

СОДЕРЖАНИЕ

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

*Кочубей А.Я., Журавлёва П.Л.* Закономерности локализации пластического течения при горячей осадке литых заготовок магниевого сплава, содержащего алюминий и цинк..... 5

*Прияткин Д.В., Артемьев А.А., Лысак В.И.* Исследование наплавленного металла системы Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C для работы в условиях высокотемпературного газообразного изнашивания ..... 17

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Жаров М.В.* Анализ технологических процессов производства сферических порошков и гранул моноалюминиды никеля NiAl для нужд отечественного двигателестроения..... 29

*Меметова А.Е., Зеленин А.Д., Меметов И.Р., Пасько Т.В., Герасимова А.В., Таров Д.В.* Синтез нанопористых функциональных материалов для отраслей химической промышленности ..... 41

*Сорокин О.Ю., Беляченко И.О., Чайникова А.С., Житнюк С.В., Медведев П.Н.* Структура и фазовый состав реакционно-спеченного карбида кремния, содержащего искусственный графит .. 49

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Аммосова А.П., Ушканов А.А., Слепцова С.А., Охлопкова А.А., Лазарева Н.Н.* Исследование влияния природного шунгита на структуру и свойства политетрафторэтилена ..... 59

*Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Колобков А.С., Шульдешова П.М.* Арамидные органопластики с повышенной стойкостью к воздействию климатических факторов ..... 67

**КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ**

*Сироджидинов М.Э., Ганиев И.Н., Шарипов Дж.Х., Обидов З.Р.* Исследование анодного поведения сплава Zn55Al с галлием в кислых, нейтральных и щелочных средах ..... 79

*Вагапов Р.К.* Анализ влияния агрессивных факторов и условий на состав коррозионных продуктов..... 85

*Полухин Д.С., Гойхенберг Ю.Н., Бодров Е.Г.* Коррозионная стойкость композитного никель-фосфорного покрытия в различных агрессивных средах ..... 98

**РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

*Фролов А.С., Кулешова Е.А., Гурович Б.А., Никитина А.А., Мальцев Д.А., Федотова С.В., Сафонов Д.В.* Стабильность оксидов системы Y–Ti–O в реакторных материалах в условиях нейтронного облучения при повышенных температурах ..... 109

*Кудрявцев А.С., Суворов С.А., Артемьева Д.А., Рамазанов Р.М.* Коррозионная стойкость 12%-ной хромистой стали в условиях эксплуатации парогенератора реакторной установки с натриевым теплоносителем ..... 131

*Карпюк А.А., Савченко А.М., Коновалов Ю.В., Кулаков Ю.В., Маранцак С.В., Ершов С.А., Майников Е.В., Козлов Е.В., Ижуртов А.Л., Шишкин В.Ю., Шельдяков А.А., Яковлев В.В.* Особенности поведения дисперсионного топлива МЕТМЕТ под облучением..... 148

**ХРОНИКА**

*Орыщенко А.С., Фомина О.В., Цуканов В.В., Савичев С.А.* Становление и развитие броненосного флота в России. Отечественные линкоры XX века..... 156

XIX Конференция молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» «Новые материалы и технологии» (КМУС–2022)..... 169

**Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов** ..... 174

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ОСАДКЕ  
ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК МАГНИЕВОГО СПЛАВА, СОДЕРЖАЩЕГО АЛЮМИНИЙ И ЦИНК**

А. Я. КОЧУБЕЙ, канд. техн. наук, П. Л. ЖУРАВЛЕВА

*НИЦ «Курчатовский институт» — Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17. E-mail: zhuravlevapl@gmail.com*

Поступила в редакцию 16.06.2022

После доработки 5.07.2022

Принята к публикации 6.07.2022

Проведены эксперименты по горячей осесимметричной осадке заготовок сплава системы Mg–Al–Zn в интервалах скоростей деформации  $(10, 3, 5) \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$  и температур 250–450°C. Полученные структуры изучали методом оптической металлографии. Исследованы закономерности макроскопической локализации пластического течения цилиндрических заготовок в зависимости от температуры и скорости деформации, а также от исходного размера зерна (400 и 1400 мкм). Построены диаграммы локализации пластического течения при осадке слитков магниевого сплава для двух исходных размеров зерен, которые могут быть применены при разработке параметров технологии горячей обработки давлением. Показано, что с увеличением размера зерна в слитке склонность к локализации деформации возрастает.

*Ключевые слова:* локализация деформации, горячая пластическая деформация, осесимметричная свободная осадка, размер зерна, двойникование, динамическая рекристаллизация, диаграммы

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-111-3-5-16

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М., Летников М. Н., Мазалов И. С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 5. – С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
2. Антипов В. В., Сенаторова О. Г., Ткаченко Е. А., Вахромов Р. О. Алюминиевые деформируемые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 167–182.
3. Мазалов И. С., Филонова Е. В., Ломберг Б. С. Формирование структуры при деформации и термической обработке заготовок деталей из никелевого высокопрочного свариваемого сплава ВЖ172 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2013. – №12. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.03.2022)
4. Кочубей А. Я., Медведев П. Н. Применение прямых полюсных фигур в исследованиях процессов структурообразования при нагревах деформированных металлов и сплавов // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. – № 5 (23). Ст. 12. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения 01.03.2022)
5. Бубнов М. В., Скляренко В. Г. Формирование регламентированной структуры при деформации гранулированного сплава ЭП741НП // *Технология легких сплавов*. – 2007. – № 2. – С. 54–55.
6. Филонова Е. В., Бакрадзе М. М., Кочубей А. Я., Вавилин Н. Л. Исследование изменений структурно-фазового состояния сплава ВЖ175 в процессе горячей деформации и термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № 3. С. 10–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-10-13.
7. Ion S. E., Humphreys F. J., White S. H. Dynamic recrystallisation and the development of microstructure during the high temperature deformation of magnesium // *Acta Metall.* – 1982. – V. 30, N 10. – P. 1909–1919. DOI: 10.1016/0001-6160(82)90031-1

8. Al-Samman T., Gottstein G. Dynamic recrystallization during high temperature deformation of magnesium // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – V. 490, N 1–2. – P. 411–420. DOI: 10.1016/j.msea.2008.02.004
9. Shao Y., Tang T., Tang W., Li D. Modeling of extrusion texture of AZ31 magnesium alloy with consideration of dynamic recrystallization modeling // *Procedia Engineering*. – 2014. – V. 81. – P. 592–597. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.045
10. Influence of alloying elements and extrusion process parameter on the recrystallization process of Mg–Zn alloys / E. Meza-García, J. Bohlenb, S. Yib, et al. // *Materials Today: Proceedings 2S*. – 2015. – P. S19–S25. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.05.004
11. Волкова Е. Ф., Акинина М. В., Мостяев И. В. Пути повышения основных механических характеристик магниевых деформируемых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2017. – № 10. Ст.02 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-2-2.
12. Блохин Н. Н., Овечкин Б. И. Структура и диаграммы структурных состояний деформируемых магниевых сплавов // *Цветные металлы*. – 1992. – № 11. – С. 56–59.
13. Разуваев Е. И., Лебедев Д. Ю., Бубнов М. В. Формирование ультрамелкозернистой и наноразмерной структуры в металлах и сплавах методами деформации // *Авиационные материалы и технологии*. – 2010. – № 3. – С. 3–8.
14. McQueen H. J., Ryan N. D. Constitutive analysis in hot working // *Materials Science and Engineering A322*. – 2002. – V. 43–63. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01117-0.
15. McQueen H. J., Leo P., Cerri E. Constitutive Equations for Mg Alloy Hot Work Modeling // *Materials Science Forum*. – 2009. – V. 604–605. – P. 53–65. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.604-605.53

УДК 621.791.927.5:620.178.165

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА СИСТЕМЫ Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОАБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Д. В. ПРИЯТКИН, А. А. АРТЕМЬЕВ, канд. техн. наук, В. И. ЛЫСАК, акад. РАН

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 400005, Волгоград,  
пр. Ленина, 28. E-mail: [nanomaterial-vstu@yandex.ru](mailto:nanomaterial-vstu@yandex.ru)

Поступила в редакцию 11.07.2022

После доработки 13.07.2022

Принята к публикации 15.07.2022

Разработаны составы порошковых проволок для электродуговой наплавки сплавов системы Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C, стойких в условиях высокотемпературного газоабразивного изнашивания. Выполнены исследования наплавленных сплавов методом оптической и электронной микроскопии, микрорентгеноспектральным и рентгеноструктурным анализом. Выявлено влияние содержания углерода в сплаве на его структурно-фазовый состав, твердость и износостойкость при нормальной и повышенной до 600°C температуре. Установлено, что увеличение в сплаве содержания углерода с 1,2 до 2,8 мас. % приводит к увеличению в 6 раз объемной доли карбидов (Cr,Fe)<sub>x</sub>C<sub>y</sub>, участвующих в формировании эвтектической аустенитно-карбидной матрицы сплава. Также изменяется их морфология с (Fe,Cr)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> на (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. При этом содержание в сплаве карбидов (Ti,Nb,Mo)<sub>x</sub>C<sub>y</sub> и Mo<sub>x</sub>C изменяется незначительно, а их средний размер возрастает на 10%. Установлено, что формирование композиционной структуры в сплаве способствует обеспечению его высокой стойкости к газоабразивному изнашиванию при температуре 600°C. Износостойкость разработанного сплава сопоставима с зарубежным промышленным аналогом при кратно меньшей стоимости.

