621.793.7:669.255

### **НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЙ СПЛАВ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ ПРЕЦИЗИОННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**

А. И. ДМИТРИЮК, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, Е. А. САМОДЕЛКИН,  
Н. А. СОКОЛОВА, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49, E-mail: mail@crism.ru*

Поступила в редакцию 28.02.2019

После доработки 5.07.2019

Принята к публикации 9.07.2019

Приведены данные по разработке сплава системы Co–Cr–Si–B, легированного редкоземельными элементами – церием, лантаном и иттрием. Разработаны технологии получения порошков из указанного сплава с помощью дезинтегратора ДЕЗИ-15 и восстановления деталей и узлов прецизионного машиностроения с использованием метода сверхзвукового холодного газодинамического напыления.

*Ключевые слова:* дезинтеграторная обработка, сверхзвуковое холодное газодинамическое напыление, микротвердость.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nanotechnology in Russia: Market Report <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3543>.
2. Юрков М. А., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А. Разработка технологических процессов сверхзвукового гетерофазного переноса для получения наноматериалов в виде широкого спектра применения // Сб. докладов международного научно-практического симпозиума «Наноструктурные функциональные покрытия для промышленности». Т. 1. – НИЦ «ХФТИ». – Харьков: ИПП «Контраст», 2006. – С. 251.
3. Shtansky D. V., Kaneko K., Ikuhara Y., Levashov E. A. Characterization of nanostructure multi-phase Ti–Al–B–N thin films with extremely small grain size // Surface and Coatings Technology. – 2001. – V. 148. – С. 206–215.
4. Бурканова Е. Ю., Фармаковский Б. В. Высокоскоростной механосинтез с использованием дезинтеграторных установок для получения наноструктурированных порошковых материалов системы металл – керамика износостойкого класса // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 1(69). – С. 80–85.
5. Малышевский В. А., Фармаковский Б. В. Разработка технологии сверхзвукового холодного газодинамического напыления наноструктурированных покрытий для водородной энергетики // Сб. докладов международного научно-практического симпозиума «Наноструктурные функциональные покрытия для промышленности». Т. 1, НИЦ «ХФТИ». – Харьков: ИПП «Контраст», 2006.
6. ДИМЕТ. Применение технологии и оборудования // Интернет-ресурс. Режим доступа <http://www.dimet-r.narod.ru>.

7. Попович А. А., Разумов Н. Г., Силин А. О., Гюлиханданов Е. Л. Механохимический синтез высоколегированных порошковых сплавов системы Fe–Cr–Ni–Mn–N // Известия высших учебных заведений: Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2013. – № 1. – С. 18–22.

8. Патент РФ № 2543579 от 15.03.2013. Сплав на основе кобальта для нанесения покрытий / Петраускене Я.В., Кузнецов П.А., Фармаковский Б.В., Бобкова Т.И., Васильев А.Ф., Юрков М.А., Деев А.А. Оpubл. 10.03.2015 // Бюлл. № 7.

9. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Машек А. У. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 1(77). – С. 87–96.

10. Бобкова Т. И. Разработка прецизионных сплавов и технологий формирования износостойких коррозионно-стойких градиентных покрытий – основа создания изделий, работающих в экстремальных условиях // Изобретательство. – 2016. – № 7. – С. 11–15.

11. Применение наноматериалов для рабочих органов почвообрабатывающих машин / Кузнецов П. А., Голосиенко С. А., Деев А. А., Бобкова Т. И. и др. // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2013. – № 3. – С. 75–76.

12. Бобкова Т.И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017.

УДК 621.793.7–405.8:537.31

### СОЗДАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ОБЪЕМНО-ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕМ НОСИТЕЛЕ

Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук, И. В. УЛИН, канд. техн. наук, Н. В. ЯКОВЛЕВА

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 4.03.2019

После доработки 12.03.2019

Принята к публикации 18.03.2019

Приведены результаты исследований по разработке технологии получения каталитически активного объемно-пористого покрытия на металлическом электропроводящем носителе с использованием методов сверхзвукового холодного газодинамического и микроплазменного напыления.

*Ключевые слова:* пористый материал, сверхзвуковое холодное газодинамическое напыление, микроплазменное напыление, каталитическая активность, удельная поверхность, открытая пористость

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Пат. RU № 2351436. Способ изготовления порошковых материалов для электродов химических источников тока / Дорофеев Ю. Г., Сергиенко С. Н., Коломиец Р. В. – Оpubл. 10.04.2009.

2. Пат. RU № 2080694. Аршинов А. Н., Гудимов Н. Л., Ковалев А. Н., Шубин П. Ю. Способ изготовления пористой основы безламельных электродов щелочных аккумуляторов. – Оpubл. 7.05.1997.

3. Пат. RU № 2110619. Электрод для электрохимических процессов и способ его получения / ЗАО «Техно-ТМ». – Оpubл. 10.05.1998.

4. Пат. RU № 2402839. Способ изготовления электрода / Яковлева Н. В., Тараканова Т. А., Фармаковский Б. В., Улин И. В., Шолкин С. Е., Юрков М. А. – Оpubл. 27.10.2010.

5. Половинкин В. Н. Современное состояние, перспективы и проблемы дальнейшего развития нанотехнологий в России и за рубежом // Оборонный заказ. – 2008. – № 19. – С. 2–12.

6. Балабанов В. Нанотехнологии. Наука будущего. – М.: Эксмо, 2009. – 247 с.

7. Позняк С. К., Мальтанова А. М., Перевозников С. С., Цибульская Л. С. Получение светопоглощающих покрытий на титане методом микроплазменного анодирования // Сб. докладов 11 Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка», Минск, 2019. – С. 70–76.

8. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологий получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017.

9. Юрков М. А., Фармаковский Б. В., Шолкин С. Е. Разработка технологии получения методом микроплазменного напыления катодов высокоемких химических источников тока для аварийно-спасательных комплексов на море // Материалы VI молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее 2008», СПб., ФГУП «ЦКБМТ «Рубин», 2008. – С. 178–185.

УДК 621.793:628.52:62–784.43

## КАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ПОРОШКОВЫЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ

Т. С. ВИНОГРАДОВА<sup>1</sup>, Е. Л. ГЮЛИХАНДАНОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, И. В. УЛИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Н. В. ЯКОВЛЕВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, E-mail: mail@crism.ru

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Поступила в редакцию 11.04.2019

После доработки 11.09.2019

Принята к публикации 23.09.2019

Разработано каталитически активное покрытие на основе системы алюминий – гидроксид алюминия (легирование: оксиды меди, церия, лантана, неодима, хрома и вольфрама) с высокими каталитической активностью, адгезионными свойствами и пористостью. Такое покрытие рекомендуется для использования в системах снижения токсичности отходящих газов при технологических процессах, сопровождающихся выбросом в атмосферу газа с вредными органическими веществами и оксидом углерода.

*Ключевые слова:* катализ, композиционное покрытие, микроплазменное напыление, металлический носитель.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмина Р. И., Севостьянов В. П.. Каталитическая очистка газовых выбросов от оксидов азота и углерода // Российский химический журнал. – Т. 1, № 1. – 2000. – С. 71–76.
2. Ivanov K., Dimitrov D., Boyanov B. Deactivation of Cu–Cr/ $\gamma$ -alumina catalysts for combustion of exhaust gases // International Journal of Chemical and Molecular Engineering. – 2011. – N 1(5). – P. 39–45 URL: <https://publications.waset.org/6456/pdf> (reference date 17/09/2019).
3. Li-Ping Ma, Hans-Jörg Bart, Ping Ning, Aimin Zhang, Guozheng Wua Zhu Zengzang. Kinetic study of three-way catalyst of automotive exhaust gas: Modeling and application // Chemical Engineering Journal. – 2009. – N 1–2(155). – P. 241–247.
4. Ribbens W. B. Understanding Automotive Electronics. 8th Edition, 2017. – 481 p.
5. Завьялова У. Ф. Поверхностный самораспространяющийся термосинтез катализаторов нейтрализации выхлопных газов // Автореф. дис.... канд. хим. наук. – М.: Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, 2005.
6. Завьялова У. Ф., Третьяков В. Ф., Бурдейная Т. Н., Цырульников П. Г. Блочные катализаторы нейтрализации выхлопных газов, синтезированные методом горения // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – № 13 – С. 751–755.
7. Kollu T. Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based automotive exhaust gas catalysts. The effect of BaO and OSC material on NO<sub>x</sub> reduction // Acta universitatis ouluensis. C Technica. – V. 238. – 2006. – P. 26–27.
8. Nihong An, Xiaoling Yuan, Bo Pan, Qinglin Li, Suying Li, Wenxiang Zhang. Design of a highly active Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst for low-temperature CO oxidation. // RSC Advances. – 2014. – N 4(72). – P. 38250–38257
9. Виноградова Т. С., Горелкин Д. Н., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. Исследование каталитически активных оксидных композиций на основе  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для повышения эффективности

процессов сгорания углеводородного топлива // Вопросы материаловедения. – 2000. – № 1 (21). – С. 50–56.

