

80 лет на передовых рубежах материаловедения ..... 8

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

Яковлева Е. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние режимов старения на механизм разрушения низколегированных сталей с различной структурой ..... 11

Миллюц В. Г., Цуканов В. В., Павлова А. Г., Смирнова Д. Л. Исследование качества высокопрочной судостроительной стали с высокой концентрацией кальция ..... 20

Кашапов О. С., Павлова Т. В., Калашников В. С., Попов И. П. О влиянии добавок углерода на механические свойства титанового псевдо- $\alpha$ -сплава ..... 27

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Беляков А. Н., Быстров Р. Ю., Геращенко Д. А., Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Макаров А. М., Прудников И. С., Фармаковский Б. В. Сплав системы Co–Cr–Si–B на основе кобальта для нанесения защитных покрытий ..... 39

Коркина М. А., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В., Васильева О. В., Кузнецов П. А., Геращенко Е. Ю. Получение композиционного порошка магнитомягкого материала системы ферромагнетик – диамагнетик ..... 44

Скворцова А. Н., Бобкова Т. И., Фармаковский Б. В., Климов В. Н., Дмитрюк А. И. Композиционный сплав на основе системы Co–Cr–Si–Zr–TiB<sub>2</sub>–BN для получения композитных порошков и функциональных покрытий на их основе ..... 50

Фармаковский Б. В., Соколова Н. А., Бобкова Т. И. Композиционный сплав на основе кобальта для нанесения функциональных покрытий методом гетерофазного переноса ..... 57

Дмитрюк А. И., Фармаковский Б. В., Бобкова Т. И., Геращенко Д. А. Восстановление и ремонт деталей узлов машин с помощью сверхзвукового холодного газодинамического и микроплазменного напыления ..... 64

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Подколызина Л. В., Яковлев С. Н., Черныш А. А. Экспериментальное определение модуля внутреннего трения полиуретановых эластомеров при знакопеременном изгибе с вращением... 71

Могнонов Д. М., Аюрова О. Ж., Ильина О. В., Корнопольцев В. Н., Мангадаев А. М. Термические характеристики и физико-механические свойства полиимидатов ..... 79

Железина Г. Ф., Бова В. Г., Войнов С. И., Кан А. Ч. Перспективы использования гибридных тканей на основе углеродных и арамидных волокон в качестве армирующего наполнителя полимерных композиционных материалов ..... 86

Нагорная М. Н., Мышлявцев А. В., Стрижак Е. А. Влияние окисленного технического углерода на поверхностную энергию резин ..... 96

**КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ**

Бутусова Е. Н., Мишакин В. В. Исследование влияния старения на зарождение трещин коррозионного растрескивания под напряжением малоуглеродистой стали ..... 102

Миронович Л. М., Елисеев А. Ю., Елисеева А. Ю. Удаление продуктов коррозии с поверхности элементов теплообменного оборудования из латуни растворами кислот ..... 110

Степанов В. В., Каштанов А. Д., Щуцкий С. Ю., Агринский А. Н., Симонов Н. И. Исследование коррозионных свойств керамических материалов для пар трения насоса в среде свинец – висмут ..... 116

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

Евстифеева В. В., Литовченко В. Н., Мишакин В. В., Воробьев Р. А. Оценка трещиностойкости конструкционной стали 38ХНЗМФА-Ш по характеристикам изломов и значениям скоростей упругих волн ..... 123

Филин В. Ю. Контроль качества сталей для крупногабаритных сварных конструкций арктического шельфа. Применение российских и зарубежных требований ..... 136

## РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Марголин Б. З., Сорокин А. А., Пирогова Н. Е., Потапова В. А., Aki Toivonen, Faiza Sefta, Cédric Rokog. Модель коррозионного растрескивания облученных аустенитных сталей. Часть 1. Анализ механизмов повреждения и формулировка определяющих уравнений ..... 154

Марголин Б. З., Сорокин А. А., Пирогова Н. Е., Потапова В. А., Aki Toivonen, Faiza Sefta, Cédric Rokog. Модель коррозионного растрескивания облученных аустенитных сталей. Часть 2. Определение параметров модели и ее верификация ..... 178

Смирнов В. И., Минкин А. И., Марголин Б. З., Кохонов В. И. Методические особенности исследования кинетики роста коротких и длинных усталостных трещин в облученных реакторных материалах на малоразмерных образцах. Часть 1. Постановка задачи. Исследование влияния остроты исходного надреза на кинетические диаграммы роста усталостных трещин в образцах ..... 191

## ХРОНИКА

К 90-летию выдающегося ученого-кораблестроителя Олега Марковича Паля ..... 205

**Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов** ..... 211

УДК 669.15–194.2:539.377

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СТАРЕНИЯ НА МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