**Ключевые слова:** электродуговая наплавка, наплавочные сплавы, износостойкость, высокотемпературное газоабразивное изнашивание, упрочняющие фазы, абразивные частицы, склерометрия

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-111-3-17-28

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Vasudev H., Thakur L., Singh H., Bansal A. Effect of addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the high-temperature solid particle erosion behaviour of HVOF sprayed Inconel-718 coatings // *Materials Today Communications*. – 2022. – V. 30. – N 103017. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.103017>
2. Wu W., Wei B., Li G., Chen L., Wang J., Ma, J. Study on ammonia gas high temperature corrosion coupled erosion wear characteristics of circulating fluidized bed boiler // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – V. 132. – N 105896. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105896>
3. Jindal C., Sidhu B. S., Kumar P., Sidhu H. S. Performance of hardfaced / heat treated materials under solid particle erosion: A systematic literature review // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – V. 50, Part 5. – P. 629–639. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.441>
4. Hidalgo V. H., Varela F. J. B., Rico E. F. Erosion wear and mechanical properties of plasma-sprayed nickel-and iron-based coatings subjected to service conditions in boilers // *Tribology international*. – 1997. – V. 30, Is. 9. – P. 641–649. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(97\)00029-7](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(97)00029-7)
5. Manish R. Elevated temperature erosive wear of metallic materials // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2006. – V. 39. – P. 101–124. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/6/R01>
6. Виноградов В. Н., Платонова С. Н., Лившиц Л. С., Левин С. М. Некоторые вопросы механизма разрушения сталей в условиях газоабразивного изнашивания // *Трение и износ*. – 1980. – Т. 1, № 4. – С. 656–661.
7. Шейнман Е. Эрозия материалов. Обзор американской печати // *Трение и износ*. – 2006. – Т. 27, № 6. – С. 665–675.
8. Kleis I., Kulu P. Solid particle erosion: occurrence, prediction and control. – London: Springer, 2008. – 206 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-029-2>
9. Veinthal R., Kulu P., Käerdi H. Microstructural aspects of abrasive wear of composite powder materials and coatings // *International Journal of Materials and Product Technology*. – 2011. – V. 40, Is. 1–2. – P. 92–119. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2011.037208>
10. Javaheri V., Porter D., Kuokkala V. T. Slurry erosion of steel—Review of tests, mechanisms and materials // *Wear*. – 2018. – V. 408–409. – P. 248–273. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.05.010>
11. Эванс А. Эрозия / Под ред. К. Прис; Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 464 с.
12. Varga M. High temperature abrasive wear of metallic materials // *Wear*. – 2017. – V. 376–377, Part A. – P. 443–451. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.042>
13. Соколов Г. Н., Лысак В. И. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей. – Волгоград: ВолгГТУ, 2005. – 248 с.
14. Прияткин Д. В., Артемьев А. А., Лысак В. И., Лойко П. В. Анализ наплавочных сплавов для работы в условиях газоабразивного изнашивания при повышенных температурах // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2020. – № 10. – С. 49–55.
15. Данильченко Б. В. Выбор износостойкого наплавленного металла для работы в условиях абразивного изнашивания // *Сварочное производство*. – 1992. – № 5. – С. 31–33.
16. Соколов Г. Н., Артемьев А. А., Зорин И. В., Лысак В. И., Литвиненко-Арьков В. Б. Диагностика износостойкости наплавленного металла методом склерометрии // *Сварка и диагностика*. – 2012. – № 2. – С. 34–39.

17. Артемьев А. А., Соколов Г. Н., Зорин И. В., Лысак В. И., Рыков М. А., Крутенко А. В., Шнипко М. В. Методика испытаний наплавленного металла на газообразное изнашивание // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2018. – № 3. – С. 112–116.
18. Lin C. M., Chang C. M., Chen J. H., Hsieh C. C., Wu W. Microstructure and wear characteristics of high-carbon Cr-based alloy claddings formed by gas tungsten arc welding (GTAW) // Surface and Coatings Technology. – 2010. – V. 205, Is. 7. – P. 2590–2596. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.10.004>
19. Sun S., Fu H., Ping X., Guo X., Lin J., Lei Y., Zhou J. Formation mechanism and mechanical properties of titanium-doped NbC reinforced Ni-based composite coatings // Applied Surface Science. – 2019. – V. 476. – P. 914–927. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.171>
20. Воробьев Ю. П. Карбиды в сталях // Известия Челябинского научного центра. – 2004. – № 4. – С. 34–60.
21. Zhao C., Xing X., Guo J., Shi Z., Zhou Y., Ren X., Yang Q. Microstructure and wear resistance of (Nb, Ti) C carbide reinforced Fe matrix coating with different Ti contents and interfacial properties of (Nb, Ti) C/ $\alpha$ -Fe // Applied Surface Science. – 2019. – V. 494. – P. 600–609. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.209>
22. Меськин В. С. Основы легирования стали – М.: Металлургиздат, 1959. – 688 с.
23. Физическое металловедение: Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми физическими свойствами. Т. 2. / Под ред. Р. У. Кана, П. Хаазена; Пер. с англ, под ред. О. В. Абрамова, А. В. Серебрякова. – М.: Металлургия, 1987. – 621 с.
24. Wang X. H., Han F., Liu X. M., Qu S. Y., Zou Z. D. Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – V. 489, Is. 1–2. – P. 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.12.020>
25. Иванько А. А. Твердость. – Киев: Наукова думка, 1968. – 128 с.

УДК 621.762.2:669.71'24

## **АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА СФЕРИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ И ГРАНУЛ МОНОАЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ NiAl ДЛЯ НУЖД ОТЕЧЕСТВЕННОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ**

М. В. ЖАРОВ, канд. техн. наук

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт» (Национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Волоколамское шоссе, д. 4, E-mail: MaximZharov@mail.ru*

Поступила в редакцию 6.06.2022

После доработки 22.06.2022

Принята к публикации 30.06.2022

Исследованы особенности различных методов получения гранул алюминиды никеля NiAl. Анализируются проблемы, препятствующие широкому применению алюминиды никеля NiAl в современном авиа- и двигателестроении. Выявлено, что основными проблемами, препятствующими широкому промышленному применению алюминиды никеля NiAl, является практически нулевая пластичность материала при обработке давлением и трудности механической обработки деталей из данного материала. Однако данная проблема может быть решена с помощью применения технологий металлургии гранул, когда путем спекания гранулированного материала получается практически готовое изделие, требующее минимальной последующей механической обработки.

В рамках проведенных исследований были определены критерии качества получаемых гранул, к которым можно отнести сферичность гранул, стабильность получаемых размеров гранулированного материала, отсутствие дефектов в виде пор, отсутствие сателлитов на поверхности гранул, наличие мелкодисперсной дендритной структуры материала гранул. Для получения



наиболее качественного сырья были исследованы несколько методов получения гранул алюминид- никеля NiAl: распыление оплаиваемой заготовки высокотемпературным потоком инертного газа (метод газовой атомизации), центробежное разбрызгивание оплаиваемого электрода (метод PREP), центрифугирование расплава с помощью перфорированного тигля.

В процессе проведенных исследований было установлено, что оптимальным способом получения качественного гранулята материала NiAl является метод центробежного разбрызгивания оплаиваемого электрода, а основным параметром процесса центробежного распыления оплаиваемого электрода, влияющим на качество получаемых гранул, их диаметр и величину дендритного параметра микроструктуры гранул является не столько сила тока  $I$ , сколько скорость вращения оплаиваемого электрода  $n$ . Определена оптимальная скорость вращения электрода  $n \approx 15000\text{--}16000$  об./мин при силе тока  $I = 1000\text{--}1500$  А. Разработана и опробована технология получения качественного гранулята материала NiAl, которая включает в себя операции получения исходных заготовок NiAl методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, переплава полуфабрикатов, термической обработки, сепарации гранул и последующего гранулирования методом PREP.

*Ключевые слова:* алюминид никеля, гранулы, металлургия гранул, кристаллизация, качество гранул, сферичность, пористость, налипание сателлитов, фазовый состав, наследственная структура, газовая атомизация, распыление электрода, скорость вращения электрода.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-111-3-29-40

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bochenek K., Basista M. Advances in processing of NiAl intermetallic alloys and composites for high temperature aerospace applications // Progress in Aerospace Sciences. – 2015. – V. 79. – P. 136–146.
2. Бунтушкин В.П., Базылева О.А., Буркина В.И. Высокотемпературные жаропрочные сплавы на основе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al для деталей горячего тракта ГТД // Авиационная промышленность. – 2007. – С. 41 – 43.
3. Ночовная Н. А., Базылева О. А., Каблов Д. Е., Панин П. В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / Под ред. Е. Н. Каблова. – М.: ВИАМ, – 2018. – 308 с.
4. Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М., Летников М. Н., Мазалов И. С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы. – 2017. – С. 116–129.
5. Оспенникова О. Г., Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Шестаков А. В., Туренко Е. Ю. Оспенникова, О. Г. Создание интерметаллидных никелевых сплавов и композиционных материалов на их основе. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 75–89.
6. Каблов Е. Н., Бунтушкин В. П., Базылева О. А. Конструкционные жаропрочные материалы на основе соединения Ni<sub>3</sub>Al для деталей горячего тракта ГТД // Технология легких сплавов. – 2007. – № 2. – С. 75–80.
7. Xu G. H., Zhang K. F., Huang Z. Q. The synthesis and characterization of ultrafine grain NiAl intermetallic // Advanced Powder Technology. – 2012. – V. 23. – P. 366–371.
8. Поварова К. Б., Дроздов А. А., Скачков О. А., Морозов А. Е. Физико-химические подходы к разработке сплавов на основе NiAl для высокотемпературной службы // Металлы. – 2011. – № 2. – С. 48–62.
9. Сентюрина Ж. А. Получение сферических порошков из сплавов на основе алюминид никеля NiAl для аддитивных технологий // Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСИС, 2016. – 168 с.
10. Шевцова Л. И. Структура и механические свойства материалов на основе алюминид никеля, полученных по технологии искрового плазменного спекания порошковых смесей // Дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, НГТУ, 2015 – 198 с.
11. Галиева Э. В. Твердофазное соединение интерметаллидного сплава на основе Ni<sub>3</sub>Al и жаропрочного никелевого сплава с использованием сверхпластической деформации // Дис. ... канд. техн. наук. – Уфа: ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов, 2021. – 195 с.

12. Zhang Q., Chang Y., Gu L., Luo Y., Ge B. Study of microstructure of Nickel-based superalloys at high temperatures. // *Scripta Mater.* – 2017. – V. 126. – P.55–57.
13. Ганеев А. А., Валитов В. А., Утяшев Ф. З., Имаев В. М. Влияние деформационно-термической обработки на формирование градиентной структуры и механических свойств в диске из гранульного никелевого сплава // *Физика металлов и металловедение.* – 2019. – Т. 120, № 4. – С. 442–448.
14. Galieva E. V., Lutfullin R. Ya., Akhunova A. Kh., Valitov V. A., Dmitriev S. V. Effect of surface relief on solid phase joining of heat-resistant nickel superalloys // *Science and technology of welding and joining.* – 2018. – V. 23, N 7. – P. 612–618.
15. Капланский Ю. Ю. Получение узкофракционных сферических порошков жаропрочных сплавов на основе алюминиды никеля и их применение в технологии селективного лазерного сплавления // Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МиСИС, 2020. – 252 с.
16. Angelo P. C., Subramanian R. *Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications.* – PHI Learning Pvt. Ltd., 2008. – P. 312.
17. Bojarevics V., Roy A., Pericleous K. Numerical model of electrode induction melting for gas atomization // *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering.* – 2011. – V. 30 (5). – P. 1455–1466.
18. Xia Y., Khezzar L., Alshehhi M., Hardalupas Y. Droplet size and velocity characteristics of water-air impinging jet atomizer // *International Journal of Multiphase Flow.* – 2017. – V. 94. – P. 31–43.
19. Ario Sunar Baskoro, Sugeng Supriadi and Dharmanto // *Review on plasma atomizer technology for metal powder.* MATEC Web of Conferences 269, 05004 (2019) IIW 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926905004>
20. Samal S. Thermal plasma technology: The prospective future in material processing // *Journal of cleaner production.* – 2017. – V. 142. – P. 3131–3150.
21. Mohanty T., Tripathi B., Mahata T., Sinha P. Arc plasma assisted rotating electrode process for preparation of metal pebbles, in *Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), 2014 International Symposium on.* – 2014. – P. 741–744.
22. Entezarian M., Allaire F., Tsanzizos P., Drew R. A. Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders // *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society.* – 1996. – V. 48 (6). – P. 53–55.
23. Galkin E. V., Zharov M. V. The prospective technology of production of metal materials grains with extra high rate of solidification. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 17th International School-Conference "New Materials: Advanced Technologies"* IOP Publishing. 1005 (2020) 012020.
24. Жаров М. В. Исследование свойств гранулированных материалов системы Al–Cu–Mg, прессуемых из гранул, полученных с применением технологии центрифугования при сверхвысоких скоростях охлаждения // *Технология машиностроения.* – 2021. – № 04 (226). – С. 5–9.
25. Жаров М. В. Исследование особенностей кристаллизации гранул высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu при сверхвысоких скоростях охлаждения // *Вестник ПНИПУ. Механика.* – 2021. – № 4. – С. 71–82. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.08
26. Особенности кристаллизации и структурно-фазового состояния сплавов системы Ni<sub>3</sub>Al–Ni–NiAl, легированных хромом, молибденом, вольфрамом, рением и кобальтом / К. Б. Поварова и др. // *Металлы.* – 2020. – № 3. – С. 41–50.
27. Zaitsev A. A., Sentyurina Zh. A., Levashov E. A., Pogozhev Yu. S., Sanin V. N., Sidorenko D. A. Structure and properties of NiAl–Cr(Co,Hf) alloys prepared by centrifugal SHS casting followed by vacuum induction remelting. Part 2: Evolution of the structure and mechanical behavior at high temperature // *Materials Science and Engineering: A.* – 2017. – V. 690. – P. 473–481.