10. Улин И. В., Фармаковский Б. В. Разработка объемно-пористых нанокатализаторов системы «металл–оксид» для двухстадийной конверсии углеводородного сырья в водородное топливо // Материалы 2-й Всероссийской конференции по наноматериалам НАНО-2007, СПб, 2007. – С. 38–42.

УДК 621.793.7: 669.22

### **РАЗРАБОТКА СПЛАВА НА ОСНОВЕ СЕРЕБРА ДЛЯ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ**

Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук,  
Т. В. ПЕСКОВ, Б.В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49, E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 10.07.2019

После доработки 16.09.2019

Принята к публикации 18.09.2019

Приведены результаты разработки коррозионно-стойкого ультрадисперсного и наноструктурированного сплава на основе серебра. Изучена структура и свойства функциональных покрытий из этого сплава. Сплав рекомендуется для применения в силовой электронике и низковольтной коммутационной аппаратуре при рабочих температурах от минус 196 до 250°С.

*Ключевые слова:* наноструктурированный сплав на основе серебра, ультрадисперсный сплав, функциональное покрытие, коррозионная стойкость, холодное газодинамическое напыление.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Криохимическая нанотехнология: Учеб. пособие для вузов. – ИКЦ «Академкнига», 2006. – 325 с.

2. Кудинов В. В., Калита В. И., Полущенко О. Л. Нежелский Н. А. Получение высокотемпературных сверхпроводящих материалов и покрытий плазменным напылением и термообработкой // Труды 5-й Международной конференции «Пленки и покрытия-98» / Под ред. В.С. Клубникаина, СПб, 23–25 сентября 1998 г.

3. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017.

4. Грачев В. И., Марголин В.И., Жабрев В.А., Тупик В.А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск, Удмуртия: НПК «АВЕРС», 2014. – 479 с.

5. Kanghou Z., Huaizni Z., Juenua Z. An investigation of the Ag–Zr phase diagram // Less Common Met. – 1988. – V.138, N 2. – P.173–177.

6. Иванова В. С. Введение в микродисциплинарное наноматериаловедение. – М.: Сайнс-Пресс, 2005. – 132 с.

7. Половинкин В. Н., Современное состояние, перспективы и проблемы дальнейшего развития нанотехнологий в России и за рубежом // Оборонный заказ. – 2008. – № 19. – С. 2–12.

8. Фармаковский Б. В., Улин И. В. Функциональные материалы и покрытия – пути и надежды // По пути созидания. Т. 2. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. – С. 149–163.

УДК 621.74:621.315.3:621.763:539.21

### **ПОЛУЧЕНИЕ СВЕРХТОНКИХ ЛИТЫХ МИКРОПРОВОДОВ В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ**

Н. А. КРАВЦОВ, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

Поступила в редакцию 3.06.2019

После доработки 17.06.2019

Принята к публикации 25.06.2019

Исследована возможность получения метаматериалов на основе сверхтонких литых микропроводов в стеклянной изоляции. Разработан метод получения микропроводов диаметром менее 5 мкм. Показана возможность изготовления спиралей из микропроводов пропусканием тока большой плотности.

*Ключевые слова:* метаматериал, литой провод в стеклянной изоляции, ток большой плотности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Engheta, N., Ziolkowski, R.W., *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, John Wiley & Sons, IEEE Press, 2006. ISBN 978-0-471-76102-0.
2. Половинкин В. Н., Современное состояние, перспективы и проблемы дальнейшего развития нанотехнологий в России и за рубежом // Оборонный заказ. – 2008. – № 19. – С. 2–12.
3. Bushida K., Mohri K., Uchiyama T. Sensitive and quick response micro magnetic sensor using amorphous wire MI element Colpitts oscillator // IEEE Trans. Magn. – 1995. – V. 31, N 6. – P. 3134–3136.
4. Hika K., Panina L.V., Mohri K. Magneto-Impedance in Sandwich Film for Magnetic Sensor Heads // IEEE Trans. Magn. – 1996. – V. 32, N 5. – P. 4594–4596.
5. Abe Y., Miyazawa K., Nakamura M., Ohashi T. Behavior of metal jet in the in-rotating-water spinning method // ISIJ. – 1987. – V. 27, N 12. – P. 929–935.
6. Taylor G. F. A method of drawing metallic filaments and a discussion of their properties and uses // Phys. Rev. – 1924. – V. 23, N 5. – P. 655–660.
7. Пат. СССР № 128427. Способ непрерывного изготовления микроволокон в стеклянной изоляции / Авраменко Ф. И., Маянский И. М., Улитовский А. В. Заявлено 8.09.1950 // Бюл. изобретений. – 1960. – № 10.
8. Пат. СССР № 161325. Способ изготовления металлической микропровода / Улитовский А. В., Аверин Н. М. Заявл. 1.04.1948, опубл. 19.03.1964 // Бюл. № 7.
9. Масайло Д. В., Смелов А. И., Песков Т. В., Фармаковский Б. В. Разработка тензо- и терморезистивных сплавов для литых микропроводов // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 3(79). – с. 73–79.
10. Литой микропровод и его применение в науке и технике // Под ред Д. В. Гицу. – Кишинев: Штиинца, 1988. – 424 с.
11. Патент РФ 2396621. Способ получения наноструктурированных микропроводов / Фармаковский Б. В., Васильева О. В., Кузьмин К. А., Шавыкин М. А., Кузнецов П. А. Заявл. 17.11.2008, опубл. 10.08.2010 // Бюл. № 22.
12. Горынин И. В., Фармаковский Б. В. Длинномерные литые микропровода в стеклянной изоляции с жилой из интерметаллических соединений // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 3(79) – С. 58–61.
13. Матвеев В. П., Милявская В. Н. Электродинамические явления в электромагнитной системе индуктор – капля при производстве микропровода в стеклянной изоляции // Достижения в области разработки, производства и применения микропроводов в стеклянной изоляции. – М., ЦИНИ Электропром, 1982. – С. 40–54.

УДК 621.793.16:539.219.3:549.211

#### **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕЖФАЗНОЙ ЗОНЫ ПРИ ТЕРМОДИФФУЗИОННОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ АЛМАЗА ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

П. П. ШАРИН<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, М. П. АКИМОВА<sup>1</sup>, С. П. ЯКОВЛЕВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук,  
Л. А. НИКИФОРОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, В. И. ПОПОВ<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup> *Федеральный исследовательский центр «Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН», Республика Саха (Якутия), 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1. E-mail: administration@iptpn.yasn.ru*

<sup>2</sup> *ФГАОУ «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», Республика Саха (Якутия), 677000, Якутск, ул. Белинского, 58*

Поступила в редакцию 10.06.2019

После доработки 17.06.2019

Принята к публикации 18.06.2019

Исследованы особенности морфологии, химического и структурно-фазового составов межфазной зоны алмаз – металл, образованной в процессе термодиффузионной металлизации алмаза порошками хрома, титана, железа, никеля и кобальта при одинаковом температурно-временном режиме работы вакуумной печи, соответствующем режиму спекания с пропиткой медью алмазосо-державшей WC–Co-матрицы.

В процессе термодиффузионной металлизации хромом и титаном на поверхности алмаза формируется металлизированное покрытие, состоящее из смеси фаз карбидов, металлов и графита переменного состава. Незначительное содержание образований графита и их прерывистый характер расположения в межфазной зоне алмаз – металл обеспечивает прочное сцепление металлизированного покрытия с алмазом через карбиды соответствующих металлов.

При термодиффузионной металлизации железом на межфазной зоне алмаз – металл также образуется промежуточный слой, прочно сцепленный с алмазом. Промежуточный слой имеет сложный структурно-фазовый состав, включающий смесь из фаз железа, твердого раствора углерода в железе и графита переменного состава. Выдвинуто предположение, что промежуточный слой на поверхности зерен алмаза может быть сформирован при застывании жидкой фазы эвтектического состава, появляющейся в результате эвтектического плавления контактных пар алмаз – железо. Однако для подтверждения этого предположения требуется проведение специальных экспериментов с использованием высокочувствительных методов исследования.

В процессе взаимодействия никеля и кобальта с алмазом при заданных в эксперименте условиях нагрева происходит интенсивная каталитическая графитизация алмаза с образованием на его поверхности многочисленных следов эрозии. Наблюдаемое слабое адгезионное взаимодействие этих металлов с алмазом обусловлено, вероятно, высокими температурами плавления эвтектик Ni–C и Co–C, что не позволяет металлам активно реагировать с алмазом при заданных экспериментальных условиях.