Е. А. ЯКОВЛЕВА, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р 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 14.03.2019

После доработки 18.04.2019

Принята к публикации 23.04.2019

Низколегированные судостроительные и трубные стали в настоящее время поставляются после термомеханической обработки, при которой в зависимости от легирования формируется ферритно-перлитная или ферритно-бейнитная структура. В процессе термомеханической обработки в стали создается и затем при охлаждении фиксируется большое количество дефектов, что делает кристаллическую структуру неравновесной и приводит к неравномерному распределению атомов углерода и азота. Существует вероятность деградации свойств стали с неравновесной структурой при технологических обработках (холодной правке, гибке, сварке), в процессе эксплуатации или длительного хранения. Выполнены исследования влияния режимов деформационного старения на механизм разрушения стали и поиск путей предотвращения охрупчивания вследствие старения.

*Ключевые слова:* низколегированная сталь, термомеханическая обработка, естественное и искусственное старение, отпуск, ферритно-бейнитная структура, ферритно-перлитная структура.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пышминцев И. Ю., Смирнов М. А., Варнак О. В., Мальцева А. Н., Гойхенберг Ю. Н. Исследование деформационного старения низкоуглеродистых трубных сталей // *Металлург.* – № 12. – 2017. – С. 51–59.

2. Chen J. K. Aging behavior in hot-rolled low carbon steels // *Steel research international.* – 2008. – V. 79, N 9. – P. 708–712.

3. Смирнов М. А., Пышминцев И. Ю., Варнак О. В., Мальцев А. Н. Влияние структуры на деформационное старение низкоуглеродистой стали // *Деформация и разрушение материалов.* – 2014. – № 8. – С. 9–15.

4. Филиппов Г. А., Зикеев В. Н., Шабалов И. П., Ливанов О. В., Мишетьян А. Р. Влияние длительной эксплуатации на температурную зависимость внутреннего трения и склонность к деформационному старению низколегированных сталей // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* – 2017. – № 1. – С. 49–55.

5. ГОСТ Р 52927–2017. Прокат для судостроительной стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2015. – С. 93.

6. ГОСТ ISO 3183–2015. Трубы стальные для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности. – М.: Стандартиформ, 2015 – С. 148.

УДК 669.14.018.293:669.049.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВЫСОКОПРОЧНОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ КАЛЬЦИЯ

В. Г. МИЛЮЦ<sup>1</sup>, В. В. ЦУКАНОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. Г. ПАВЛОВА<sup>2</sup>, Д. Л. СМИРНОВА<sup>1</sup>.

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

<sup>2</sup>ООО «ОМЗ-Спецсталь», 196650, Санкт-Петербург, Колпино, Ижорский завод, д. б/н, E-mail: [specsteel@omzglobal.com](mailto:specsteel@omzglobal.com)

Поступила в редакцию 11.04.2019

После доработки 23.04.2019

Принята к публикации 24.04.2019

Исследована микроструктура, определены наличие и качественный состав неметаллических включений, проведены механические испытания проката промышленной плавки высокопрочной судостроительной стали с концентрацией кальция в ковшевой пробе 0,009%. В связи с тем, что сталь с высокой концентрацией кальция загрязнена множеством оксидных строчечных включений, резко снижаются механические свойства проката (ударная вязкость, пластичность в Z-направлении, качество излома технологических проб). Для обеспечения высокой чистоты высокопрочной судостроительной стали по неметаллическим включениям необходимо соблюдать строго регламентированную технологию раскисления алюминием и модифицирования феррокальцием с получением содержания этих элементов в металле в рекомендованных ранее пределах – 0,01–0,02 и 0,002–0,004% соответственно.

*Ключевые слова:* высокопрочная судостроительная сталь, содержание кальция, неметаллические включения, механические свойства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дюдкин А. А., Банев С. Ю., Гринберг С. Е., Кисиленко В. В., Онищук В. П. Внепечная обработка расплава порошковыми проволоками. – Донецк: ООО «Юго-Восток», 2002. – 296 с.
2. Голубцов В. А., Теория и практика введения добавок в сталь вне печи. – Челябинск, 2006. – 423 с.
3. Казаков А. А., Ковалев П. В, Рябощук С. В. Металлургическая экспертиза как основа определения природы дефектов металлопродукции // Черные металлы. – 2007. – Июль–август. – С. 17–23.
4. Ицкович Г. М. Формирование неметаллических включений в стали, раскисленной алюминием и кальцийсодержащими сплавами // Сталь и неметаллические включения. – 1976. – № 1. – С. 134–184.
5. Гольдштейн Я. Е., Мизин В. Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
6. Олетт М., Гателье К. Влияние добавок кальция, магния или РЗМ на чистоту стали // Чистая сталь: Сб. научн. тр. / Пер.с англ. – М.: Металлургия, 1987. – С. 128–143.
7. Голубцов В. А., Лунев В. В. Модифицирование стали для отливок и слитков. – Челябинск – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 356 с.
8. Милюц В. Г., Малахов Н. В., Владимиров Н. Ф., Батов Ю. М. Влияние алюминия и кальция на пластичность толстолистовой судостроительной стали в Z-направлении // Металлург. – 2011. – № 2. – С. 58–60.
9. Милюц В. Г., Цуканов В. В., Петров С. Н., Ефимов С. В. Повышение чистоты корпусной стали, обработанной комплексными модификаторами // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3(87). – С. 14–22.