28. Телешов В. В. Фундаментальная закономерность изменения структуры при кристаллизации алюминиевых сплавов с разной скоростью охлаждения // Технология легких сплавов. – 2015. – № 2. – С. 13–18.

29. Zhu H., Tong H., Yang F., Cheng C. Plasma-assisted preparation and characterization of spherical stainless steel powders // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – V. 252. – P. 559–566.

30. Xu G. N. Zhang K. F., Huang Z. Q The synthesis and characterization of ultrafine grain NiAl intermetallic // Advanced Powder Technology. – 2012. – V. 23. – P. 366–371.

31. Kawasaki M., Langdon T. G. Superplasticity in ultrafine-grained materials // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2018. – N 54. – P. 46–55.

32. Береснев А. Г., Логунов А. В., Логачева А. И. Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул // Вестник МАИ. – 2008. – Т. 15, № 3. – С. 83–89.

УДК 661.66

### СИНТЕЗ НАНОПОРИСТЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОТРАСЛЕЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А. Е. МЕМЕТОВА, канд. техн. наук, А. Д. ЗЕЛЕНИН, Н. Р. МЕМЕТОВ, канд. техн. наук, Т. В. ПАСЬКО, канд. техн. наук, А. В. ГЕРАСИМОВА, канд. техн. наук, Д. В. ТАРОВ, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 392000, Тамбов, Советская ул., д.106/5, помещение 2, E-mail: [anastasia.90k@mail.ru](mailto:anastasia.90k@mail.ru)

Поступила в редакцию 7.06.2022

После доработки 15.08.2022

Принята к публикации 30.08.2022

В данном исследовании образцы нанопористых углеродных материалов (НУМ) были синтезированы из полимерного сырья. Исследовано влияние условий процесса синтеза (массового соотношения активирующего агента к прекурзору) на структуру полученных образцов. Варьирование массового соотношения активирующего агента к прекурзору позволило получить микропористые, мезопористые и мезопористые углеродные материалы. Исследована адсорбция метана в широком диапазоне давлений. Наивысшая адсорбция метана, равная  $\approx 20$  ммоль/г при 100 бар и температуре 298 К достигается на образце с соотношением активирующего агента КОН к карбонизированному прекурзору 6:1 (6НУМ).

*Ключевые слова:* структура, активация, гидроксид калия, адсорбция, метан, углеродный адсорбент

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-111-3-41-48

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pérez-Mayoral E., Matos I., Bernardo M., Fonseca I. M. New and Advanced Porous Carbon Materials in Fine Chemical Synthesis // Emerging Precursors of Porous Carbons. Catalysts. – 2019. – V. 9, N 2. – P. 133. <https://doi.org/10.3390/catal9020133>

2. Libbrecht W., Verberckmoes A., Thybaut J. W., Van Der V. P., De Clercq J. Soft templated mesoporous carbons: Tuning the porosity for the adsorption of large organic pollutants // Carbon. – 2017. – V. 11. – P. 528–546. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.02.016>

3. Massie C., Stewart G., McGregor G., Gilchrist J. R. Design of a portable optical sensor for methane gas detection // Sens. Actuators B-Chem. – 2006. – V. 113. – P. 830–836. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.03.105>

4. Sing K. Reporting physisorption data for gas-solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity // Pure Appl. Chem. – 1985. – V. 4. – P. 1365–3075. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>



5. Pakula M., Walczyk M., Biniak S., Świątkowski A. Electrochemical and FTIR studies of the mutual influence of lead(II) or iron(III) and phenol on their adsorption from aqueous acid solution by modified activated carbon // *Chemosphere*. – 2007. – V. 69. – P. 209–219. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.04.028
6. Yoshizawa N., Maruyama K., Yamada Y., Ishikawa E., Kobayashi M., Toda Y., Shiraishi M. XRD evaluation of KOH activation process and influence of coal rank // *Fuel*. – 2002. – V. 81. – P. 1717–1722. doi: 10.1016/S0016-2361(02)00101-1
7. Zhang Y., Kang X., Tan J., Frost R.L. Influence of calcination and acidification on structural characterization of Anyang anthracites // *Energy Fuel*. – 2013. – V. 27. – P. 7191–7197. <https://doi.org/10.1021/ef401658p>
8. Tongpoonthorn W., Sriuttha M., Homchan P., Chanthai S., Ruangviriyachai C. Preparation of activated carbon derived from *Jatropha curcas* fruit shell by simple thermo-chemical activation and characterization of their physic-chemical properties // *Chem. Eng. Res. Des.* – 2011. – V. 89. – P. 335–340. doi:10.1016/j.cherd.2010.06.012
9. Zhao J., Yang L., Li F., Yu R., Jin C. Structural evolution in the graphitization process of activated carbon by high-pressure sintering // *Carbon*. – 2009. – V. 47. – P. 744–751. doi:10.1016/j.carbon.2008.11.006
10. Khanday W. A., Marrakchi F., Asif M., Hameed B. H. Mesoporous zeolite-activated carbon composite from oil palm ash as an effective adsorbent for methylene blue // *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* – 2017. – V. 70. – P. 32–41. doi: 10.1016/j.jtice.2016.10.029
11. Saleh T. A., Sari A., Tuzen M. Effective adsorption of antimony(III) from aqueous solutions by polyamide-graphene composite as a novel adsorbent // *Chem. Eng. J.* – 2017. – V. 307. – P. 230–238. doi: 10.1016/j.cej.2016.08.070
12. Özçimen D., Ersoy-Meriçboyu A. Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials // *Renew. Energy*. – 2010. – V. 35. P. 1319–1324. doi: 10.1016/j.renene.2009.11.042
13. Li W., Zhu Y. Structural characteristics of coal vitrinite during pyrolysis // *Energy Fuel*. – 2014. – V. 28. – P. 3645–3654. doi:10.1021/EF500300R
14. Coates J., Meyers R.A. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach // *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. – 2019. – P. 1–23. doi:10.1002/9780470027318.A5606

УДК 661.665.1

### **СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ РЕАКЦИОННО-СПЕЧЕННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ, СОДЕРЖАЩЕГО ИСКУССТВЕННЫЙ ГРАФИТ**

О. Ю. СОРОКИН, канд. техн. наук, И. О. БЕЛЯЧЕНКОВ, А. С. ЧАЙНИКОВА, канд. техн. наук,  
С. В. ЖИТНЮК, канд. техн. наук, П. Н. МЕДВЕДЕВ, канд. физ.-мат. наук

*НИЦ «Курчатовский институт» — Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ), 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17.*

*E-mail: [lab13@viam.ru](mailto:lab13@viam.ru)*

Поступила в редакцию 3.08.2022

После доработки 24.08.2022

Принята к публикации 24.08.2022

Проведено исследование влияния плотности пористых SiC заготовок для силицирования на структуру и фазовый состав реакционно-спеченного карбида кремния, содержащего искусственный графит (грSiSiC). Установлено, что варьирование плотности пористых углеродсодержащих образцов с высотой (диаметром) не более 25 мм при одинаковом гранулометрическом составе исходных порошков позволяет получить образцы из грSiSiC с содержанием свободного кремния менее 4 мас.%. Показано, что проведение процесса силицирования пористых углеродкарбидо-кремниевых образцов с оптимально подобранной плотностью позволяет сформировать на их по-

© 2022

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

верхности плотный приповерхностный SiC слой. Кроме того, при проведении процесса силицирования в образцах из  $\text{grSiSiC}$  формируется плотная мелкозернистая SiC матрица, в которой равномерно по всему объему распределены включения графита и свободного кремния.

*Ключевые слова:* реакционно-спеченный карбид кремния, силицирование, графит, градиентная структура

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-111-3-49-58

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Житнюк С. В., Сорокин О. Ю., Журавлева П. Л. Керамика на основе карбида кремния, полученная спеканием гранулированного порошка // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2020. – № 2. Ст.06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-50-59.
2. Каблов Е. Н., Кондрашов С. В., Мельников А. А., Щур П. А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2022. – № 2. Ст.03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 11.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
3. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // Авиационные материалы и технологии. – 2020. – № 4. – С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
4. Герасимов В. С., Паутов Ю. М., Снетков В. Г., Федоров Г. П., Никифоров С. А., Ремизов М. А. Модернизация главных циркуляционных насосных агрегатов для повышения безопасности работы энергоблоков АЭС // Сборник трудов 2-ой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». 19–23 ноября 2001, АО «ОКБ Гидропресс». – С. 1–15.
5. Бабушкин С. В., Коробов И. Б., Африкантов Г. Г., Иляхинский И. А. Создание неохлаждаемого герметичного электронасоса // Сб. IV Междунар. науч.-технич. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2016). Т. 1. М.: НИКИЭТ. 27–30 сентября 2016. – С. 245–255.
6. Hoskins W. Ch. Silicon Carbide materials properties selection for mechanical seal faces // Undergraduate Honors Thesis. University of Tennessee. Knoxville, 2017. – 128 p.
7. Официальный сайт компании Schunk [Электронный ресурс], Германия. [2000–]. Режим доступа: <http://www.schunk-group.com> Дата обращения: 7.04.2022.
8. Сорокин О. Ю., Бубненко И. А., Кошелев Ю. И., Орехов Т. В. Разработка мелкозернистого силицированного графита с улучшенными свойствами // Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55, № 6. – С. 12–16.
9. Пат. РФ 2699641. №2018123264. Способ изготовления изделий из ультрамелкозернистого силицированного графита, Заявл. 26.06.2018; опубл. 06.09.2019 // Бюл. № 25. – 11 с.
10. Тютин С. С., Иляхинский И. А., Камнев М. А., Африкантов Г. Г. Сравнительная оценка опытных образцов вкладышей подшипников для герметичных электронасосов на стойкость в среде воды высоких параметров // Сб. мат. науч.- практич. конф. «Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2019». Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 17–18 октября. 2019. – С. 49–50.
11. Румянцев В. И., Генусова Т. Н., Сапронов Р. Л., Кожевников А. В. Анализ современных тенденций и перспектив развития использования керамоматричных композиционных материалов в антифрикционных парах трения // Химическая техника. – 2010. – № 11. – С. 38–44.
12. Кутяева К. М., Чеблакова Е. Г., Малинина Ю. А., Швецов А. А., Бейлина Н. Ю. Проведение аналитического контроля силицированного графита СГ-П // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. – Т. 87. – С. 69–75.
13. Сорокин О. Ю., Чайникова А. С., Кузнецов Б. Ю., Житнюк С. В., Карачевцев Ф. Н. Исследование влияния примесного состава кремния на дефектность образцов из реакционно-спеченного

карбида кремния. Ч.1 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – Т. 88, № 1. – С. 42–48.