*Ключевые слова:* алмаз, металлизация, межфазная зона, покрытие, графитизация, карбиды, эвтектическое плавление

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Якутлов М. М., Карамурзов Б. С., Беров З. Ж., Батыров У. Д., Нартыжев Р. М. Направленное формирование межфазной границы алмаз – матрица с использованием нанопокровов // Изв. Кабардино-Балкарского госуниверситета. – 2011. – № 4 (1). – С. 23–25.
2. Булгаков В. И., Лаптев А. И., Поздняков А. А. Улучшение закрепления алмазного зерна в связке при изготовлении камнеразрушающего инструмента горячим прессованием // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 69–72.
3. Artini C., Muolo M. L., Passerone A. Diamond – metal interfaces in cutting tools: a review // Journal of Materials Science. – 2012. – V. 47 (7). – P. 3252–3264.
4. Tillmann W., Ferreira M., Steffen A., Ruster K., Möller J., Bieder S., Paulus M., Tolan M. Carbon reactivity of binder metals in a diamond-metal composites – characterization by scanning electron microscopy and X-ray diffraction // Diamond & Related Materials. – 2013. – V. 38. – P. 118–123.
5. Шарин П. П., Яковлева С. П., Гоголев В. Е., Попов В. И. Строение и прочность переходной зоны при твердофазном высокотемпературном взаимодействии алмаза с карбидообразующими металлами – хромом и кобальтом // Перспективные материалы. – 2016. – № 7. – С. 47–60.
6. Коновалов В. А., Шатохин В. В. Взаимосвязь прочности закрепления зерен в связке со стойкостью алмазно-абразивного инструмента // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения: Сб. научн. тр. ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. – 2009. – № 12. – С. 508–513.

7. Патент РФ № 2607393. Способ получения композиционной алмазосодержащей матрицы с повышенным алмазоудержанием на основе твердосплавных порошковых смесей // Шарин П. П., Никитин Г. М., Лебедев М. П., Атласов В. П., Попов В. И. Опубл. 10.01.2017 // Бюл. № 1.
8. Патент РФ № 2633861. Способ металлизации алмаза при спекании с пропиткой медью алмазосодержащей твердосплавной матрицы / Шарин П. П., Лебедев М. П., Атласов В. П., Попов В. И., Акимова М. П., Ноговицын Р. Г., Николаев Д. В. Опубл. 18.10.2017 // Бюл. № 29.
9. Шарин П. П., Акимова М. П., Попов В. И. Взаимосвязь структуры межфазной зоны алмаз-матрица с работоспособностью инструмента, полученного технологией, совмещающей металлизацию алмазов со спеканием матрицы // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 2 (94). – С. 111–123.
10. Шарин П. П., Акимова М. П., Яковлева С. П., Попов В. И. Структура переходной зоны алмаз – матрица и стойкость инструмента, полученного при металлизации алмаза хромом в процессе спекания брикета WC–Co с пропиткой Cu // Известия вузов. ПМФП. – 2018. – № 3. – С. 64–75.
11. Ножкина А. В. Влияние металлов на фазовое превращение алмаза в графит // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 3. – С. 11–15.
12. Семенов А. П., Поздняков В. В., Крапошина Л. Б. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами и сплавами. – М.: Наука, 1974. – 109 с.
13. Еременко В. Н. Взаимодействие металлических расплавов с поверхностью алмаза и графита. – Киев: Наукова думка, 1967. – 86 с.
14. Локтюшин В. А., Гуревич Л. М. Получение нанотолщинных металлических покрытий на сверхтвердых материалах методом термодиффузионной металлизации // Изв. Волжского гос. техн. ун-та. – 2009. – № 3 (11). – С. 50–54.
15. Букалов С. С., Михалицын Л. А., Зубавичус Я. В., Лейтес Л. А., Новиков Ю. Н. Исследование строения графитов и некоторых других  $SP^2$  углеродных материалов методами микроспектроскопии КР и рентгеновской дифрактометрии // Российский химический журнал. – 2006. – Т. 1, № 1. – С. 83–91.
16. Егорова М. Н., Капитонов А. Н. Исследование графитовой фольги, полученной прессованием // Инновационная наука. – 2006. – № 6. – С. 62–65.
17. Tillmann W., Tolan M., Lopes-Dias N. F., Zimpel M., Ferreira M., Paulus M. Influence of chromium as carbide forming doping element on the diamond retention in diamond tools // Proceedings of the International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM). – 2015. – V. 3. – P. 21–30.
18. Margaritis D. -P. Interfacial bonding in metal-matrix composites reinforced with metal-coated diamonds: PhD thesis. University of Nottingham, 2003. – P. 345.
19. Wang Y. H., Zang J. B., Wang M. Z., Guan Y., Zheng Y. Z. Properties and application of Ti-coated diamond grits // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – V.129. – P.369–372.
20. Кушталова И. П., Стасюк Л. Ф., Ускокович Д. П., Радич С. М., Ристич М. М. Упрочнение металлической матрицы карбидом титана, полученного реакцией в системе алмаз–титан–никель // Bulletin De La Societe Chimique Voegrad. – 1984. – № 49 (9). – С. 555–561.
21. Стасюк Л. Ф., Кушталова И. П., Ускокович Д. П., Крстанович И., Радич С. М., Ристич М. М. Реакционное спекание в системе алмаз – карбид титана – хром под высоким давлением // Bulletin De La Societe Chimique Voegrad. – 1984. – № 49 (9). – С.563–569.
22. Molinari A., Marchetti F., Cialanella S., Scardi P., Tiziani A. Study of the diamond–matrix interface in hot-pressed cobalt-based tools // Materials Science and Engineering. – 1990. – V. A130. – P. 257–262.
23. Хансен М., Андерко К. Структура двойных сплавов. – М.: Металлургиздат, 1962. – 608 с.
24. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. Т. 2 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.

УДК 678.742.2:620.178.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО  
ПОЛИЭТИЛЕНА, НАПОЛНЕННОГО СЕРОЙ, ДИФЕНИЛГУАНИДИНОМ  
И 2-МЕРКАПТОБЕНЗТИАЗОЛОМ**

С. Н. ДАНИЛОВА<sup>1</sup>, А. А. ДЪЯКОНОВ<sup>1</sup>, А. П. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, Ю. С. ГЕРАСИМОВА<sup>1</sup>,  
А. А. ОХЛОПКОВА<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, С. А. СЛЕПЦОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова»,  
677000, Республика Саха (Якутия), Якутск, ул. Кулаковского, 48, E-mail: [dsn.sakhayana@mail.ru](mailto:dsn.sakhayana@mail.ru)

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт проблем нефти и газа» СО РАН, 677007, Республика Саха (Якутия),  
Якутск, ул. Автодорожная, 20

Поступила в редакцию 06.05.2019

После доработки 5.06.2019

Принята к публикации 18.06.2019

Приведены результаты исследований триботехнических свойств, твердости и плотности композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), наполненного серой, дифенилгуанидином (ДФГ) и 2-меркаптобензтиазолом (МБТ) и их смесями. Установлено, что введение в СВМПЭ выбранных наполнителей практически не влияет на твердость и плотность композитов, но приводит к существенному (в 2–3 раза) повышению износостойкости материалов. Методом электронной микроскопии установлено, что в композитах с содержанием МБТ формируются вторичные структуры, защищающие поверхностный слой материала от изнашивания. Методом ИК-спектроскопии установлено, что при изнашивании композитов протекают трибохимические реакции с образованием гидроксильных и карбонильных групп. Разработанные материалы СВМПЭ/МБТ и СВМПЭ/ДФГ/МБТ обладают высокой износостойкостью и могут быть использованы как материалы триботехнического назначения.

*Ключевые слова:* сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полимерный композиционный материал, наполнители, износостойкость, коэффициент трения, структура, трибохимические реакции, поверхность трения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kurdi A., Chang L. Recent Advances in High Performance Polymers. – Tribological Aspects // Lubricants. – 2019. – V. 7, N 1. – P. 2.
2. Галибеев С. С., Хайруллин Р. З., Архиреев В. П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы // Вестник Казанского технологического университета. – 2008. – № 2. – С. 50–55.
3. Бузник В. М., Каблов Е. Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // Вестник Российской академии наук. – 2017. – Т. 87, № 9. – С. 827–839.
4. Панин С. В., Корниенко Л. А., Ваннасри С., Иванова Л. Р., Шилько С. В. Сравнительный анализ влияния нано- и микронаполнителей окисленного Al на фрикционно-механические свойства СВМПЭ // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 5. – С. 492–499.
5. Okhlopko A. A., Nikiforov L. A., Okhlopko T. A., Borisova R. V. Polymer Nanocomposites exploited under the arctic conditions // KnE Materials Science. – 2016. – V. 1, N 1. – P. 122–128.
6. Chukov D. I., Stepashkin A. A., Maksimkin A. V., Tcherdyntsev V. V., Kaloshkin S. D., Kuskov K. V., Bugakov V. I. Investigation of structure, mechanical and tribological properties of short carbon fiber reinforced UHMWPE-matrix composites // Composites Part B: Engineering. – 2015. – V. 76. – P. 79–88.
7. Borisova R. V., Spiridonov A. M., Okhlopko T. A., Nikiforov L. A., Golikov A. N., Shadrinov N. V., Okhlopko A. A. Bromination of UHMWPE surface as a method of changing adhesion to nanoparticles // Materials Today Communications. – 2018. – V. 14. – P. 65–71.
8. Кахраманов Н. Т., Касумова Г. Ш., Осипчик В. С., Гаджиева Р. Ш. Износостойкие полимерные материалы. Структура и свойства // Пластические массы. – 2017. – № 11–12. – С. 8–15.
9. Wang H., Xu L., Zhang M.X., Li R., Xing Z., Hu J. T. More wear-resistant and ductile UHMWPE composite prepared by the addition of radiation crosslinked UHMWPE powder // Journal of Applied Polymer Science. – 2017. – V. 134, № 13. – DOI: 10.1002/app.44643.
10. Doshi B., Ward J. S., Oral E., Muratoglu O. K. Fatigue toughness of irradiated vitamin E / UHMWPE blends // Journal of Orthopaedic Research. – 2016. – V. 34, N 9. – P. 1514–1520.
11. Догадкин Б. А., Донцов А. А. Взаимодействие полиэтилена с серой в присутствии меркаптобензотиазола и тетраметилтиурамдисульфида // Высокомолекулярные соединения. – 1963. – № 1. – С. 1107–1117.