## О ВЛИЯНИИ ДОБАВОК УГЛЕРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО ПСЕВДО- $\alpha$ -СПЛАВА

О. С. КАШАПОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Т. В. ПАВЛОВА<sup>1</sup>, В. С. КАЛАШНИКОВ<sup>1</sup>;  
И. П. ПОПОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»  
(ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева» (Самарский университет), 443086, Самара, ул. Академика Павлова, 1

Поступила в редакцию 26.03.2019

После доработки 3.04.2019

Принята к публикации 5.04.2019

Исследовано влияние углерода в пределах от 0,008 до 0,18 мас. % на температуру полного полиморфного превращения, микроструктуру и механические свойства титанового псевдо- $\alpha$ -сплава системы Ti–6,2Al–Sn–Zr–(2,19–3,53) Mo<sup>eq</sup>–(0,18–0,28) Si–(0,008–0,18)C. Введение углерода в сплав можно осуществить с использованием титановой губки марки ТГУ или промышленных лигатур АМНТУ и АВТУ. Исследования, проведенные на поковках с глобулярно-пластинчатой микроструктурой шести опытных плавок, позволили установить оптимальный уровень легирования сплава углеродом. При введении углерода в пределах растворимости в  $\alpha$ -твердом растворе (до 0,08 мас. %) повышается жаропрочность материала, однако большего эффекта можно достичь при увеличении содержания кремния. Влияние углерода в пределах растворимости на кратковременную прочность титанового псевдо- $\alpha$ -сплава при комнатной температуре незначительно, а влияние углерода на ударную вязкость отрицательное. Для выбранного уровня легирования углеродом при прочности  $\sigma_b^{20} = 1165–1180$  МПа ударная вязкость остается на приемлемом уровне – KCU = 330–381 кДж/м<sup>2</sup>. Допускается проведение горячей деформации сплавов исследованной системы в процессе свободнойковки на молоте при относительно низких температурах двухфазной области.

*Ключевые слова:* жаропрочные титановые сплавы, температура полиморфного превращения, микроструктура, кратковременная прочность, длительная прочность

### ЛИТЕРАТУРА

1. Wang Q., Liu J., Yang R. High temperature titanium alloys: status and perspective // Journal of aeronautical materials. China. – 2014. – V. 34, N 4. – P. 1–26.
2. Wang M., Zhang D., Zhao Y. The dislocation creep behavior of titanium alloys // Journal of Advanced Materials. – January 2007. – Special Edition N 2. – P. 56–60.
3. Hang S., Wang B., Liu Z., Gao Yu., Yang R. Effect of carbon on microstructures and mechanical properties of Ti–60 high-temperature titanium alloy // Chinese journal of materials research. – August 2007. – V. 21, N 4. – P. 433–438.
4. Duan R., Zhang H., Cai J., Huang X., Cao C. Effect of microstructure on creep deformation behavior of near-alpha titanium alloy TG6 // The Chinese Journal of Nonferrous Metals. – October 2010. – V. 20 [Special 1]. – P. 12–15.
5. Zhu S., Wang Q., Liu J., Liu Y., Yang R. Effect of Ta on oxidation resistance behavior of Ti–60A titanium alloys // The Chinese Journal of Nonferrous Metals. – October 2010. – V. 20 [Special 1]. – P. 138–143.
6. Wei S., Shi W., Wang D., Wang Q., Chen Z., Liu J. Microstructure and mechanical properties of high temperature titanium alloy Ti60 at 600° // The Chinese Journal of Nonferrous Metals. – October 2010. – V. 20 [Special 1]. – P. 801–806.
7. Guo P., Hong Q., Zhao Y., Qi Yu., Xin S., Liu W. Mechanical properties of Ti600 high temperature titanium alloy // The Chinese Journal of Nonferrous Metals. – October 2010. – V. 20 [Special 1]. – P. 36–39.