14. Станкус С. В., Хайрулин Р. А., Тягельский П. В. Термические свойства германия и кремния в конденсированном состоянии // Теплофизика высоких температур. – 1999. – Т. 37, № 4. – С. 559–564.

15. Каблов Е. Н., Ечин А. Б., Бондаренко Ю. А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2020. – № 3(87). URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.

УДК 678.743.41

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНОГО ШУНГИТА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

А. П. АММОСОВА, А. А. УШКАНОВ, С. А. СЛЕПЦОВА, канд. техн. наук,  
А. А. ОХЛОПКОВА, д-р техн. наук, Н. Н. ЛАЗАРЕВА, канд. техн. наук

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», 677000,  
Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Белинского, 58. E-mail: [alexanderushkanov@mail.ru](mailto:alexanderushkanov@mail.ru)

Поступила в редакцию 20.06.2022

После доработки 12.07.2022

Принята к публикации 30.08.2022

Приведены результаты физико-механических и триботехнических исследований композитов на основе политетрафторэтилена и природного шунгита. Установлено, что при введении шунгита износостойкость материала повышается в 114 раз по сравнению с ненаполненным полимером. Методом электронной микроскопии показано, что на поверхности трения композитов формируется вторичный слой, защищающий материал от износа. Методом ИК-спектроскопии установлено, что в процессе износа композитов протекают трибохимические реакции с образованием кислородсодержащих функциональных групп и последующим структурированием поверхностного слоя. Результаты исследования, полученные дифференциальной сканирующей калориметрией, показывают, что присутствие природного шунгита в матрице ПТФЭ приводит к упорядочиванию структуры композитов.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, полимерный композит, шунгит, износостойкость, коэффициент трения, структура, поверхность трения.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-111-3-59-66

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мамаев О. А. Повышение механических и триботехнических свойств композитов на основе ПТФЭ оптимизацией состава и технологии // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (97). – С. 33–37.

2. Сокольская М. К., Колосова А. С., Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С. Связующие для получения современных полимерных композиционных материалов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 10 (2). – С. 290–295.

3. Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review. Adv Compos Hybrid Mater 1. – 2018. – P. 247–268.

4. Lakshmanan A., Chakraborty S. K. Recycling of Polytetrafluoroethylene (PTFE) Scrap Materials // Sintering Techniques of Materials. – 2015. doi: 10.5772/59599

5. Garishin O. K., Shadrin V. V., Belyaev A. Yu., Kornev Yu. V. Micro and nanoshungites – perspective mineral fillers for rubber composites used in the tires // Materials Physics and Mechanics. – 2018. – N 40. – P. 56–62.

6. Olewnik-Kruszkowska E., Adamczyk A., Gierszewska M., Grabska-Zielinska S. Comparison of How Graphite and Shungite Affect Thermal, Mechanical, and Dielectric Properties of Dielectric Elastomer-Based Composites. *Energies*. – 2022. – № 15. – P. 152. <https://doi.org/10.3390/en15010152>.
7. Хромушин В. А., Честнова Т. В., Платонов В. В., Хадарцев А. А., Киреев С. С. Шунгиты, как природная нанотехнология (обзор литературы) // *Вестник новых медицинских технологий (Электронное издание)*. – 2014. – № 1. – С. 3–14.
8. Berladir K., Sviderskiy V. Designing and examining polytetrafluoroethylene composites for tribotechnical purposes with activated ingredients. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Т. 6, № 84. – P. 14–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85095>
9. Авинкин В. С. Механические свойства композиционных материалов на основе термопластов и частиц резины // *Дис ... канд. хим. наук.: 05.17.06*. – М., 2003 – 172 с..
10. Кириллина Ю. В., Слепцова С. А., Джин Хо-Чо. Влияние способа смешения компонентов на свойства полимер-силикатного композиционного материала // *Арктика XXI век. Технические науки*. – 2013. – № 1 (1). – С.13–26.
11. Липатова Ю. С. Физико-химия многокомпонентных наполненных систем. Т. 1 / Киев: Наукова думка. – 1986. – 376 с.
12. Тарасевич Б. Н. ИК спектры основных классов органических соединений: Справочные материалы. – М., 2012. – 55 с.
13. 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-меркаптобензтиазолом // *Вопросы материаловедения*. – 2019. – № 3. – С. 91–98.
14. Привалко В. П. О температуре максимальной скорости роста сферолитов при кристаллизации полимеров из расплава // *Синтез и физико-химия полимеров*. – 1979. – № 20. – С. 27–35.
15. Вундерлих Б. Физика макромолекул. – М.: Мир, 1976. – 624 с.
16. Наркевич А. Л., Ставров В. П. Влияние структуры и режимов охлаждения на кристаллизацию вторичного стеклонаполненного ПЭТФ в изделиях // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 65–71.

УДК 678.019.32

## **АРАМИДНЫЕ ОРГАНОПЛАСТИКИ С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К ВОЗДЕЙСТВИЮ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

Г. Ф. ЖЕЛЕЗИНА, канд. техн. наук, Г. С. КУЛАГИНА, канд. техн. наук,  
А. С. КОЛОБКОВ, канд. техн. наук, П. М. ШУЛЬДЕШОВА

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

Поступила в редакцию 12.07.2022

После доработки 27.07.2022

Принята к публикации 27.07.2022

Дано описание поэтапного развития российских арамидных волокон от СВМ и Руслан до третьего поколения волокон Русар НТ. Исследовали стойкость конструкционного органопластика на основе третьего поколения российских арамидных волокон к воздействию различных климатических факторов с целью обоснования возможности эксплуатации материала во всеклиматических условиях. Для конструктивных органопластиков, армированных арамидными волокнами, способными сорбировать влагу, особо значимым фактором воздействия является влажность среды. При разработке органопластиков всеклиматического исполнения ключевым вопросом является повышение стойкости к поглощению влаги и обеспечение стабильности механических характеристик

при водо- и влагопоглощении. Впервые для российского арамидного органопластика показано, что благодаря высокой влагостойкости и высокому уровню сохранения физико-механических свойств после воздействия широкого спектра климатических испытаний органопластик марки ВКО-25 может быть рекомендован для применения в изделиях авиационной техники, работающих во всеклиматических условиях.

*Ключевые слова:* арамидные волокна, органопластик, влагопоглощение, водопоглощение, полимерные композиты, климатическое старение

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-111-3-67-78

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Лаптев А. Б., Прокопенко А. Н., Гуляев А. И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Ч. 1. Связующие // *Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-техн. журн.* – 2021. – № 4. Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 11.05.2022). DOI:10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
2. Каблов Е. Н., Старцев О. В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии.* – 2015. – № 4 (37). – С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Ткаченко В. Н., Гуняев Г. М. Климатическая стойкость углепластиков под нагрузкой // *Авиационные материалы. Коррозия и старение материалов в морских субтропиках / Под ред. Б. В. Перова, В. А. Засыпкина.* – М.: ВИАМ, 1983. – С. 18–31.
4. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов.* – 2010. – № 11. – С. 19–27.
5. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // *Деформация и разрушение материалов.* – 2011. – № 1. – С. 34–40.
6. 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.
7. Панферов К. В., Романенков И. Г., Абашидзе Г. С. Атмосферостойкость стеклопластиков, находящихся под нагрузкой // *Пластические массы.* – 1968. – № 6. – С. 32–33.
8. Кривонос В. В., Тарасов Ю. М. Инновационные композитные материалы и технологии в авиастроении // *Сб. Композиты СНГ: Цифровизация и стоимостный анализ жизненного цикла изделий, Ивент группа Musthavevents.* – 2018. – С. 23–26.
9. Каблов Е. Н., Старцев В. О., Иноземцев А. А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов. // *Авиационные материалы и технологии.* – 2017. – № 2. – С. 56–68. DOI 10.18577-2071-9140-2017-0-2-56-68.
10. Старцев В. О., Велевин Е. О., Гуляев А. И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2020. – № 8. Ст.07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 12.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
11. Железина Г. Ф., Соловьева Н. А, Кулагина Г. С., Шульдешова П. М. Современные препреги на основе полимерных органических волокон для изготовления авиационных конструкций // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* – 2022. – № 5. – С. 37–45.
12. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. – М.: НОТ, 2018. – 822 с.



13. Zhelezina G. F., Shuldeshova P. M. Structural organoplastics based on film adhesives // Polymer Science. Series D. – 2014. – Т. 7, № 3. – С. 172–176. DOI:10.1134/S199542121403023X.
14. Железина Г. Ф., Тихонов И. В., Черных Т. Е., Бова В. Г., Войнов С. И. Арамидные волокна третьего поколения Русар НТ для армирования органотекстолитов авиационного назначения // Пластические массы. – 2019. – № 3–4. – С. 43–47.
15. Каблов Е. Н., Кулагина Г. С., Железина Г. Ф., Лонский С. Л., Куршев Е. В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // Авиационные материалы и технологии. – 2020. – № 4. – С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26
16. Tikhonov I. V., Tokarev A. V., Shorin S. V., Shchetinin V. M., Chernykh T. E., Bova V. G. Russian aramid fibres: past-present-future // Fibre Chemistry. – 2013. – № 5. – P. 1–8.
17. Мухаметов Р. Р., Ахмадиева К. Р., Ким М. А., Бабин А. Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 260–265.
18. Мухаметов Р. Р., Петрова А. П. Свойства эпоксидных полимерных связующих и их переработка в полимерные композиционные материалы // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2018. – № 3–4 (30). – С. 6.
19. Мухаметов Р. Р., Петрова А. П., Ахмадиева К. Р. Влияние волокнистого наполнителя на процесс отверждения и структуру отвержденного связующего в составе ПКМ // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2019. – № 5. – С. 12–18.
20. Shuldeshova P. M., Zhelezina G. F., Solovieva N. A., Shuldeshov E. M. Dielectric characteristics of structural organoplastics // Polymer Science, Series D. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 96–100. DOI: 10.1134/S1995421222010178.
21. Колобков А. С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2020. – № 6–7. Ст.05 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
22. Бойцов Б. В., Коротков С. С., Кривонос В. В., Тарасов Ю. М. Некоторые вопросы технологического проектирования конструкций из полимерных композиционных материалов, работающих в экстремальных условиях. – М.: Академия проблем качества. – 2019. – 112 с.