12. Тарасевич Б. Н. ИК спектры основных классов органических соединений. – М.: МГУ, 2012. – 54 с.

13. Gu Y., Fei X., Lan Y., Shi B., Zhang B., Jia G. Synthesis, crystal structure and spectral properties of thiazole orange derivative // Chalcogenide Letters. – 2010. – V. 7, N 5. – P. 299–306.

УДК 661.66:621.763–486

## ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ В ОБЛАСТИ СЫРЬЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН (Обзор)

М. И. ВАЛУЕВА, канд. техн. наук

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»  
(ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: admin@viam.ru

Поступила в редакцию 20.06.2019

После доработки 19.07.2019

Принята к публикации 19.07.2019

Настоящий обзор посвящен рассмотрению современного состояния мирового производства углеродных волокон на основе различных видов исходного сырья, а также исследованиям в области химии, направленным на расширение спектра решений в данной области. Проведен анализ литературных источников – отечественной и зарубежной научно-технической и периодической литературы, патентов на изобретения за последние 15 лет. Уделено внимание химической модификации прекурсоров, позволяющей расширить функциональные свойства получаемых углеродных материалов.

*Ключевые слова:* углеродные волокна, прекурсоры, производство.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

2. Каблов Е. Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. – 2015. – № 1. – С. 36–39.

3. Раскутин А. Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № S. – С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.

4. Валужева М. И., Гуляев И. Н. Углеродные волокна и углепластики: история, современность и перспективы развития. Обзор // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – № 11. – С. 2–8.

5. Лысенко А. А. Тенденции формирования мирового рынка углеродных волокон. Обзор // Технический текстиль. – 2005. – № 12. URL: <http://www.rustm.net/catalog/article/88.html> (дата обращения: 01.03.2019).

6. Лебедева А. И., Хлебников В. В. Рынок углеродных волокон: состояние и перспективы // Полимерные материалы. – 2011. – № 4. – С. 20–24.

7. Ким С. Сырье – композиты – углеволокно // The Chemical Journal. – 2014. – Октябрь. – С. 64–73. URL: [http://tcj.ru/wp-content/uploads/2014/11/2014\\_10\\_63-73\\_PLAST-Syre.pdf](http://tcj.ru/wp-content/uploads/2014/11/2014_10_63-73_PLAST-Syre.pdf) (reference date 18.09.2019).

8. Валужева М. И., Гуляев И. Н., Сидорина А. И. Рынок российских углеродных наполнителей сегодня. Обзор // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2016. – № 4. – С. 77–87.

9. Лысенко А. А., Асташкина О. В., Русова Н. В., Цыбук И. О. Рынок углеродных волокон к началу 2018 года // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2018. – № 1–1. – С. 37–39.

10. Айзенштейн Э. М. Отечественная промышленность химических волокон в 2017 году // Композитный мир. – 2018. – № 3. – С. 26–31.

11. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Панин С. В. Влагоперенос в углепластике с деструктурированной поверхностью // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 461, № 4. – С. 433–436.

12. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. – 2018. – № 2. – С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47–58.
13. Валуева М. И., Зеленина И. В., Хасков М. А., Гуляев А. И. Подготовка углеродного волокна к нанесению интерфазного покрытия для композиционных материалов с керамической матрицей // *Труды ВИАМ: электрон. научн.-техн. журнал*. – 2017. – № 10 (58). – С. 79–89. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-9-9.
14. Гуляев А. И., Шуртаков С. В. Количественный анализ микроструктуры граничного слоя «волокно-матрица» в углепластиках // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. – 2016. – № 7 (43). – С. 67–76. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-8-8.
15. Ерасов В. С. Визуализация процессов испытания и экспериментальных данных в 3D-пространстве // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № S4. – С. 22–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-22-28.
16. Кузнецов А. В., Генис А. В., Коваль Ю. С. Изменение структурно-механических свойств полиакрилонитрильного прекурсора в процессе его преобразования в углеродное волокно // *Вопросы оборонной техники. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении*. – 2014. – № 4 (175). – С. 18–22.
17. Перепелкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. – М.: НОТ, 2009. – 380 с.
18. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. – М.: НОТ, 2015. – 822 с.
19. Morgan P. Carbon fibers and their composites. – USA: CRC Press, 2005. – 1131 p.
20. Soo-Jin Park “Carbon Fibers”. Korea. – Springer, 2015. – 330 p.
21. Варшавский В. Я. Углеродные волокна. – М., 2005. – 496 с.
22. Мелешко А. И., Половников С. П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2007. – 192 с.
23. Абрамов О. Н., Сидоров Д. В., Алухтина Т. Л. Получение пекового углеродного волокна на основе нефтяного сырья // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 86–89.
24. Вишневецкий К. О., Карасев О. И. Прогнозирование развития новых материалов с использованием методов Форсайта // *Foresight-Russia*. – 2010. – Т. 4, № 2. – С. 58–67.
25. Composite materials handbook. V. 3. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis URL: <https://www.library.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2017/03/HDBK17-3F.pdf> (дата обращения: 01.03.2019).
26. Мухамедзянов А. Т., Мухамедзянова А. А., Гимаев Р. Н., Галиахметов Р. Н. Состояние и перспективы производства и потребления углеродных волокон из нефтяных пеков // *Вестник Башкирского университета*. – 2015. – Т. 20, № 4. – С. 1218–1222.
27. Михайлин Ю. А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. – СПб.: Изд-во «Научные основы и технологии». – 2013. – 752 с.
28. Пат. РФ 2679144, № 2018125906. Способ получения углеродной нити на основе вискозы для хирургического лечения глаукомы; заявл. 13.07.2018; опубл. 06.02.2019 // Бюл. № 4.
29. Горина В. А., Чеблакова Е. Г. Влияние режимов активации на удельную поверхность и развитие микропористой структуры углеродных волокон на основе вискозы // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2015. – № 4. – С. 34–39.
30. Пат. РФ 2206505, № 2002116909/12. Углеродный волокнистый материал на основе гидратцеллюлозы и ее привитых сополимеров; заявл. 24.06.2002; опубл. 20.06.2003.
31. Дробышев В. М., Ляшенко С. Е., Соболева И. В. Изучение зависимости свойств углеродных волокнистых адсорбентов в зависимости от условий их получения // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2013. – Т. XXVII, № 1. – С. 102–110.
32. Patent 1819852 EP, № 20050816104. Method of obtaining yarns or fiber sheets of carbon from a cellulose precursor; заявл. 06.12.2005; опубл. 22.08.2007.