8. Zhanga S. Z., Lia M. M., Yang R. Mechanism and kinetics of carbide dissolution in near alpha Ti–5.6Al–4.8Sn–2Zr–1Mo–0.35Si–0.7Nd titanium alloy // *Materials characterization*. – 2011. – N 62. – P. 1151–1157. DOI:10.1016/j.matchar.2011.10.001.
9. Zhang S., Gao Y., Liu Z., Liu Yu., Yang R. Microstructural Evolution of Ti–5.6Al–4.8Sn–2Zr–1Mo–0.35Si–0.7Nd Titanium Alloy with Carbon Additions // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2006. – V. 22, N 5. – P. 616–620
10. Fu B., Wang H., Zou Ch., Wei Z. Microstructural characterization of in situ synthesized TiB in cast Ti 1100–0.10B alloy // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. – 2015. – N 25. – P. 2206–2213. DOI: 10.1016/S10036326(15)63833X.
11. Prasad K., Sarkar R., Kamat S. V., Nandy T. K. Fracture toughness and low cycle fatigue behaviour in boron modified Timetal 834 titanium alloy // *Materials Science and Engineering. A529*. – 2011. P. 74–80. DOI:10.1016/j.msea.2011.08.062.
12. Gaddam R. Effect of Boron and Hydrogen on Microstructure and Mechanical // *Engineering Materials Division of Materials Science Department of Engineering Sciences and Mathematics Luleå University of Technology*. – 2011. – 92 p.
13. Rhee S., Nam S., Hagiwara M. Effect of TiBp particle reinforcement on the creep resistance of near titanium  $\alpha$ -alloy made by blended elemental powder metallurgy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2003. – V. 359. – P. 186–192. DOI:10.1016/S0925-8388(03)00219-6.
14. Гайсин Р. А., Имаев В. М., Гайсина Э. Р., Шаймарданов Р. А., Имаев Р. М. О необычно высокой прочности двухфазного титанового сплава на основе ВТ8, высоколегированного цирконием // *Письма о материалах*. – 2016. – Т. 6, № 4. – С. 327–332.
15. Горынин И. В., Кудрявцев А. С., Хачатурян А. Г., Пузаков И. Ю., Береславский А. Л., Мачишина Л. А., Ледер М. О., Корнилова М. А. Опыт изготовления слитков массой до 17 т из титановых псевдо-альфа-сплавов // *Титан*. – 2013. – № 2. – С. 23–28.
16. Кудрявцев А. С., Козлова И. Р., Иванова Л. А., Чудаков Е. В. Материаловедческое обеспечение производства цельнокатаных колец из свариваемых высокопрочных титановых сплавов для деталей энергомашиностроения // *Титан*. – 2013. – № 2. – С. 29–34.
17. Солонина О. П., Улякова Н. М. Влияние углерода на механические свойства и структуру титановых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1974. – № 4. – С. 28–30.
18. Кашапов О. С., Павлова Т. В., Калашников В. С., Заводов А. В. Влияние условий охлаждения крупных промышленных поковок из жаропрочного титанового сплава ВТ41 на фазовый состав и механические свойства // *Цветные металлы*. – 2018. – № 2. – С. 76–82.
19. Каблов Е. Н., Кашапов О. С., Павлова Т. В., Ночовная Н. А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо-альфа-титанового сплава ВТ41 // *Титан*. – 2016. – № 2 (52) . – С. 33–42.
20. Banoth R., Sarkar R., Bhattacharjee A., Nandy T. K., Nageswara Rao G.V.S. Effect of boron and carbon addition on microstructure and mechanical properties of metastable beta titanium alloys // *Materials and Design*. – 2015. – N 67. – P. 50–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.004>.
21. Szkliniarz A. Microstructure and Properties of Beta 21S Alloy with 0.2 wt. % of Carbon // *Solid State Phenomena*. – 2009. – V. 246. – P. 19–24. Doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.246.19.
22. Chen Z. Q., Hu D., Loretto M. H., Wu X. Effect of carbon additions on microstructure and mechanical properties of Ti–15–3 // *Materials Science and Technology*. – 2004. – V. 20. – P. 343–349. DOI 10.1179/026708304225012288.
23. Давыденко Л. В., Егорова Ю. Б., Чибисова Е. В. Статистическое сопоставление механических свойств титановых сплавов разных классов // *Материалы 77-й междунар. науч.-технич. конф. ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров» // Известия МГТУ МАМИ*. – 2013. – Т. 2, № 1 (15). – С. 35–38



24. Каблов Д. Е., Панин П. В., Ширяев А. А., Ночовная Н. А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № 2 (31). – С. 27–33. – DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.

25. Попов А. А., Попова М. А. Изотермические диаграммы выделения силицидных и алюминидных фаз в жаропрочных титановых сплавах // *МиТОМ*. – 2016. – № 11. – С. 23–28.