УДК 669.715:620.193.4

### **ИССЛЕДОВАНИЕ АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА Zn55Al С ГАЛЛИЕМ В КИСЛЫХ, НЕЙТРАЛЬНЫХ И ЩЕЛОЧНЫХ СРЕДАХ**

М. Э. СИРОДЖИДИНОВ, И. Н. ГАНИЕВ, д-р хим. наук, Дж. Х. ШАРИПОВ,  
З. Р. ОБИДОВ, д-р хим. наук

*Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана,  
734063, г. Душанбе, ул. Айни 299/2, E-mail: obidovzr@gmail.com*

Поступила в редакцию 4.05.2022

После доработки 11.07.2022

Принята к публикации 12.07.2022

Приведены результаты потенциостатических и потенциодинамических исследований анодного поведения сплава Zn55Al с галлием в кислых, нейтральных и щелочных средах электролитов HCl, NaCl и NaOH при различных значениях pH. Введение легирующих добавок (0,01–1,0 мас.%) галлия приводит к смещению коррозионно-электрохимического потенциала коррозии, питтингообразования и репассивации базового сплава Zn55Al в область положительных значений. Результаты свидетельствуют о снижении скорости коррозии легированных галлием сплавов в 2–3 раза по сравнению с базовым сплавом. Такая зависимость наблюдается во всех исследованных коррозионных средах.

**Ключевые слова:** сплав Zn55Al с галлием, электрохимические методы исследований, потенциалы коррозии, pH среды, скорость коррозии, анодное поведение.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-111-3-79-84

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кечин В. А., Люблинский Е. Я. Цинковые сплавы. – М.: Metallurgy, 1986. – 247 с.
2. Виткин А. И., Тейндл И. И. Металлические покрытия листовой и полосовой стали. – М.: Metallurgy, 1971. – 493 с.
3. Lin K. L., Yang C. F., Lee J. T. Correlation of microstructure with corrosion and electrochemical behaviours of the bath-type hot-dip Al–Zn coatings: Part 1. Zn and 5% Al–Zn coatings // Corrosion. – 1991. – V. 47. – N 4. – P. 9–13.
4. Lin K. L., Yang C. F., Lee J. T. Correlation of microstructure with corrosion and electrochemical behaviours of the bath-type hot-dip Al–Zn coatings: Part 2. 55% Al–Zn coatings // Corrosion. – 1991. – V. 47. – N 4. – P. 17–30.
5. Mazilkin A. A., Straumal B. B., Borodachenkova M. V., Valiev R. Z., Kogtenkova O. A., Baretzky B. Gradual softening of Al–Zn alloys during high-pressure torsion // Materials Letters. – 2012. – V. 84. – P. 63–65.
6. Amini R. N., Irani M., Ganiev I. N., Obidov Z. R. Galfan I and Galfan II Doped with Calcium, Corrosion Resistant Alloys // Oriental Journal of Chemistry. – 2014. – V. 30. – N 3. – P. 969–973.
7. Obidov Z. R. Effect of pH on the Anodic Behavior of Beryllium and Magnesium Doped Alloy Zn55Al // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2015. – V. 88. – N 9. – P. 1451–1457.
8. Uesugi T., Takigawa Y., Kawasaki M., Higashi K. Achieving room-temperature superplasticity in an ultrafin-grainer Zn–22% Al alloy // Letters on materials. – 2015. – N 5(3). – P. 269–275.
9. Obidov Z. R. Anodic Behavior and Oxidation of Strontium-Doped Zn5Al and Zn55Al Alloys // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2012. – V. 48, N 3. – P. 352–355.
10. Maniram S. G., Singh G. M., Dehiya S., Sharma N. C. Effect of fly ash articles on the mechanical properties of Zn–22% Al alloy via stir casting method // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2013. – V. 10, N 2. – P. 39–42.
11. Obidov Z. R. Thermophysical Properties and Thermodynamic Functions of the Beryllium, Magnesium and Praseodymium Alloyed Zn–55Al Alloy // High Temperature. – 2017. – V. 55. – N 1. – P. 150–153.
12. Колотыркин Я. М. Металл и коррозия. – М.: Metallurgy, 1985. – 88 с.

УДК 620.193.4

#### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АГРЕССИВНЫХ ФАКТОРОВ И УСЛОВИЙ НА СОСТАВ КОРРОЗИОННЫХ ПРОДУКТОВ

Р. К. ВАГАПОВ, канд. хим. наук

ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ», 142717, Московская обл., Ленинский г.о., пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, вл. 15, стр. 1. E-mail: [R\\_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru](mailto:R_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru)

Поступила в редакцию 23.05.2022

После доработки 11.07.2022

Принята к публикации 19.07.2022

Представлены данные по использованию метода рентгеновской дифракции при анализе состава коррозионных продуктов. Такие знания позволяют получать информацию по механизмам развития коррозии и защитным свойствам продуктов коррозии, которые могут быть либо плотными (с определенными свойствами защиты от коррозии), либо рыхлыми (с низким уровнем защиты от коррозии), которые не будут препятствовать проникновению коррозионно-активных сред к поверх-

ности стали. В условиях сероводородных сред  $H_2S$  на поверхности сталей формируется слой маккинавита ( $FeS$  тетрагонального), а в кислых средах имитата пластовых вод в дополнение к нему образуется кубический  $FeS$ . Сульфид железа с кубической кристаллической структурой, являясь метастабильным, будет снижать защитные свойства сульфидной пленки в агрессивных кислых  $H_2S$  средах. При углекислотной коррозии стали основным продуктом является сидерит ( $FeCO_3$ ), для которого характерно явление изоморфизма (изменение химического состава фазы при сохранении ее кристаллической структуры). Установлено, что в модели пластовой воды образуются осадки нестехиометрического состава  $Ca_xFe_yCO_3$  и  $(XFe)CO_3$ , где  $X = (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+})$ . Оба они плохо окристаллизованы и имеют дефекты в кристаллической структуре, что снижает их защитные свойства относительно стехиометрического  $FeCO_3$ , образующегося в 3%-ном растворе  $NaCl$ . При наличии ингибитора коррозии в водных средах способствует адсорбции ингибиторной пленки, предотвращая образование продуктов коррозии.

*Ключевые слова:* углекислотная коррозия, сероводородная коррозия, продукты коррозии, сидерит, маккинавит

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-111-3-85-97

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кантюков Р. Р., Запевалов Д. Н., Вагапов Р. К. Оценка влияния эксплуатационных условий на стойкость сталей, применяемых в  $H_2S$ -содержащих средах на объектах добычи углеводородов // *Металлург.* – 2021. – № 12. – С. 24–31. DOI: 10.52351/00260827\_2021\_12\_24
2. Вагапов Р. К. Сравнение и интерпретация результатов обработки данных внутритрубной диагностики для условий транспортировки коррозионно-агрессивного газа // *Дефектоскопия.* – 2021. – № 8. – С. 62–71. DOI: 10.31857/S0130308221080066
3. Кантюков Р. Р., Запевалов Д. Н., Вагапов Р. К. Анализ применения и воздействия углекислотных сред на коррозионное состояние нефтегазовых объектов // *Записки Горного института.* – 2021. – Т. 250, № 4. – С. 578–586. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.11
4. A review of iron carbonate ( $FeCO_3$ ) formation in the oil and gas industry / R. Barker, D. Burkle, T. Charpentier et al. // *Corrosion Science.* – 2018. – V. 142. – P. 312–341. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.07.021>
5. Вагапов Р. К., Михалкина О. Г., Запевалов Д. Н. Использование методов рентгеновской дифракции и хроматомасс-спектрометрии при оценке коррозии и ингибиторной защиты на объектах газовых месторождений // *Коррозия: материалы, защита.* – 2022. – № 1. – С. 37–48. DOI: 10.31044/1813-7016-2022-0-1-37-48
6. Fosbøl P. L., Thomsen K., Stenby E. H. Review and recommended thermodynamic properties of  $FeCO_3$  // *Corrosion Engineering, Science and Technology.* 2010. – V. 45, N 2. – P. 115–135. <https://doi.org/10.1179/174327808X286437>
7. Sun W, Nešić S. Kinetics of Corrosion Layer Formation: Part 1—Iron Carbonate Layers in Carbon Dioxide Corrosion / *Corrosion.* – 2008. – V. 64, N 4. – P. 334–346. <https://doi.org/10.5006/1.3278477>
8. Sun W, Nešić S., Papavinasam S. Kinetics of Corrosion Layer Formation. Part 2: Iron Sulfide and Mixed Iron Sulfide/Carbonate Layers in Carbon Dioxide/Hydrogen Sulfide Corrosion // *Corrosion.* – 2008. – V. 64, N 7. – P. 586–599. <https://doi.org/10.5006/1.3278494>
9. Михалкина О. Г. Применение метода рентгеновской дифракции для исследования керны и техногенных продуктов // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки».* – 2016. – Т. 28, № 4. – С. 96–107.
10. In situ synchrotron X-ray diffraction study of surface scale formation during  $CO_2$  corrosion of carbon steel at temperatures up to  $90^\circ C$  / B. Ingham, M. Ko, G. Kear, et al. // *Corrosion Science.* – 2010. – V. 52. – P. 3052–3061. DOI:10.1016/j.corsci.2010.05.025
11. Modelling of carbon dioxide corrosion of steel with iron carbonate precipitation / M. Shayegani, M. Ghorbani, A. Afshar et al. // *Corrosion Engineering, Science and Technology.* – 2009. – V. 44, N 2. – P. 128–136. <https://doi.org/10.1179/174327808X286338>