33. Пат. РФ 2258773, № 2002115275/04. Способ получения углеродного волокнистого материала; заявл. 05.12.2000; опубл. 20.08.2005 // Бюл. № 23.
34. Пат. РФ 2429316, № 2010111418/05. Способ непрерывного получения из гидратцеллюлозы углеродного волокна в виде однонаправленного жгута; заявл. 26.03.2010; опубл. 20.09.2011 // Бюл. № 26.
35. Пат. РФ 2490378, № 2012111067/05. Способ получения углеродного волокнистого материала; заявл. 23.03.2012; опубл. 20.08.2013 // Бюл. № 23.
36. Пат. РФ 2577578, № 2014151947/05. Способ получения углеродного волокнистого материала; заявл. 23.12.2014; опубл. 20.03.2016 // Бюл. № 8.
37. Пат. РФ 2596752, № 2015109080/05. Способ получения углеродных волокнистых материалов; заявл. 16.03.2015; опубл. 10.09.2016 // Бюл. № 25.
38. Пат. РФ 2671709, № 2017140958. Способ получения углеродных волокнистых материалов из гидратцеллюлозных волокон; заявл. 24.11.2017; опубл. 06.11.2018 // Бюл. № 31.
39. Пат. РФ 2679265, № 2016146775. Способ отделки лиоцельного гидратцеллюлозного волокна при получении прекурсора углеродного волокнистого материала; заявл. 29.11.2016; опубл. 29.05.2018 // Бюл. № 16.
40. Пат. РФ 2642561, № 2016129584. Способ селекционной оценки гидратцеллюлозных волокон как прекурсора при получении углеродных волокон; заявл. 20.07.2016; опубл. 25.01.2018 // Бюл. № 3.
41. Patent US 10189985. N 2018/0207849. Polyacrylonitrile (PAN) polymers with low polydispersity index (PDI) and carbon fibers made therefrom; заявл. 26.07.2018; опубл. 29.01.2019.
42. Patent US 8906339, N 2011/0158895. High modulus graphitized carbon fiber and method for fabricating the same; заявл. 30.06.2011; опубл. 09.12.2014.
43. Patent US 9109305, N 2013/0136914. Preparation method for hollow carbon fiber; заявл. 30.05.2013; опубл. 18.08.2015.
44. Patent US 9476147, N 2015/0035196. Gel spinning process for producing a pan-based precursor fiber; заявл. 05.02.2015; опубл. 25.10.2016.
45. Пат. РФ 2535797, № 2013119304. Способ окислительной стабилизации волокон из полиакрилонитрила, наполненных углеродными наночастицами; заявл. 25.04.2013; опубл. 20.12.2014.
46. Пат. РФ 2534779, № 2013121957. Способ окислительной стабилизации волокон из полиакрилонитрила, наполненных углеродными нанотрубками; заявл. 13.05.2013; опубл. 10.12.2014.
47. Житенева Д. А., Лысенко А. А. Новое в технологии окислительной стабилизации полиакрилонитрильных волокон // Дизайн. Материалы. Технология. – 2015. – Т. 5, № 40. – С. 19–22.
48. Скворцов И. Ю., Беркович А. К., Макаров И. С. Углеродные волокна на основе полиакрилонитрила с добавками нановолокон оксида алюминия // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 116–120.
49. Patent US 9409337, N 2016/0016345. Polyacrylonitrile/cellulose nano-structure fibers; заявл. 21.01.2016; опубл. 09.08.2016.
50. Patent US 9121112, N 2015/0024200. Carbon fibers having improved strength and modulus and an associated method and apparatus for preparing same; заявл. 22.01.2015; опубл. 01.09.2015.
51. MaQuan-sheng, Gao Ai-jun, Tong Yuan. The densification mechanism of polyacrylonitrile carbon fibers during carbonization // New carbon materials. – 2016. – V. 31, N 5. – P. 550–554.
52. Li Xiao-Yun, Tian Feng, Gao Xue-Ping. WAXD/SAXS study and 2D fitting (SAXS) of the microstructural evolution of PAN-based carbon fibers during the pre-oxidation and carbonization process // New carbon materials. – 2017. – N 4. – С. 130–137.
53. Husona M. G., Churcha J. S. Heterogeneity of carbon fibre // Carbon. – 2014. – V. 68. – P. 240–249.
54. Тюменцев В. А., Фазлитдинова А. Г. Взаимосвязь режимов получения и тонкой структуры углерода волокна // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, вып. 3. – С. 62–69.

55. Lifeng Hao, Ping Peng, Fan Yang. Study of structure-mechanical heterogeneity of polyacrylonitrile-based carbon fiber monofilament by plasma etching-assisted radius profiling // *Carbon*. – 2017. – V. 114. – P. 317–323.
56. Колодяжный А. Ю., Шешин Е. П. Автоэлектронная эмиссия некоторых видов полиакрилонитрильных углеродных волокон // *Химия и химическая технология*. – 2015. – Т. 58, вып. 7. – С. 78–81.
57. Нистратов А. В., Алексеев С. А., Клушин В. Н. Оптимизация режима карбонизации акриловых текстильных отходов // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2015. – Т. 29, № 8. – С. 99–101.
58. Капустин В.М., Глаголева О. Ф. Физико-химические аспекты формирования нефтяного кокса (обзор) // *Нефтехимия*. – 2016. – Т. 56, № 1. – С. 3.
59. Насибулин А. В., Петров А. В., Бейлина Н. Ю. Влияние способа введения наноструктурирующей добавки на свойства каменноугольного пека // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2015. – Т. 29, № 7. – С. 62–64.
60. Островский В. С., Стариченко Н. С. Изменение свойств каменноугольных пеков добавками // *Кокс и химия*. – 2018. – № 1. – С. 22–31.
61. Кузнецов П. Н., Маракушина Е.Н., Бурюкин Ф.А. Получение альтернативных пеков из углей // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2016. – Т. 24, №3. – С. 325–333.
62. Островский В. С., Стариченко Н. С. Каменноугольные пеки как связующие для углеродных материалов // *Кокс и химия*. – 2016. – № 4. – С. 30–33.
63. Хохлова Г. П., Барнаков Ч. Н., Попова А. Н. Рентгеноструктурный анализ углеродных материалов, полученных карбонизацией каменноугольного пека с графитовыми добавками // *Кокс и химия*. – 2016. – № 1. – С. 32–39.
64. Guanming Yuan, Xuanke Li, Zhijun Dong. The structure and properties of ribbon-shaped carbon fibers with high orientation // *Carbon*. – 2014. – V. 68. – P. 426–439.
65. Разноушкин А. Е., Хайбуллин А. А., Жирнов Б. С. О возможности использования полимерно-пековых композиций в качестве сырья для получения углеродных волокон // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. – 2015. – № 4. – С. 27–33.
66. Jianxiao Yanga, Koji Nakabayashi. Preparation of pitch based carbon fibers using Hyper-coal as a raw material // *Carbon*. – 2016. – V. 106, Sept. – P. 28–36.
67. Li Xian, Zhu Xian-qing, Kenshiro Okuda. Preparation of carbon fibers from low-molecular-weight compounds obtained from low-rank coal and biomass by solvent extraction // *New carbon materials*. – 2017. – N 2. – P. 41–47.
68. Каблов В. Ф., Кейбал Н. А., Бондаренко С. Н. Получение углеродных волокон для полимерных материалов методом пиролиза модифицированных ПВС волокон // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2017. – № 4 (199). – С. 70–75.
69. Li Ang, Ma Zhao-Kun, Song Huai-He. Effect of heat treatment temperature on the microstructure and properties of polyimide-based carbon fibers // *New carbon materials*. – 2014. – V. 29, N 6. – P. 461–466.
70. Пат. РФ 2612716, № 2015120898. Способ получения углеродных волокон из нанотрубок; заявл. 02.06.2015; опублик. 13.03.2017.
71. Heng Wua, Shan-wu Fana, Xiao-wen Yuana. Fabrication of carbon fibers from jute fibers by pre-oxidation and carbonization // *Carbon*. – 2014. – V. 70. – P. 321.
72. Сазанов Ю. Н. Использование лигнина для производства углеродных волокон // *Евразийское научное образование*. – 2017. – Т. 1, № 1(23). – С. 94–99.
73. Patent WO 2012112/108, N PCT/SE2012/050141. Method for producing a lignin fiber; заявл. 13.02.2012; опублик. 23.08.2012.
74. Patent US 9133568, N 2014/0302315. Lignin/polyacrylonitrile-containing dopes, fibers, and methods of making same; заявл. 09.10.2014; опублик. 15.09.2015.
75. Ефремова С. В., Королев Ю. М., Сухарников Ю. И. Структурные преобразования углеродных материалов в процессе получения из растительного сырья // *Химия твердого топлива*. – 2016. – № 3. – С. 14–19.

76. Кузнецов Б. Н., Чесноков Н. В. Пористые углеродные материалы, полученные химической активацией древесины березы // Химия твердого топлива. – 2016. – № 1. – С. 25.
77. Микова Н. М., Иванов И. П., Чесноков Н. В. Свойства пористых углеродных материалов, полученных щелочной активацией термически модифицированной древесины осины // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Химия». – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 78–85.
78. Голова Л. К. Новое целлюлозное волокно лиоцелл // Рос. хим. ж. – 2002. – Т. XLVI, № 1. – С. 49–57.

УДК 678.742.2

## **СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ ПОЛИЭТИЛЕН КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ В АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ (Обзор)**

С. С. МАЛАХОВСКИЙ, М. И. ВАЛУЕВА, канд. техн. наук, Э. Ш. ИМАМЕТДИНОВ

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: admin@viam.ru*

Поступила в редакцию 21.06.2019

После доработки 16.07.2019

Принята к публикации 17.07.2019

Представлен обзор российской и зарубежной научно-технической литературы, посвященный сверхвысокомолекулярному полиэтилену (СВМПЭ) как компоненту полимерных композиционных материалов. Рассмотрены примеры практического применения СВМПЭ в качестве армирующего наполнителя и полимерной матрицы. Приведены физико-механические характеристики материалов на основе СВМПЭ, применяемых в различных областях промышленности; отмечена необходимость проведения предварительной обработки волокон СВМПЭ для получения композиционных материалов с высоким уровнем свойств.

*Ключевые слова:* сверхвысокомолекулярный полиэтилен, армирующий наполнитель, полимерная матрица, гель-формование, самоармированные композиционные материалы, плазменная обработка

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: Сб. информ. материалов. Изд. 3-е. – М.: ВИАМ, 2015. – 720 с.
2. Раскутин А. Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № S. – С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
3. Гришина О. И., Кочетов В. Н., Шавнев А. А., Серпова В. М. Аспекты применения высокопрочных и высокомодульных волокнистых металлических композиционных материалов авиационного назначения (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал. – 2014. – № 10. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 31.05.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-5-5.
4. Дориомедов М. С., Дасковский М. И., Скрипачев С. Ю., Шеин Е. А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 7. – С. 113–118. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.05.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12.
5. Тимошков П. Н., Хрульков А. В., Язвенко Л. Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2017. – № 6. – С. 61–68. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.05.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
6. Каблов Е. Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. – 2015. – № 1. – С. 36–39.
7. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 2. С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
8. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»

// Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1 (34) . – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

9. Селютин Г. Е., Гаврилов Ю. Ю., Воскресенская Е. Н. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – № 3. – С. 375–388.