26. Tensile and Fatigue Properties of Carbon-Solute-Strengthened ( $\alpha+\beta$ )-Type Titanium Alloy / M. Nakai<sup>1</sup>, M. Niinomi<sup>1</sup>, Ju. Hieda<sup>1</sup>, а. о. // *Materials Transactions*. – 2013. – V. 54, N 2. – P. 169–175.

27. Savage K. Effect of Carbon on Primary Alpha Percentage in Ti–6Al–4V as Temperature Approaches the Beta Transus. – USA: California Polytechnic State University, 2013. – 30 p.

28. Neal D. F. Development and evolution of high temperature titanium alloy IMI 834 // *Sixth world conference on titanium*. France. – 1988. – P. 253–259.

29. Sun F., Li J., Kou H., Tang B., Chang H., Cai J., Zhou L. Alfa phase solution kinetics and solution microstructure characteristics of Ti60 titanium alloy // *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*. – October 2010. – V.20 [Special 1]. – P. 437–441.

30. Zhang J., Peng N., Wang Q., Wang X.. A New Aging Treatment Way for Near alpha High Temperature Titanium Alloys // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2009. – V. 25, N 4. – P. 454–458.

31. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 7–17.

УДК 621.762.222:669.255:621.793.7

### СПЛАВ СИСТЕМЫ Co–Cr–Si–В НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

А. Н. БЕЛЯКОВ, Р. Ю. БЫСТРОВ, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук,  
Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, А. М. МАКАРОВ, И. С. ПРУДНИКОВ,  
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, 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 26.11.2018

После доработки 8.12.2018

Принята к публикации 18.12.2018

Приведены результаты исследования сплава системы Co–Cr–Si–В с целью получения порошковых материалов и функциональных покрытий на его основе. Показано, что при введении в сплав редкоземельных элементов – иттрия, лантана и церия образуются нанокристаллические выделения, существенно повышающие микротвердость покрытия.

*Ключевые слова:* редкоземельные элементы, микротвердость, функциональное покрытие, наноструктурированные выделения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дьячкова Л. Н., Керженцева Л. Ф. Диффузионное взаимодействие компонентов и структурообразование при спекании порошковых конструкционных и антифрикционных материалов // 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы / Под ред. А. Ф. Ильющенко и др. – Минск, 2010. – С. 230–259.

2. Дикусар А. И., Петренко В. И., Грабко Д. З., Харя Е. Е., Шикимака О. А. Механические свойства сплавов Со при импульсных режимах осаждения // Сб. трудов XIV международной научно-практической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века». – Донецк, 2009. –Т. 1 – С. 266–270.

3. Бурканова Е. Ю., Фармаковский Б. В. Высокоскоростной механосинтез с использованием дезинтеграторных установок для получения наноструктурированных порошковых материалов си-

стемы металл – керамика износостойкого класса // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 1 (69). – С. 80–85.

4. Bobkova T. I., Bystrov R. Y., Farmakovskiy B. V. Astachov A. G. Sinaisky M. A. Plasma Chemical Synthesis of Aluminum Oxide Nanopowders and Their Use as Reinforcing Components in Microplasma Sputtering of Coatings // Inorganic Materials: Applied Research. – 2015. – V. 6. – P. 591–594.

5. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков // Автореф. дис. ... канд. техн. наук, СПб., 2017. – 28 с.

6. Patent JPS60200937A. Co alloy for centrifugally coating inside of cylinder for plastic molding machine / Douya, Y., Komoto, H., Mishima, T., Morikawa, M., Sugizaki, K., 11.10.1985.

7. Геращенко Д. А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом «холодного» газодинамического напыления на основе армированных порошков системы Al–Sn + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Автореф. дис. ... канд. техн. наук, СПб., 2015.

УДК 621.762.222: 621.763:537.622

### ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКА МАГНИТОМЯГКОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ ФЕРРОМАГНЕТИК – ДИАМАГНЕТИК

М. А. КОРКИНА, Е. А. САМОДЕЛКИН, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук,  
О. В. ВАСИЛЬЕВА, канд. техн. наук, П. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА

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

Поступила в редакцию 3.12.2018

После доработки 8.12.2018

Принята к публикации 18.12.2018

Разработан способ получения порошкового материала системы ферромагнетик – диамагнетик, предназначенного для изготовления композиционных радиопоглощающих материалов и покрытий в диапазоне сверхвысоких частот. Композиционный порошковый материал с полимерной диамагнитной матрицей, армированной ферромагнитным нанокристаллическим упрочнителем, получают методом сверхскоростного механосинтеза. Разработанная технология сверхскоростного механосинтеза позволяет получать порошковую композицию, в которой каждая частица представляет собой единую механически связанную систему, одновременно обеспечивается снижение степени аморфности (не более 80%) за счет сохранения доли нанокристаллических выделений в аморфной матрице и соответственно повышение магнитной проницаемости (до 90 и более). Полученный таким образом композиционный порошок системы ферромагнетик – диамагнетик предназначен для получения радиопоглощающих материалов с высокой эффективностью экранирования и большим значением коэффициента поглощения (не менее 25 дБ) в диапазоне частот от 1 МГц до 40 ГГц.