12. Electrochemical response of mild steel in ferrous ion enriched and CO<sub>2</sub> saturated solutions / C. Bian, Z. M. Wang, X. Han et al. // *Corrosion Science*. – 2015. – V. 96. – P. 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.03.015>
13. Mechanical properties of CO<sub>2</sub> corrosion product scales and their relationship to corrosion rates / K. Gao, F. Yu, X. Pang et al. // *Corrosion Science*. – 2008. – V. 50. – P. 2796–2803. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.07.016>
14. The early stages of FeCO<sub>3</sub> scale formation kinetics in CO<sub>2</sub> corrosion / R. A. De Motte, R. Barker, D. Burkle et al. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2018. – V. 216. – P. 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.077>
15. Yin Z. F., Zhao W. Z., Feng Y. R., Zhu S. D. Characterization of CO<sub>2</sub> corrosion scale in simulated solution with Cl<sup>-</sup> ion under turbulent flow conditions // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. – 2009. – V. 44, N 6. – P. 453–461. <https://doi.org/10.1179/174327808X303482>
16. Mechanical properties of CO<sub>2</sub> corrosion scale formed at different temperatures and their relationship to corrosion rate / S. D. Zhu, G. S. Zhou, J. Miao et al. // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. – 2012. – V. 47, N 3. – P. 453–461. <https://doi.org/10.1179/1743278211Y.0000000023>
17. In situ SR-XRD study of FeCO<sub>3</sub> precipitation kinetics onto carbon steel in CO<sub>2</sub>-containing environments: The influence of brine pH / D. Burkle, R. De Motte, W. Taleb et al. // *Electrochimica Acta*. – 2017. – V. 255. – P. 127–144. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.09.138>
18. Вагапов Р. К., Прокопенко А. Ю., Томский И. С. Оценка зависимости скорости коррозии стали на объектах инфраструктуры углеводородных месторождений от минерализации и температуры // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2021. – Т. 87, № 6. – С. 41–44. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-41-44
19. Федоров А. С., Алексеева Е. Л., Альхименко А. А., Шапошников Н. О., Ковалев М. А. Исследование влияния параметров испытаний на оценку стойкости сталей к углекислотной коррозии // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2021. – Т. 87, № 12. – С. 36–41. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-12-42-47
20. Rizzo R., Baier S., Rogowska M., Ambat R. An electrochemical and X-ray computed tomography investigation of the effect of temperature on CO<sub>2</sub> corrosion of 1Cr carbon steel // *Corrosion Science*. – 2020. – V. 166. – Article 108471. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108471>
21. Effect of Incorporation of Calcium into Iron Carbonate Protective Layers in CO<sub>2</sub> Corrosion of Mild Steel / S. N. Esmaeely, D. Young, B. Brown et al. // *Corrosion*. – 2017. – V. 73, N 3. – P. 238–246. <https://doi.org/10.5006/2261>
22. Вагапов Р. К., Запечалов Д. Н. Агрессивные факторы эксплуатационных условий, вызывающие коррозию на объектах добычи газа в присутствии диоксида углерода // *Практика противокоррозионной защиты*. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 7–17. doi: 10.31615/j.corros.prot.2020.98.4-1
23. Characterization of the surface film formed from carbon dioxide corrosion on N80 steel / S. L. Wu, Z. D. Cui, F. He et al. // *Materials Letters*. – 2004. – V. 58. – P. 1076–1081. doi:10.1016/j.matlet.2003.08.020
24. Rizzo R., Ambat R. Effect of initial CaCO<sub>3</sub> saturation levels on the CO<sub>2</sub> corrosion of 1Cr carbon steel // *Materials and Corrosion*. – 2021. – V. 72, № 6. – P. 1076–1090. <https://doi.org/10.1002/maco.202011822>
25. Anti-corrosion characteristics of FeCO<sub>3</sub> and Fe<sub>x</sub>Ca<sub>y</sub>Mg<sub>z</sub>CO<sub>3</sub> scales on carbon steel in high-PT CO<sub>2</sub> environments / C. Wang, Y. Hua, S. Nadimi et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2022. – V. 431. – Art. 133484. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133484>
26. Mohammed S. A., Hua Y., Barker R. et al. Effect of calcium on X65 carbon steel pitting in saturated CO<sub>2</sub> environment // *Electrochimica Acta*. – 2022. – V. 407. – Art. 139899. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.139899>

27. Influence of calcium and magnesium ions on CO<sub>2</sub> corrosion of carbon steel in oil and gas production systems – A review / H. Mansoori, D. Young, B. Brown et al. // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – V. 59. – P. 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.08.025>
28. Ding C., Gao K., Chen C. Effect of Ca<sup>2+</sup> on CO<sub>2</sub> corrosion properties of X65 pipeline steel // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2009. – V. 16. – P. 661–666. [https://doi.org/10.1016/S1674-4799\(10\)60009-X](https://doi.org/10.1016/S1674-4799(10)60009-X)
29. Protectiveness, morphology and composition of corrosion products formed on carbon steel in the presence of Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> in high pressure CO<sub>2</sub> environments / Y. Hua, A. Shamsa, R. Barker et al. // Applied Surface Science. – 2018. – V. 455. – P. 667–682. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.05.140>
30. Effect of Fe<sub>x</sub>Ca<sub>y</sub>CO<sub>3</sub> and CaCO<sub>3</sub> scales on the CO<sub>2</sub> corrosion of mild steel / H. Mansoori, B. Brown, D. Young et al. // Corrosion. – 2019. – V. 75. – P. 1434–1449. <https://doi.org/10.5006/3290>
31. Вагапов Р. К. Исследование наводороживания и коррозии стального оборудования и трубопроводов на объектах добычи H<sub>2</sub>S-содержащего углеводородного сырья // Вопросы материаловедения. – 2021. – Т. 106, № 2. – С. 170–181. DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-170-181
32. Effect of interaction between corrosion film and H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> partial pressure ratio on the hydrogen permeation in X80 pipeline steel / C. Zhou, B. Fang, J. Wang et al. // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2020. – V. 55, N 5. – P. 392–399. DOI: 10.1080/1478422X.2020.1737384
33. Silva S. C., Silva A. B., Ponciano Gomes J. A. C. Hydrogen embrittlement of API 5L X65 pipeline steel in CO<sub>2</sub> containing low H<sub>2</sub>S concentration environment // Engineering Failure Analysis. – 2021. – V. 120. – Article 105081. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105081>
34. Murowchick J. B., Barnes H. L. Formation of cubic FeS // American Mineralogist. – 1986. – V. 71, N 9–10. – P. 1243–1246.

УДК 620.193.4:621.793.1

### КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОМПОЗИТНОГО НИКЕЛЬ-ФОСФОРНОГО ПОКРЫТИЯ В РАЗЛИЧНЫХ АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

Д. С. ПОЛУХИН<sup>1</sup>, Ю. Н. ГОЙХЕНБЕРГ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, Е. Г. БОДРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «НТЦ-Конар», Челябинск, 454010, Енисейская ул., 8. E-mail: [Polukhin.dmitriy@konar.ru](mailto:Polukhin.dmitriy@konar.ru)

<sup>2</sup> ФГАОУ «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), Челябинск, 454080, пр. Ленина, 76. E-mail: [goikhenbergyn@susu.ru](mailto:goikhenbergyn@susu.ru)

Поступила в редакцию 5.08.2022

После доработки 24.08.2022

Принята к публикации 09.09.2022

Исследована коррозионная стойкость химически осажденных композитных никель-фосфорных покрытий в особо агрессивных средах после изотермических отжигов при различных температурах, сопровождающихся кристаллизацией. Произведен анализ фазового состава покрытия с частицами карбида кремния SiC дисперсностью 0,5–1,2 мкм. Гравиметрическим методом определена потеря массы образцов в результате выдержки в различных концентрированных кислотах в течение 1 сут, а также в растворе азотной кислоты концентрацией от 5 до 65%. При каждой термической обработке использовали стальные образцы-свидетели для определения микротвердости методом Виккерса при нагрузке 100 г.

Установлена зависимость параметров коррозионного процесса от наличия дисперсной добавки и фазового состава покрытия. При непродолжительных выдержках SiC проявляет барьерный эффект, снижаются интенсивность образования при отжиге кристаллического фосфида Ni<sub>3</sub>P и коррозионная стойкость, тогда как продолжительные выдержки при более низких температурах формируют порядка 70%Ni<sub>3</sub>P, способствуют стабильно высокой твердости и улучшенным показателям коррозионной стойкости. Снижение температуры обработки при одновременном увеличении вы-



держки уменьшает интенсивность выгорания фосфора с поверхности и деградации свойств покрытия. Концентрация азотной кислоты в растворе на уровне 5–15% является критической и способствует растворению всех покрытий вне зависимости от их состава.

Проведенные исследования и выявленные закономерности позволили установить влияние фазового состава и наличия присадки SiC на формирование основных служебных характеристик никель-фосфорных покрытий – микротвердости и стойкости к воздействию агрессивной среды, а также определить технологические режимы обработки, позволяющие сформировать оптимальные свойства изделий, применяемых в нефтяной и газовой промышленности.

**Ключевые слова:** никель-фосфорное покрытие, дисперсная фаза, микротвердость, тонкие покрытия, метод Виккерса, фазовый состав, интерметаллид Ni<sub>3</sub>P, численные показатели коррозии, азотная кислота, гравиметрический метод

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-111-3-98-108

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гойхенберг Ю. Н., Полухин Д. С. Структура, свойства и качество композитного никель-фосфорного покрытия, наносимого на стальные подложки различного состава // *Черные металлы*. – 2022. – № 4. – С. 46–49.

2. Полухин Д. С., Гойхенберг Ю. Н. Стойкость Ni–P покрытия, прошедшего кристаллизационный отжиг по различным режимам, при воздействии крайне агрессивных сред // *Сб. материалов международной научно-практической конференции «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022 (ICMSSTE 2022)», Симферополь*. – 2022. – С. 147–156.

3. Логинова О. Ю. Разработка сульфатно-глицинатно-хлоридного электролита и условий электроосаждения сплава никель–фосфор // *Дис. ... канд. хим. наук. – Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева*. – М., 2016. – 148 с.

4. Abdel Gawad S. A., Baraka A. M., Morsi M. S., Ali Eltoun M. S. Development of Electroless Ni–P–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ni–P–TiO<sub>2</sub> Composite Coatings from Alkaline Hypophosphite Gluconate Baths and their Properties // *International Journal of Electrochemical Science*. – 2013. – N 8. – P. 1722–1734.

5. Bahgat Radwan A., Kamran Ali, Shakoor R. A., Himyan Mohammed, Taif Alsalama, Ramazan Kahraman, Moinuddin M. Yusuf, Aboubakr M., Fatima Montemor M., Mohamed Helal Abdullah. Properties enhancement of Ni–P electrodeposited coatings by the incorporation of nanoscale Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles // *Applied surface science*. – 2018. – V. 457, N 1. – P. 956–967.

6. Alexis J., Etcheverry B., Beguin J. D., Bonino J. P. Structure, morphology and mechanical properties of electrodeposited composite coatings Ni–P/SiC // *Materials Chemistry and Physics*. – 2010. – V. 120, N 2–3. – P. 244–250.

7. Franco M., Sha W., Aldic G., Malinov S., Cimenoglu H. Effect of reinforcement and heat treatment on elevated temperature sliding of electroless Ni–P/SiC composite coatings // *Tribology international*. – 2016. – V. 97. – P. 265–271

8. Makarov A. V., Korobov Yu. S., Soboleva N. N., Khudorozhkova Yu. V., Vopneruk A. A., Balu P., Barbosa M. V., Malygina I. Yu, Burov S. V., Stepchenkov A. K. Wear resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications // *Letters on materials*. – 2019. – V. 9, N 4. – P. 470–474. DOI 10.22226/2410-3535-2019-4-470-474.