10. Галибеев С. С., Хайруллин Р. З., Архиреев В. П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы // Вестник Казанского технологического университета. – 2008. – № 2. – С. 50–55.

11. Werff H., Heisserer U. High performance ballisticfibres: Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE). URL: <https://www.researchgate.net/publication/292147035> (дата обращения: 31.05.2019).

12. Deitzel J. M., McDaniel P., Gillespie Jr J. W. High performance polyethylene fibres // Structure and Properties of High-Performance Fibers. – Woodhead Publishing, 2017. – P. 167–185

13. Гоголева О. В., Шилько И. С. Исследование влияния углеродных волокон на свойства и структуру композитов на основе СВМПЭ // Тр. Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» ПОЛИКОМТРИБ-2017. – С. 206.

14. Chan Jin, Jiangtao Hu, Jianqiang Wang. An amidoximated-UHMWPE fiber for selective and high efficient removal of Uranyl and Thorium from acid aqueous solution // Advances in Chemical Engineering and Science. – 2017. – № 7. – P. 45–59.

15. Технические характеристики углеродного волокна UMT [Электронный ресурс] URL: <https://umatex.com/production/fiber/> (дата обращения: 30.05.2019).

16. Волокно Кевлар фирмы Дюпон [Электронный ресурс] URL: <http://www.twistcom.ru/stati/structura.html> (дата обращения: 31.05.2019).

17. Беляева Е. А., Косолапов А. Ф., Шацкий С. В. Гибридные композиты на основе волокнистых наполнителей из сверхвысокомолекулярного полиэтилена и стеклонанополнителей // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – № 10. – С.11–13.

18. Каталог продукции компании «Sinty Fiber» [Электронный ресурс] URL: <http://www.sintyfiber.com/pshow1634.html> (дата обращения: 31.05.2019).

19. Волкова А. В. Рынки крупнотоннажных полимеров // Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики. Центр развития. – 2017. – С. 57. URL: <https://dcenter.hse.ru/data/2018/02/04/1163443543> (дата обращения: 31.05.2019).

20. Рязанцева С. И., Илюшина С. В., Бугаева А. И. Сравнительная характеристика свойств модифицированного СВМПЭ // Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее. – 2018. – МЛ-31, Т. 4. – С. 202–204.

21. Панин С. В., Панин В. Е., Корниенко Л. А., Пувадин Т., Пирияон С., Шилько С. В. Модифицирование сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) нанонаполнителями для получения антифрикционных композитов // Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, вып. 7. – С. 102–106.

22. Marissen R. Design with Ultra Strong Polyethylene Fibers // Materials Science and Applications. – 2011. – V. 2. – P. 319–330.

23. Сергеева Е.А., Костина К.Д. Способы получения композитов и изделий на основе ткани из СВМПЭ и резины для производства топливных баков // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 5. – С. 101–105.

24. Khatiwada S., Armada Carlos A., Barrera Enrique V. Hypervelocity impact experiments on epoxy/ultra-high molecular weight polyethylene fiber composites reinforced with single-walled carbon nanotubes // Procedia Engineering. – 2013. – N 58. – С. 4–10.

25. Чурков Д.И., Жеребцов Д.Д., Нематуллоев С.Г. Исследование структуры и свойств самоармированных композиционных материалов на основе волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Технические науки. – 2017. – № 11. – С. 145–150.

26. Корнеева Н.В., Кудинов В.В., Крылов И.К. Новые материалы, армированные СВМПЭ-волокнами // Химическая физика вчера, сегодня, завтра. Материалы юбилейной научной конференции, посвященной 80-летию ИХФ РАН, 2011. – С. 68–69.

27. Валуева М. И., Железина Г. Ф., Гуляев И. Н. Полимерные композиционные материалы повышенной износостойкости на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2017. – № 6. – С. 23–29.
28. Беляева Е. А., Косолапов А. Ф., Осипчик В. С., Шацкая Т. Е., Кузнецов А. А., Кладовщикова О. И., Гильман А. Б., Галицын В. П. Композиционный ударопрочный материал конструкционного назначения на основе волокнистых наполнителей из сверхвысокомолекулярного полиэтилена отечественного производства // Пластические массы. – 2014. – № 9–10. – С. 41–44.
29. Lin S. P., Han J. L., Yeh J. T. et al. Composites of UHMWPE fiber reinforced PU/epoxy grafted interpenetrating polymer networks // European Polymer Journal. – 2007. – V. 43. – P. 996–1008.
30. Беляева Е. А., Косолапов А. Ф., Шацкий С. В. Высокотехнологичные процессы как инструмент создания конкурентоспособных композиционных материалов на основе волокнистых наполнителей из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) отечественного производства // Ползуновский Вестник. – 2016. – № 1. – С. 112–118.
31. Bouwmeester J. G. H., Marissen R., Bergsma O. K. Carbon/Dyneema® intralaminar hybrids: new strategy to increase impact resistance or decrease mass of carbon fiber composites // 26th International congress of the aeronautical sciences, 2008. – P. 1–6.
32. Nguyen L. H., Lässig T. R., Ryan S. Numerical Modelling of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Composite Under Impact Loading // Procedia Engineering. – 2015. – V. 103. – P. 436–443.
33. Attwood J. P., Fleck N. A., Wadley H. N. G. The compressive response of ultra-high molecular weight polyethylene fibres and composites // International Journal of Solids and Structures. – 2015. – V. 71. – P. 141–155.
34. Guangting Han, Xiaowei Tao, Xianbo Li. Study of the mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene fiber rope // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 2016. – V. 11. – P. 9–16.
35. Shishupal Singh, Yastuti Rao Gautam, Ajeet Pratap Singh, Mukesh Kumar Verma. Application of UHMWPE Fiber Based Composite Material // International Journal of Research in Advent Technology. 2018. – V. 6, N 7. – P. 1768–1771.
36. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) – материал для экстремальных условий эксплуатации. URL: [http://catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION\\_ID=1487](http://catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=1487) (дата обращения 31.05.2019).
37. Пат. РФ 2346006. Катализатор и способ получения сверхвысокомолекулярного полиэтилена с использованием этого катализатора; заявл. 08.11.2007; опубл. 10.02.2009 // Бюл. № 4.
38. Высокопрочные нити из СВМПЭ. URL: <http://www.rt-chemcomposite.ru/produksiya/1099/> (дата обращения 31.05.2019).
39. Полинит Текстиль. URL: <http://polinit-textile.ru/pdf/spravka.pdf> (дата обращения: 31.05.2019).
40. Волокна СВМПЭ и изделия из них. URL: <http://www.formoplast-spb.ru/volokna-svmp/> (дата обращения 31.05.2019).
41. Баронин Г. С., Бузник В. М., Худяков В. В. Полимерные композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного нанодобавками // Вестник Тамбовского университета. – 2016. – Т. 21, вып. 3. – С. 886–888.
42. Куприянова Е. В., Крайнов А. С. Основные направления в разработке тактических бронешлемов // Вопросы оборонной техники. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2018. – № 2 (189). – С. 69–72.
43. Lässig T., Nguyen L., May M., Riedel W., Heisserer U., Van der Werff H., Hiermaier S. A non-linear orthotropic hydrocode model for ultra-high molecular weight polyethylene in impact simulations // International Journal of Impact Engineering. – 2015. – V. 75. – P. 110–122.
44. Охлопкова А. А., Охлопкова Т. А., Борисова Р. В. Управление процессами структурообразования в полимерных композиционных материалах на основе СВМПЭ // Наука и образование. – 2015. – № 2. – С. 85–90.

УДК 669.14.018.295:539.422.22

## СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ И ЕГО СВЯЗЬ С ПАРАМЕТРАМИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ

С. А. ГОЛОСИЕНКО, канд. техн. наук, А. В. ИЛЬИН, д-р техн. наук, А. А. ЛАВРЕНТЬЕВ,  
М. С. МИХАЙЛОВ, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, С. Н. ПЕТРОВ, канд. хим. наук,  
К. Е. САДКИН, канд. техн. наук.

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49, E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 6.05.2019

После доработки 9.09.2019

Принята к публикации 16.09.2019

Проведены испытания на статическую трещиностойкость металла листового проката опытных плавок из высокопрочной мартенситно-бейнитной стали, показавшие существенные различия качества металла по этой характеристике при относительно небольших различиях в разных плавках по содержанию легирующих элементов и технологии производства. Выполнен сопоставительный металлографический анализ структурного состояния металла, отличающегося по трещиностойкости. По результатам анализа определены основные микроструктурные факторы, коррелирующие со статической трещиностойкостью исследованного материала.