*Ключевые слова:* сверхскоростной механосинтез, дезинтеграторная установка, магнитодиэлектрический порошок, композиционный порошок, радиопоглощающие композиты, степень аморфности, степень армирования

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В. Размышления с оптимизмом. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 567 с.

2. Петров В. М., Гагулин В. В. Радиопоглощающие материалы // Неорганические материалы. – 2001. – Т. 37. – № 2. – С. 135–141.

3. Патент СССР № 1560321 А1. Способ получения металлического порошка / Кузнецова Е. А., Фармаковский Б. В., Власов Е. В., Хинский А. П., Тараканова Т. А., Кипнис Б. М., Арро А. И., Кивиссон Т. О., Золотарев С. Н., Рытвин В. М. – Опубл. 30.04.1990 // Бюл. № 16.

4. Болдырев В. В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. – 2006. – Т. 75, № 3. – С. 203–216.

5. Патент RU 2427451 С2. Способ получения нанокристаллического магнитного порошка для создания широкополосных радиопоглощающих материалов / Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф.,

Самоделкин Е. А., Коркина М. А., Маренников Н. В., Галяткина Л. В., Бутусова Т. Ю., Песков Т. В. – Оуб. 27.08.2011 // Бюл. № 24.

6. Балабанов В. И. Нанотехнологии. Наука будущего. – М.: Изд-во Эксмо, 2009. – 256 с.

7. Потапов А. А. Атомно-молекулярная сборка на основе химической связи: природа и механизм формирования // Нанотехника. – 2010. – № 2 – С. 14–27.

УДК 621.793.7:621.762.222:621.763

### **КОМПОЗИЦИОННЫЙ СПЛАВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Co–Cr–Si–Zr–TiB<sub>2</sub>–BN ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПОРОШКОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ**

А. Н. СКВОРЦОВА, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук,  
В. Н. КЛИМОВ, А. И. ДМИТРИЮК

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

Поступила в редакцию 3.12.2018

После доработки 8.12.2018

Принята к публикации 18.12.2018

Приведены результаты исследований по получению композиционного наноструктурированного порошка из сплава системы Co–Cr–Si–Zr–TiB<sub>2</sub>–BN и функциональных покрытий на его основе с высокими показателями микротвердости и коррозионной стойкости.

*Ключевые слова:* композиционный порошок, адгезия, микротвердость, микроплазменное напыление, сверхзвуковое холодное газодинамическое напыление, механосинтез.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабрев В. А., Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск: Удмуртия, 2014. – 480 с.

2. Нанотехнологии, метрология стандартизация и сертификация в терминах и определениях / Под ред. М. В. Ковальчука, П. А. Тодуа. – М.: Техносфера, 2009.

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

4. Горынин И. В., Бурханов Г. С., Фармаковский Б. В. Перспективы разработок конструкционных материалов на основе тугоплавких металлов и соединений // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2 (70). – С. 5–17.

5. Алхимов А. П., Гулидов А. И., Косарев В. Ф., Нестерович Н. И. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, № 1. – С. 204–209.

6. Коровин А. Я., Хромов В. Н. Оборудование для сверхзвукового газопламенного напыления покрытий // Сб. научн. тр. РГАЗУ. – 2000. – С. 183–186.

7. Мелихов И. В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 134 с.

8. Меретуков М. А., Цепин М. А., Воробьев С. А., Сырков А. Г. Кластеры, структуры и материалы наноразмера: инновационные и технические перспективы / Под ред. И. Н. Белоглазова. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2005. – 128 с.

9. Орыщенко А. С., Загашвили Ю. В., Кулик В. И. Производство изделий из современных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными компонентами // Инновации. – 2007. – № 12. – С. 94–98.