9. Макаров А. В., Соболева Н. Н., Малыгина И. Ю., Осинцева А. Л. Формирование композиционного покрытия NiCrBSi–TiC с повышенной абразивной износостойкостью методом газопорошковой лазерной наплавки // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2013. – № 11. – С. 38–44.

10. Саврай Р. А., Соболева Н. Н., Малыгина И. Ю., Осинцева А. Л. Контактная выносливость NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки // *Обработка металлов*. – 2014. – № 4 (65). – С. 43–51.

11. Ahmadkhaniha D., Eriksson F., Leisner P., Zanella C. Effect of SiC particle size and heat-treatment on microhardness and corrosion resistance of NiP electrodeposited coatings // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2002. – V. 769, N 1080–1087. – P. 1–29.

12. Перевозников С. С., Позняк С. К., Цыбульская Л. С., Кукаренко В. А., Кононов А. Г. Структура, механические свойства и электрохимическое поведение электроосажденных сплавов Ni–P // Свиридовские чтения. – 2012. – № 8. – С. 124–130.
13. Mafi R. I., Dehghanian C. Comparison of the coating properties and corrosion rates in electroless Ni–P/PTFE composites prepared by different types of surfactants // Applied Surface Science. – 2011. – V. 257. – P. 8653–8658
14. Osama F., Bahgat Radwan A., Mostafa H. Sliem, Aboubakr M. Abdullah, Anwarul H. Shakoор R.A. Investigating the Properties of Electrodeposited of Ni–P–ZrC Nanocomposite Coatings // ACS Omega. – 2021. – V. 6. – P. 33310–33324.
15. Пахомов В. С. Коррозия металлов и сплавов. Кн. 1: Справочник. – М.: Наука и технологии, 2013. – 447 с.

УДК 621.039.531

### СТАБИЛЬНОСТЬ ОКСИДОВ СИСТЕМЫ Y–Ti–O В РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. С. ФРОЛОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Е. А. КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук,  
Б. А. ГУРОВИЧ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. А. НИКИТИНА<sup>3</sup>, Д. А. МАЛЫЦЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
С.В. ФЕДОТОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Д.В. САФОНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 11540, Москва, Каширское ш., 31.

<sup>3</sup> АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара», 123098, Москва, ул. Рогова, 5А

Поступила в редакцию 16.06.2022

После доработки 30.06.2022

Принята к публикации 1.07.2022

Представлены результаты микроструктурных исследований образцов из стали ЭП-450 ДУО в исходном состоянии и после нейтронного облучения в реакторе БН-600 (при ~1000°C до повреждающей дозы 77,5 сна) с использованием просвечивающей и растровой электронной микроскопии, а также атомно-зондовой томографии. Показано, что основной вклад в упрочнение стали ЭП-450 ДУО в исходном состоянии вносят частицы Y–Ti–O, большая часть которых имеет тип Y<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (иногда с добавкой Si) с некоторым отклонением от стехиометрии. После нейтронного облучения при ~1000°C основное упрочнение вносят выделения α'-фазы. Плотность оксидных частиц на основе иттрия в стали ЭП-450 ДУО после облучения существенно ниже, чем в исходном состоянии, что может быть обусловлено как влиянием облучения, так и различием образцов стали в исходном и облученном состояниях. Также показаны основные ориентационные соотношения между выделениями оксидных частиц и матрицей. Анализ зеренной структуры показал, что сталь ЭП-450 ДУО в исходном состоянии характеризуется наличием зерен размером 30–50 мкм, незначительно вытянутых вдоль направления прокатки. Облучение при температуре свыше 1000°C приводит к значительному изменению зеренной структуры, что обусловлено, вероятно, протеканием процесса рекристаллизации.

**Ключевые слова:** ферритно-мартенситные стали, дисперсионное упрочнение оксидами, нейтронное облучение, ЭП-450 ДУО

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-109-130

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wharry J. P., Swenson M. J., Yano K. H. A review of the irradiation evolution of dispersed oxide nanoparticles in the b.c.c. Fe–Cr system: Current understanding and future directions // J. Nucl. Mater. – 2017. – V. 486. – P. 11–20.

2. Allen T. R., Gan J., Cole J. I., Miller M. K., Busby J. T., Shutthanandan S., Thevuthasan S. Radiation response of a 9 chromium oxide dispersion strengthened steel to heavy ion irradiation // *J. Nucl. Mater.* – 2008. – V. 375, N 1. – P. 26–37.
3. Chen T., Gigax J. G., Price L., Chen D., Ukai S., Aydogan E., Maloy S. A., Garner F. A., Shao L. Temperature dependent dispersoid stability in ion-irradiated ferritic-martensitic dual-phase oxide-dispersion-strengthened alloy: Coherent interfaces vs. incoherent interfaces // *Acta Mater.* – 2016. – V. 116. – P. 29–42.
4. Auger M. A., Hoelzer D. T., Field K. G., Moody M. P. Nanoscale analysis of ion irradiated ODS 14YWT ferritic alloy // *J. Nucl. Mater.* – 2020. – V. 528.
5. Lescoat M.-L., Ribis J., Chen Y., Marquis E.A., Bordas E., Trocellier P., Serruys Y., Gentils A., Kaïtasov O., de Carlan Y., Legris A. Radiation-induced Ostwald ripening in oxide dispersion strengthened ferritic steels irradiated at high ion dose // *Acta Mater.* – 2014. – V. 78. – P. 328–340.
6. Ribis J., Bordas E., Trocellier P., Serruys Y., de Carlan Y., Legris A. Comparison of the neutron and ion irradiation response of nano-oxides in oxide dispersion strengthened materials // *J. Mater. Res.* – 2015. V. 30, N 14. – P. 2210–2221.
7. Certain A., Kuchibhatla S., Shutthanandan V., Hoelzer D.T., Allen T.R. Radiation stability of nanoclusters in nano-structured oxide dispersion strengthened (ODS) steels // *J. Nucl. Mater.* – 2013. – V. 434, N 1–3. – P. 311–321.
8. Ukai S., Ohtsuka S., Kaito T., de Carlan Y., Ribis J., Malaplate J. Oxide dispersion-strengthened/ferrite-martensite steels as core materials for Generation IV nuclear reactors // *Struct. Mater. Gener. IV Nucl. React.* Elsevier Ltd, 2017. – P. 357–414 p.
9. Klueh R. L., Shingledecker J. P., Swindeman R. W., Hoelzer D. T. Oxide dispersion-strengthened steels: A comparison of some commercial and experimental alloys // *J. Nucl. Mater.* – 2005. – V. 341. – N 2–3. – P. 103–114.
10. International Atomic Energy Agency. Structural Materials for Liquid Metal Cooled Fast Reactor Fuel Assemblies – Operational Behaviour STI/PUB/1548 // IAEA Nucl. Energy Ser. Vienna, 2012. – 103 p.
11. Nikitina A. A., Ageev V. S., Chukanov A. P., Tsvelev V. V., Porezanov N. P., Kruglov O. A. R&D of ferritic-martensitic steel EP450 ODS for fuel pin claddings of prospective fast reactors // *J. Nucl. Mater.* Elsevier B.V. – 2012. – V. 428, N 1–3. – P. 117–124.
12. Никитина А. А., Агеев В. С., Леонтьева-Смирнова М. В., Митрофанова Н. М., Науменко И. А., Целищев А. В., Чернов В. М. Развитие работ по конструкционным материалам активных зон быстрых реакторов // *Атомная Энергия.* – 2015. – V. 119, N 5. – P. 243–249.
13. Gurovich B. A., Frolov A. S., Kuleshova E. A., Maltsev D. A., Safonov D. V., Fedotova S. V., Kochkin V. N., Panferov P. P. Structural evolution features of the 42XNM alloy during neutron irradiation under VVER conditions // *J. Nucl. Mater.* – 2021. – V. 543. – P. 152557.
14. Miller M. K., Forbes R. G. *Atom-Probe Tomography.* Boston, MA: Springer US, 2014.
15. Marquis E. A., Hyde J. M. Applications of atom-probe tomography to the characterisation of solute behaviours // *Mater. Sci. Eng. R Reports.* Elsevier B.V. – 2010. – V. 69, N 4–5. – P. 37–62.
16. Menut D., Béchade J.-L., Cammelli S., Schlutig S., Sitaud B., Solari P. L. Synchrotron radiation investigations of microstructural evolutions of ODS steels and Zr-based alloys irradiated in nuclear reactors // *J. Mater. Res.* – 2015. – V. 30, N 9. – P. 1392–1402.
17. Ribis J. Structural and chemical matrix evolution following neutron irradiation in a MA957 oxide dispersion strengthened material // *J. Nucl. Mater.* Elsevier B.V. – 2013. – V. 434, N 1–3. – P. 178–188.
18. Rogozhkin S. V., Aleev A. A., Zaluzhnyi A. G., Nikitin A. A., Iskandarov N. A., Vladimirov P., Lindau R., Möslang A. Atom probe characterization of nano-scaled features in irradiated ODS Eurofer steel // *J. Nucl. Mater.* Elsevier B.V. – 2011. – V. 409, N 2. – P. 94–99.

19. Lescoat M.-L., Ribis J., Gentils A., Kaïtasov O., de Carlan Y., Legris A. In situ TEM study of the stability of nano-oxides in ODS steels under ion-irradiation // J. Nucl. Mater. – 2012. – V. 428, N 1–3. – P. 176–182.
20. Swenson M. J., Wharry J. P. The comparison of microstructure and nanocluster evolution in proton and neutron irradiated Fe–9%Cr ODS steel to 3 dpa at 500 °C // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 467. – P. 97–112.
21. Swenson M. J., Dolph C. K., Wharry J. P. The effects of oxide evolution on mechanical properties in proton- and neutron-irradiated Fe–9%Cr ODS steel // J. Nucl. Mater. Elsevier B.V. – 2016. – V. 479. – P. 426–435.
22. Monnet I., Dubuisson P., Serruys Y., Ruault M.O., Kaïtasov O., Jouffrey B. Microstructural investigation of the stability under irradiation of oxide dispersion strengthened ferritic steels // J. Nucl. Mater. 2004. – V. 335, N 3. – P. 311–321.
23. Akasaka N., Yamashita S., Yoshitake T., Ukai S., Kimura A. Microstructural changes of neutron irradiated ODS ferritic and martensitic steels // J. Nucl. Mater. – 2004. – V. 329–333. – P. 1053–1056.
24. Miller M. K., Hoelzer D. T. Effect of neutron irradiation on nanoclusters in MA957 ferritic alloys // J. Nucl. Mater. – 2011. – V. 418, N 1–3. – P. 307–310.
25. Kuksenko V., Pareige C., Genevois C., Cuvilly F., Roussel M., Pareige P. Effect of neutron-irradiation on the microstructure of a Fe–12at.%Cr alloy // J. Nucl. Mater. – 2011. – V. 415, N 1. – P. 61–66.
26. Bachhav M., Robert Odette G., Marquis E.A.  $\alpha'$  precipitation in neutron-irradiated Fe–Cr alloys // Scr. Mater. – 2014. – V. 74. – P. 48–51.
27. Bachhav M., Robert Odette G., Marquis E. A. Microstructural changes in a neutron-irradiated Fe–15 at.%Cr alloy // J. Nucl. Mater. – 2014. – V. 454, N 1–3. – P. 381–386.
28. Rogozhkin S. V., Iskandarov N. A., Aleev A. A., Zaluzhnyi A. G., Kuibida R. P., Kulevoi T. V., Chalykh B. B., Leontieva-Smirnova M. V., Mozhanov E.M. Investigation of the influence of irradiation with Fe ions on the nanostructure of ferritic martensitic steel EK-181 // Inorg. Mater. Appl. Res. – 2013. – V. 4, N 5. – P. 426–430.
29. Styman P. D., Hyde J. M., Wilford K., Parfitt D., Riddle N., Smith G. D. W. Characterisation of interfacial segregation to Cu-enriched precipitates in two thermally aged reactor pressure vessel steel welds // Ultramicroscopy. – 2015. – V. 159. – P. 292–298.