*Ключевые слова:* среднелегированная сталь, листовая прокат, сопротивление хрупким разрушениям, параметры структурного состояния

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ужик Г. В. Сопротивление отрыву и прочность металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 255 с.
2. Ужик Г. В. Прочность и пластичность металлов при низких температурах. – М.: АН СССР, 1956. – 192 с.
3. Копельман Л. А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
4. Давиденков Н. Н. Динамическая прочность и хрупкость металлов. – Киев: Наукова думка, 1981. – 704 с.
5. Beremin F. M. A local criterion for cleavage fracture of nuclear pressure vessel steel // Metal Transaction. – 1983. – N 14A. – P. 2277–2287.
6. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Швецова В. А. Прогнозирование трещиностойкости реакторных сталей в вероятностной постановке на основе локального подхода // Проблемы прочности. – 1999: Сообщение 1 – № 1. – С. 5–20; Сообщение 2 – № 2. – С. 5–22.
7. Margolin B.Z., Fomenko V.N., Gulenko A.G., Kostylev V.I., Shvetsova V.A. Further improvement of the Prometey model and Unified Curve method, Part 1. Improvement of the Prometey model // Engineering Fracture Mechanics. – 2017. – May. – V. 182. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.05.015.
8. Shin S. Y., Hwang B., Kim S., Lee S. Fracture toughness analysis in transition temperature region of API X70 pipeline steels // Materials Science and Engineering. – 2006. – V. A 429. – С. 196–204.
9. Hwang B., Lee C. G., Kim S. Low-Temperature Toughening Mechanism in Thermomechanically Processed High-Strength Low-Alloy Steels // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2011. – V. 42A, March. – P. 717–728.
10. Morris J. W., Jr. On the Ductile-Brittle Transition in Lath Martensitic Steel // ISIJ International. – 2011. – V. 51, N 10. – P. 1569–1575.
11. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник. Том II / Под ред. М. Л. Бернштейна и А. Г. Рахштадта. – М.: Металлургия, 1983. – 368 с.
12. BS 7448-1-1991. Fracture Mechanics Toughness Tests. Part 1: Method for Determination of  $K_{Ic}$ , Critical CTOD and Critical J Values of Metallic Materials.
13. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
14. Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении / Под ред. А. Шварца, М. Кумара, Б. Адамса, Д. Филда. – М.: Техносфера, 2014. – С. 376–393.

15. Петров С. Н., Пташник А. В. Экспресс-метод определения границ бывшего аустенитного зерна в сталях бейнитно-мартенситного класса по локальным ориентировкам превращенной структуры // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2019. – № 5. – С. 5–12.

16. Рыбин В. В., Рубцов А. С., Нестерова Е. В. Метод одиночных рефлексов (ОР) и его применение для электронно-микроскопического анализа дисперсных фаз // *Заводская лаборатория*. – 1982. – № 5. – С. 21–26.

17. Копельман Л. А. Основы теории прочности сварных конструкций: Учебное пособие. 2-е изд. – СПб.: «Лань», 2010. – 464 с.

УДК 621.039.534.25:669.14.018.8:620.193

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ В ЭЛЕМЕНТАХ ТРУБНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ АЭС**

А. С. МИТРОФАНОВ, канд. тех. наук, Е. А. КРАЙНЮК, С. В. ГОЖЕНКО, канд. тех. наук,  
В. Н. ВОЕВОДИН, чл.-корр. НАНУ, д-р физ.-мат. наук, Р. Л. ВАСИЛЕНКО

*Национальный научный центр «Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий», «Харьковский физико-технический институт», ул. Академическая, 1, 61108, Харьков, Украина. E-mail: mitrofanov\_as@ukr.net*

Поступила в редакцию 3.07.2019

После доработки 16.09.2019

Принята к публикации 23.09.2019

Рассмотрены примеры повреждений трубных конструкций в системе охлаждения ВВЭР-1000, инициаторами которых являются неметаллические включения. Показана природа повреждений в сталях разного класса, выявлены пути повышения надежности металлоконструкций.

*Ключевые слова:* неметаллические включения, коррозия, теплообменный трубопровод, парогенератор.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ожигов Л. С., Митрофанов А. С., Рыбальченко Н. Д., Крайнюк Е. А., Василенко Р. Л., Шрамченко С. В. Влияние неметаллических включений в низколегированной углеродистой стали на ресурс трубопроводов АЭС // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2017. – № 4 (110). – С. 59–64.

2. Внутренние несплошности в швах сварных соединений приварки коллекторов к патрубкам корпусов парогенераторов на энергоблоках ВВЭР-1000 / В. Н. Воеводин, Л. С. Ожигов, А. С. Митрофанов, Г. Д. Толстолуцкая и др. // *Тяжелое машиностроение*. – 2014. – № 11–12. – С. 8–13.

3. Анализ данных контроля теплообменных труб парогенераторов ПГВ-1000 на ЮУ АЭС / В. Н. Воеводин, А. С. Митрофанов, С. В. Гоженко, Е. А. Крайнюк и др. // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2018. – № 5(117). – С. 82–86.

4. Ozhigov L. S., Mitrofanov A. S., Rybal'chenko N. D., Shramchenko S. V. Corrosion Defects in Pipelines of Nuclear Power Plants and the Problems of Their Inspection // *Materials Science*. – 2018. – May, V. 53, Is. 6. – P. 777–782.

5. Беляков В. А., Смирнов С. В. Анализ и оценка данных ВТК теплообменных труб парогенераторов Кольской АЭС // *Сб. трудов семинара «7-й Международный семинар по горизонтальным парогенераторам», 3–5 октября 2006, ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС»*.

6. Писаревский Л. А., Коростелев А. Б., Липатов, А. А., Филиппов Г. А., Кин Т. Ю. Локальная коррозия аустенитных сталей и сплавов для теплообменных труб парогенераторов АЭС // *Черная металлургия*. – 2019. – № 2. – С. 227–242.

7. Проблемы теплообменных труб для АЭС. Задачи и пути решения по повышению эксплуатационных свойств теплообменных труб / А. В. Серебряков, В. В. Мальцев, Н. М. Оборотова, С. А. Ладыгин и др. // *Сб. трудов 6-й Международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении»*. Екатеринбург, 2012. – С. 588–593.

8. Нитриды титана в трубной стали / А. Г. Глебов, А. Г. Свяжин, А. Б. Арабей, В. Е. Баженов и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2012. – № 7. – 2012. – С. 3–11.

9. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. 2-е изд. – М.: Альянс, 2006. – 472 с.

10. Пути управления коррозионной составляющей механизма повреждения стали 10ГН2МФА в зоне сварного соединения № 111 парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000 / Р. Ю. Жуков, С. И. Брыков, С. А. Харченко, А. С. Зубченко и др. // Тяжелое машиностроение. – 2015. – № 3–4. – С. 10–18.

11. Поваров В. П., Бакиров М. Б. Анализ причин повреждения узла приварки горячего коллектора теплоносителя первого контура к патрубку Ду 1200 парогенератора 5-го блока Нововоронежской АЭС // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119, № 3. – С. – 126–134.

УДК 621.039.531

## **ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Э110 ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР И НАПРЯЖЕНИЙ**

Б. А. ГУРОВИЧ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. С. ФРОЛОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Е. А. КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, Д. А. МАЛЬЦЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Д. В. САФОНОВ<sup>1</sup>,  
В. Н. КОЧКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А. А. РЕШЕТНИКОВ<sup>1</sup>

Поступила в редакцию 7.08.2019

После доработки 6.09.2019

Принята к публикации 11.09.2019

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, E-mail: frolov\_as@nrcki.ru*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», 115409, Москва, Каширское шоссе, 31*

Приведены результаты микроструктурных исследований фрагментов оболочек тепловыделяющих элементов из сплава Э110 на основе губчатого и электролитического циркония после эксплуатации в составе тепловыделяющих сборок ВВЭР-1000 с последующими испытаниями на ползучесть с приложением аксиальных нагрузок. Показано, что в процессе испытаний на ползучесть в исследованных образцах не происходит изменений химического состава, среднего размера и объемной плотности вторых фаз, в том числе радиационно-индуцированных. Установлено, что при испытаниях на ползучесть происходит отжиг дислокационных петель – увеличение их среднего размера с одновременным снижением объемной плотности. Показано, что образцы оболочек тепловыделяющих элементов из сплава на основе электролитического циркония в целом демонстрируют большую стойкость к ползучести по сравнению с образцами из сплава на основе губчатого циркония, что, по-видимому, связано с большей плотностью глобулярных выделений β-Nb в состоянии после облучения образцов на основе электролитического циркония.

*Ключевые слова:* ВВЭК-1000, оболочки тепловыделяющих элементов, структурно-фазовое состояние, стойкость к ползучести

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Desgranges L., Ferroud-Plattet M.P., Alloncle R., Aubrun I., Untrau J.M., Lhuillery P. Behavior of a defective nuclear fuel rod in dry storage conditions studied with a new experimental setup // Nucl. Technol. 2008. – V. 163, N 2. – P. 252–260.

2. Romanato L.S. Advantages of Dry Hardened Cask Storage Over Wet Storage for Spent Nuclear Fuel // Int. Nucl. Atl. Conf. INA 2011 Belo Horizonte, MG, Brazil, Oct. 24–28, 2011, Assoc. Bras. Energ. Nucl. ABEN, 2011.