10. Рудской А. И., Петрович С. Ю., Черепанов В. П., Гопиенко В. Г., Иваненко В. В. Быстрозакаленные материалы и покрытия // Материалы 6-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции в МАТИ – РГТУ им. К. Э. Циолковского «Производство и свойства быстроохлажденных порошковых сплавов на основе алюминия», М., 2007.
11. Гуткин М. Ю, Овидько И. А. Дефекты и механизмы пластичности в наноструктурных и некристаллических материалах. – СПб.: Янус, 2004. – 180 с.
12. Новые материалы. / Под ред. Ю. С. Карабасова. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
13. Новое в синергетике. Взгляд в третье тысячелетие: Сборник статей / Под ред. Г. Г. Малинецкого. – М.: Наука, 2002. – 232 с.
14. Gorynin I., Malyshevsky V., Farmakovskiy B. Projects of Federal State Unitary Enterprise Central Research Institute of Structural Materials «Prometey» in the Field of Structural Nanomaterials // Innovations and Nanotechnologies of Russia. – 2012. – N 1(2), from April. – P. 64–68.
15. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю. Исследование адгезионной прочности композиционных армированных покрытий системы металл – неметалл, полученных методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 103–117.
16. Бобкова Т. И., Соколова Н. А., Макаров А. М., Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В. Комбинированный метод получения композиционных порошковых материалов и функциональных покрытий на их основе // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 2 (94). – С. 81–87.
17. Скворцова А. Н., Лычева К. А., Возняковский А. А., Кольцова Т. С. Композиционные материалы на основе алюминия, упрочненные углеродными нановолокнами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – № 3(226). – С. 78–84.
18. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Машек И. И. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 1. – С. 87–96.
19. Tonitzki A., Skvortsova A. N., Koltsova T. S., Ganin V., Danilova M. A., Shamshurin A. I., Aluminum-carbon nanofibers composite coating produced by cold spraying // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. – 2016. – № 3 (249). – С. 81–88.

УДК 669.255:621.793.7

#### **КОМПОЗИЦИОННЫЙ СПЛАВ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ГЕТЕРОФАЗНОГО ПЕРЕНОСА**

Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук, Н. А. СОКОЛОВА, Т. И. БОБКОВА, 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 24.12.2018

После доработки 14.01.2019

Принята к публикации 16.01.2019

Разработан сплав на основе кобальта с содержанием 20–26%Co, 17,4–21,1%Cr, 2,6–4,9%Si, 3–5% Re, 4–6%Zr, 0,2–0,6%Ce, 0,1–0,5%La, 0,3–0,7%Y, 2–4%Al для нанесения защитных покрытий на элементы прецизионного машиностроения с адгезией 42–45 МПа, микротвердостью 3,6 ГПа, коррозионной стойкостью, соответствующей 1 классу, в диапазоне рабочих температур от –60 до 550°С.

*Ключевые слова:* композиционный сплав на основе кобальта, функциональные покрытия, метод гетерофазного переноса, элементы прецизионного машиностроения

## ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Отв. ред. Ж. И. Алферов, О. В. Белый, Г. В. Двас, Е. А. Иванова. – СПб: Изд-во ИП Пермяков С. А., 2015. – 543 с.
2. Мазеева А. К. Формирование стабильных магнитных свойств в аморфных и нанокристаллических сплавах кобальта и железа для защитных металлополимерных экранов на их основе // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017.
3. Патент РФ № 2273680. Аморфный магнитомягкий сплав на основе кобальта / Фармаковский Б. В., Орлова Я. В., Песков Т. В., Кузнецов П. А., Аскинази А. Ю. Оpubл. 12.08.2004.
4. Патент РФ № 2551037 от 03.09.2013 г. Способ получения износ- и коррозионно-стойкого градиентного покрытия / Бобкова Т. И., Прудников И. С., Васильев А. Ф., Фармаковская А. Я, Фармаковский Б. В.
5. Головин Ю. И. Введение в нанотехнику – М.: Машиностроение, 2007, 162 с.
6. Деффейс К., Деффейс С. Удивительные наноструктуры / Пер. с англ. / Под ред. Л. Н. Патрикеева. – М.: Бином. Лаборатория знаний. – 2006, 86 с.
7. Эрлих Г.В. Малые объекты – большие идеи. Широкий взгляд на нанотехнологии / Под ред. Патрикеева Л.Н. – М.: Бином. Лаборатория знаний. – 2017. – 254 с.

УДК 621.793.79

### **ВОССТАНОВЛЕНИЕ И РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ МАШИН С ПОМОЩЬЮ СВЕРХЗВУКОВОГО ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО И МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

А. И. ДМИТРИЮК, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук,  
Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, 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 20.12.2018

После доработки 14.01.2019

Принята к публикации 16.01.2019

Разработан технологический процесс восстановления и ремонта деталей и узлов машин методами сверхзвукового холодного газодинамического и микроплазменного напыления: для стальных изделий с использованием композиционного порошка на основе фехрала Fe–Cr–Al, поверхностно армированного частицами карбида вольфрама, а для изделий на основе никеля и титана – с использованием композиционного порошка из сплава системы Ni–Cr–Mn–Sn–Si–W–Re–(Ce, La, Y), поверхностно армированного нанопорошком из корунда. Достигнуты высокая твердость наносимого покрытия, коррозионная стойкость и износостойкость. Приведены конкретные примеры восстановления деталей и узлов с использованием предлагаемых порошковых материалов и технологий сверхзвукового холодного газодинамического и микроплазменного напыления.