УДК 621.039.534:669.15'26-194:620.193

## **КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ 12%-НОЙ ХРОМИСТОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАРОГЕНЕРАТОРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

А. С. КУДРЯВЦЕВ, канд. техн. наук, С. А. СУВОРОВ, Д. А. АРТЕМЬЕВА,  
Р. М. РАМАЗАНОВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 27.01.2022

После доработки 28.06.2022

Принята к публикации 30.06.2022

Исследовано влияние водной среды и перегретого пара на коррозионную стойкость и сопротивление коррозионно-механическому разрушению стали марки 07X12НМФБ в различных режимах эксплуатации парогенератора перспективной реакторной установки большой мощности с натриевым теплоносителем. На основании проведенных исследований установлено, что сталь марки 07X12НМФБ отвечает требованиям эксплуатации теплообменных труб и корпусных элементов

прямоточных парогенераторов реакторной установки по показателям коррозионной стойкости и коррозионно-механической прочности.

*Ключевые слова:* хромистая сталь, парогенератор реакторной установки, натриевый теплоноситель, коррозионная стойкость, сопротивление коррозионно-механическому разрушению.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-131-147

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Блохина А. Н., Лякишев С. Л., Соломатина В. А. Перспективный корпусной парогенератор для энергоблока на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2012. – № 31. – С. 5–14.
2. Денисов В. В., Карсонов В. И., Трунов Н. Б. Конструкция, эксплуатация и продление ресурса парогенераторов энергоблока БН-600 // Атомная энергия. – 2005. – № 6. – С. 481–488.
3. Горынин И. В., Карзов Г. П., Марков В. Г., Трапезников Ю. М., Гришмановская Р. Н., Ананьева М. А., Бережко Б. И., Терещенко А. Г. Материалы и технологии, обеспечивающие работоспособность оборудования АЭУ с жидкометаллическими теплоносителями // Вопросы материаловедения. – 1999. – № 3 (20). – С. 85–105.
4. Артемьева Д. А., Карзов Г. П., Кудрявцев А. С., Марков В. Г., Суворов С. А., Брыков С. И., Денисов В. В., Королев С. Ю., Метальников М. С. Выбор конструкционного материала для парогенератора по критериям обеспечения коррозионной стойкости в различных условиях эксплуатации натриевого реактора большой мощности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2014. – Вып. 34: Материалы и технология изготовления оборудования РУ. – С. 53–59.
5. Sumitomo Metal Industries Ltd., Seam Oxidation on Cr–Mo–Steel Tubes, Paper N 805, 1443A, 1989.
6. Kimura K., Yamaoka S. Influence of high pressure normalizing heat treatment on microstructure and creep strength of high Cr steels // Materials Science and Engineering A. – 2004. – V. 387–389. – P. 628–632.
7. Kimura K., Sawada K., Kushima H., Toda Y. Influence of Chemical Composition and Heat Treatment on Long-term Creep Strength of Grade 91 Steel // Procedia Engineering. – 2013. – V. 55. – P. 2–9.
8. Коррозионная стойкость реакторных материалов: Справочник / Под ред. В. В. Герасимова. – М.: Атомиздат, 1976. – 512 с.
9. Патент RU 2543583 C2 Жаропрочная коррозионностойкая сталь.
10. Garsney R. Corrosion and requirement for feed and boiler water chemical control in nuclear steam generators. Water chemistry of nuclear reactor systems. – London: PNES, 1978.
11. Мамет В. А., Мартынова О. И. Процессы «хайд-аут» (местного концентрирования) примесей котловой воды парогенераторов АЭС и их влияние на надежность работы оборудования // Теплоэнергетика. – 1993. – № 7. – С. 2–7.
12. Карзов Г. П., Суворов С. А., Федорова В. А., Филиппов А. В., Трунов Н. Б., Попадчук В. С., Жуков Р. Ю. Оценка динамики зарождения и развития повреждений теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ-1000 в рабочих режимах // Сборник трудов 7-го международного семинара по горизонтальным парогенераторам. ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, 2006.
13. Карзов Г. П., Суворов С. А., Блюмин А. А., Васильев Н. В., Попадчук В. С., Жуков Р. Ю., Брыков С. И. Роль низкотемпературной коррозии в повреждаемости теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ. Зарождение питтингов и развитие трещин КР в среде питтингов в стояночных, предпусковых и пусковых режимах эксплуатации // Сб. трудов 10-й международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, производстве и эксплуатации оборудования атомных электростанций», ЦНИИ КМ «Прометей», СПб., 2008.



14. ОСТ 108-901-01–79. Металлы. Методы испытаний на коррозионное растрескивание применительно к атомной и тепловой энергетике.
15. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: Учеб. для вузов. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 1–400.
16. ГОСТ Р 59115.4–2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Длительные механические свойства конструкционных материалов. – М.: Российский институт стандартизации, 2021.
17. Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов: Учеб. для вузов. Изд. 10-е. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 592 с.
18. Zhang N., Zhu Z., Xua H., Mao X., Li J. Oxidation of ferritic and ferritic–martensitic steels in flowing and static supercritical water // Corrosion Science. – 2016. – V. 103. – P. 124–131.
19. Liu C., Shen T., Yao C., Chang H., Wei K., Niu L., Ma Z., Wang Z. Corrosion behavior of ferritic–martensitic steels SIMP and T91 in fast-flowing steam // Corrosion Science. – 2021. – V. 187.
20. Cabet C., Dalle F., Gaganidze E., Henry J., Tanigawa H. Ferritic-martensitic steels for fission and fusion application // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – V. 523. – P. 510–537.
21. Wright I. G., Dooley R. B. A review of the oxidation behaviour of structural alloys in steam // International Materials Reviews. – 2010. – V. 55, N 3. – P. 129–167.
22. Lin L. F., Cragnolino G., Szklarska-Smialovska Z., Macdonald D. D. Stress Corrosion Cracking of Sensitized Type 304 Stainless Steel in High Temperature Chloride Solutions, Corrosion. – 1981. – V. 37, N 11. – P. 616–627.
23. Ford F. P., Povich M. J. The Effect of Oxygen Temperature Combinations on the Stress Corrosion Susceptibility of Sensitized Type 304 Stainless Steel in High Purity Water, Corrosion. – 1979. – V. 35, N 12. – P. 569–574.
24. Карзов Г. П., Кудрявцев А. С., Марков В. Г., Гришмановская Р. Н., Трапезников Ю. М., Ананьева М. А. Разработка конструкционных материалов для атомных энергетических установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 2 (82). – С. 23–33.

УДК 621.039.54

#### **ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ДИСПЕРСИОННОГО ТОПЛИВА МЕТМЕТ ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ**

Л. А. КАРПЮК<sup>1</sup>, канд. хим. наук, А. М. САВЧЕНКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Ю. В. КОНОВАЛОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Г. В. КУЛАКОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, С. В. МАРАНЧАК<sup>1</sup>,  
С. А. ЕРШОВ<sup>1</sup>, Е. В. МАЙНИКОВ<sup>1</sup>, А. В. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
А. Л. ИЖУТОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, В. Ю. ШИШИН<sup>2</sup>, канд. техн. наук, А. А. ШЕЛЬДЯКОВ<sup>2</sup>,  
В. В. ЯКОВЛЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара (АО «ВНИИНМ»), 123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а, E-mail: sav-alex111@mail.ru*

<sup>2</sup> *Государственный научный центр «Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»), 433510, Ульяновская область, г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9*

Поступила в редакцию 14.07.2022

После доработки 3.08.2022

Принята к публикации 8.08.2022

Рассмотрено поведение под облучением топливной композиции МЕТМЕТ, представляющей собой частицы уран-молибденового сплава в матрице из циркониевых сплавов. Материаловедческие послереакторные испытания подтвердили удовлетворительную работоспособность опытной партии твэлов, облученных в реакторе МИР до выгорания 61 МВт·сут/кг U при значительных теп-

ловых нагрузках. Можно отметить структурную стабильность топливной композиции под облучением, хорошую совместимость компонентов твэла между собой. Твэлы с топливной композицией МЕТМЕТ перспективны для использования в реакторных установках плавучих энергоблоков и атомных станций малой мощности, а также в качестве толерантного топлива.

*Ключевые слова:* атомная энергетика, тепловыделяющий элемент, циркониевые сплавы, уран-молибденовый сплав, реактор МИР

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-111-3-148-155

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Савченко А. М., Коновалов Ю. В., Лаушкин А. В., Кулаков Г. В. Циркониевые сплавы с пониженной температурой плавления // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 2 (94). – С. 209–216.

2. Беляев В. М., Большухин М. А., Пахомов А. Н., Хизбуллин А. М., Лепехин А. Н., Полуничев В. И., Вешняков В. М., Соколов А. Н., Турусов А. Ю. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129, вып. 1. – С. 37–43.

3. Ижутов А. Л., Шишин В. Ю., Шельдяков А. А., Яковлев В. В., Кулаков Г. В., Коновалов Ю. В., Савченко А. М. Поведение под облучением дисперсионного топлива с матрицами из циркониевых сплавов // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – 2020. – Вып. 4. – С. 19–31.

4. Савченко А. М., Коновалов Ю. В., Кулаков Г. В., Маранчак С. В., Ершов С. А., Майников Е. В., Козлов А. В., Шишин В. Ю., Шельдяков А. А., Яковлев В. В. Испытания дисперсионных твэлов с жаропрочным сердечником с регулируемой пористостью для атомных станций малой мощности // Атомная энергия. – 2021. – Т. 131, вып. 6. – С. 324–327.

5. Zinkle S. J., Terrani K. A., Gehin J. C., Ott L. J., Snead L. L. Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – V. 448. – P. 374–379.