3. Won J. J., Kim M. S., Kim K. T. Heat-up and cool-down temperature-dependent hydride reorientation behaviors in zirconium alloy cladding tubes // Nucl. Eng. Technol. Korean Nuclear Society. – 2014. – V. 46, N 5. – P. 681–688.

4. Yang W. J. S., Tucker R.P., Cheng B., Adamson R.B. Precipitates in zircaloy: Identification and the effects of irradiation and thermal treatment // J. Nucl. Mater. – 1986. – V. 138, N 2–3. – P. 185–195.

5. Griffiths M., Gilbert R.W., Carpenter G.J.C. Phase instability, decomposition and redistribution of intermetallic precipitates in Zircaloy-2 and -4 during neutron irradiation // J. Nucl. Mater. – 1987. – V. 150, N 1. – P. 53–66.

6. Ribis J., Doriot S., Onimus F. Shape, orientation relationships and interface structure of beta-Nb nano-particles in neutron irradiated zirconium alloy // J. Nucl. Mater. – 2018. – V. 511. – P. 18–29.

7. Doriot S., Gilbon D., Bechade J.-L., Mathon M.-H., Legras L., Mardon J.-P. Microstructural Stability of M5<sup>TM</sup> Alloy Irradiated up to High Neutron Fluences // *J. ASTM Int.* – 2005. – V. 2, N 7. – P. 12332.
8. Гурович Б. А., Фролов А. С., Кулешова Е. А., Мальцев Д. А., Сафонов Д. В., Кочкин В. Н., Алексеева Е. В., Степанов Н. В. Дegradaция материалов оболочек твэлов на основе циркония в условиях эксплуатации реакторов типа ВВЭР // *Вопросы материаловедения.* – 2018. – № 3(95). – P. 191–205.
9. Novikov V. V., Markelov V. A., Tselishchev A. V., Konkov V. F., Sinelnikov L. P., Panchenko V. L. Structure-phase changes and corrosion behavior of e110 and e635 claddings of fuels in water cooled reactors // *J. Nucl. Sci. Technol.* – 2006. – V. 43, N 9. – P. 991–997.
10. Novikov V., Markelov V., Gusev A., Malgin A., Kabanov A., Pimenov Y. Some Results on the Properties Investigations of Zirconium Alloys for WWER-1000 Fuel Cladding // *Int. Conf. WWER Fuel Performance, Model. Exp. Support.*, 17–24 Sep. 2011, Helena Resort (Bulgaria). – P. 459–467.
11. Markelov V. A. On correlation of composition, structural-phase state, and properties of E635 zirconium alloy // *Inorg. Mater. Appl. Res.* – 2010. – V. 1, N 3. – P. 245–253.
12. Gurovich B. A., Frolov A. S., Kuleshova E. A., Maltsev D. A., Safonov D. V., Alekseeva E. V. TEM-studies of the dislocation loops and niobium-based precipitates in E110 alloy after operation in VVER-type reactor conditions // *Mater. Charact.* – 2019. – V. 150. – P. 22–30.
13. Novikov V. V., Shishov V. N., Shevyakov A. Y., Voevodin V. N., Borodin O. V., Bryk V. V., Vasilenko R. L. Investigation of the microstructure of zirconium alloys irradiated by zirconium ions in an accelerator // *At. Energy.* – 2014. – V. 115, N 5. – P. 307–312.
14. Shishov V. N., Barberis P., Dean S. W. The Evolution of Microstructure and Deformation Stability in Zr–Nb–(Sn,Fe) Alloys Under Neutron Irradiation // *J. ASTM Int.* – 2010. – V. 7, N 7. – P. 103005.
15. Shishov V., Peregud M., Nikulina A., Pimenov Y., Kobylansky G., Novoselov A., Ostrovsky Z., Obukhov A. Influence of Structure Phase State of Nb Containing Zr Alloys on Irradiation-Induced Growth // *J. ASTM Int.* – 2005. – V. 2, N 8. – P. 12431.
16. Király M., Antók D.M., Horváth L., Hózer Z. Evaluation of axial and tangential ultimate tensile strength of zirconium cladding tubes // *Nucl. Eng. Technol.* – 2018. – V. 50, N 3. – P. 425–431.
17. Fedotov P. V., Loshmanov L. P., Kostyukhina A. V. Recovery of the mechanical properties of an irradiated E110 alloy // *Russ. Metall.* – 2014. – V. 2014, N 9. – P. 762–767.
18. Malgin A. G., Markelov V. A., Novikov V. V., Shelepov I. A., Donnikov V. E., Latunin V. I., Linhart S., Belac J., Vrtilkova V., Krejci J. Research of high-temperature oxidation behavior of E110 opt and E110M sponge based zirconium alloys // *Top Fuel. A0239.* – 2018. – V. 110. – P. 1–10.
19. Walters L., Douglas S. R., Griffiths M. Equivalent Radiation Damage in Zirconium Irradiated in Various Reactors // *Zircon. Nucl. Ind. 18th Int. Symp.* / ed. Comstock R.J., Motta A.T. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2018. P. 676–690.
20. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. – М.: Техносфера, 2006. – 256 с.
21. Malis T., Cheng S.C., Egerton R.F. EELS log-ratio technique for specimen-thickness measurement in the TEM // *J. Electron Microsc. Tech.* – 1988. – V. 8, N 2. – P. 193–200.
22. Yang Y. Y., Egerton R. F. Tests of two alternative methods for measuring specimen thickness in a transmission electron microscope // *Micron.* – 1995. – V. 26, N 1. – P. 1–5.
23. Zhang H.-R., Egerton R. F., Malac M. Local thickness measurement through scattering contrast and electron energy-loss spectroscopy. // *Micron. Elsevier Ltd.* – 2012. – V. 43, N 1. – P. 8–15.
24. Egerton R. F., Cheng S. C. Measurement of local thickness by electron energy-loss spectroscopy // *Ultramicroscopy.* – 1987. – V. 21, N 3. – P. 231–244.
25. Iakoubovskii K., Mitsuishi K., Nakayama Y., Furuya K. Thickness measurements with electron energy loss spectroscopy. // *Microsc. Res. Tech.* – 2008. – V. 71, N 8. – P. 626–631.
26. Williams D. B., Carter C. B. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials.* 2nd ed. – Springer, 2009. – 832 p.
27. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 271. с.

28. Bell D. C., Garratt-Reed A. J. Energy Dispersive X-ray Analysis in the Electron Microscope. – Oxford: Taylor & Francis, 2003. – 160 p.
29. Williams D. B., Carter C. B. Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science. New York: Springer. 2009. 760 p. // Mater. Sci. Springer. – 2009. – V. 1–4. – P. 760.
30. Transmission Electron Energy Loss Spectrometry in Materials Science and the EELS Atlas / C.C. Ahn (Ed.). – Wiley-VCH Verlag, 2006. – 472 p.
31. Kurata H., Isoda S., Kobayashi T. Chemical Mapping by Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy // J. Electron Microsc. (Tokyo) . – 1996. – V. 45, N 4. – P. 317–320.
32. Frolov A. S., Krikun E. V., Prikhodko K. E., Kuleshova E. A. Development of the DIFFRACALC program for analyzing the phase composition of alloys // Crystallogr. Reports. – 2017. – V. 62, N 5.
33. Kuleshova E. A., Frolov A. S., Maltsev D. A., Safonov D. V., Krikun E. V., Fedotova S. V. Structure and Phase Composition of Zirconium Fuel Claddings in Initial State and after Creep Tests // KnE Mater. Sci. 15th Int. Sch. “New Mater. – Mater. Innov. energy”, 2017.
34. Yang H. L., Matsukawa Y., Kano S., Duan Z. G., Murakami K., Abe H. Investigation on microstructural evolution and hardening mechanism in dilute Zr–Nb binary alloys // J. Nucl. Mater.– 2016. – V. 481. – P. 117–124.
35. Светухин В. В., Львов П. Е., Новоселов А. Е., Кобылянский Г. П., Шишов В. Н. Моделирование процесса роста ниобиевых преципитатов в сплаве Zr–1%Nb при облучении // Физико-математические науки. Физика. – 2007. – № 4. – С. 105–111.
36. Hayashi H., Ogata K., Baba T., Kamimura K. Research Program to Elucidate Outside-in Failure of High Burnup Fuel Cladding // J. Nucl. Sci. Technol. – 2006. – V. 43, N 9. – P. 1128–1135.
37. Raynaud P., Bielen A. Cladding hydrogen based regulations in the United States // 2011 Water React. Fuel Perform. Meet., 2011.
38. Rudling P., Patterson C., Nikulina A., Cox B. Performance evaluation of new advanced Zr alloys for BWRs and PWRs / VVERs I. Advanced Nuclear Technology International. V 2, 2017. – 22 p.
39. Lambrecht M., Meslin E., Malerba L., et al. On the correlation between irradiation-induced microstructural features and the hardening of reactor pressure vessel steels // J. Nucl. Mater. – 2010. – V. 406, N 1. – P. 84–89.