*Ключевые слова:* метод сверхзвукового холодного газодинамического напыления, микроплазменное напыление, механосинтез, адгезия, твердость, коррозионная стойкость, износ

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бобкова Т. И., Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Климов В. Н. Особенности формирования износостойких покрытий, полученных с помощью микрометаллургического процесса высокоскоростной закалки из расплава // *Металлург.* – 2016. – № 10. – С. 91–97.
2. Псарев А. В., Смирнов В. В., Клубникин В. С. Микроплазменное напыление: общая схема, плазматрон, основы технологии // *Материалы межвузовской научной конференции «XXX юбилейная неделя науки».* Ч. VI, СПбГТУ.– 2002. – С. 61–67.
3. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. – М.: Физматлит, 2010. – 536 с.
4. Шолкин С. В., Юрков М. А. Создание управляемой наноструктуры, полученной методами газотермического напыления // *Вопросы материаловедения.* – 2010 – №2(62). – с. 68 – 74.

5. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабрев В. А., Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск: Удмуртия, 2014. – 480 с.
6. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017.
7. Елисеев А. А., Лукашин А. В. Функциональные наноматериалы/ Под ред. Ю.Д. Третьякова. – М.: Физматлит, 2010. – 324 с.
8. Иванова В. С. Введение в междисциплинарное наноматериаловедение. – М.: Сайнс-Пресс. 2005. – 132 с.
9. Патент РФ № 2561627. Сплав на основе системы никель–хром / Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Бобкова Т. И., Кузнецов П. А., Юрков М. А., Фармаковская А. Я., Низкая А. В., Ешметьева Е. Н., Масайло Д. В. Оpubл. 27.08.2015 // Бюлл. № 24.
10. Мэттьюз Ф., Ромингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. – М.: Техносфера, 2004. – 284 с.

УДК 678.074:539.67:620.178.322

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОМ ИЗГИБЕ С ВРАЩЕНИЕМ

Л. В. ПОДКОЛЬЗИНА<sup>1</sup>, канд. пед. наук, С. Н. ЯКОВЛЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
А. А. ЧЕРНЫШ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»  
(СПбГМТУ), 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3

Поступила в редакцию 09.10.2018

После доработки 25.03.2019

Принята к публикации 28.05.2019

С целью обоснованного выбора виброизоляционных материалов для изготовления амортизаторов проведены сравнительные испытания различных эластомеров по нескольким критериям. Представлены результаты сравнительных испытаний полиуретановых эластомеров трех торговых марок по двум параметрам. В качестве критериев оценки выбраны модуль внутреннего трения и тангенс угла потерь эластомерных материалов при знакопеременном изгибе с вращением. Отмечена высокая стабильность физико-механических свойств исследуемых полиуретановых эластомеров во всем диапазоне частот механических колебаний.

*Ключевые слова:* полиуретановый эластомер, амортизация, гашение колебаний, модуль внутреннего трения, тангенс угла потерь

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Li S. Effect of elastomer on flame retardancy, thermal degradation, and mechanical properties of intumescent flame-retardant polyethylene // Journal of Elastomers and Plastics. – 2011. – N 43. – P. 257–273.
2. Modesti M. Processing of ternary polymer blends based on polyvinyl chloride, thermoplastic polyester polyurethane and polyethylene–Co–acrylate–Co–Co. Part II: Physical and mechanical properties // Journal of Elastomers and Plastics. – 2000. – N 32. – P. 15–32.
3. Valero M. F. Polyurethane adhesive system from castor oil modified by a transesterification reaction // Journal of Elastomers and Plastics. – 2012. – N 44. – P. 433–442.
4. Khatua B. B. Elastomeric Blends of Polyurethane and Polychloroprene Elastomers (Sulfur Cure) with Reference to the Interchain Crosslinking Reaction // Journal of Elastomers and Plastics. – 2000. – V. 32, N 3 – P. 231–247.

5. Datta Ja. Influence of Glycols on the Glycolysis Process and the Structure and Properties of Polyurethane Elastomers // Journal of Elastomers and Plastics. – 2011. – N 43. – P. 529–541.
6. Zhang H. Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers // Journal of Elastomers and Plastics. – 2008. – N 40. – P. 161–177.
7. Jayasree T. K. Effect of Fillers on Mechanical Properties of Dinamically Crosslinked Styrene Butadiene Rubber/ High Density Polyethylene Blends // Journal of Elastomers and Plastics. – 2008. – N 40. – P. 127–146.
8. Ляпунов В. Т. Резиновые виброизоляторы. – Л.: Судостроение, 1988. – 209 с.
9. Никифоров А. С. Вибропоглощение на судах. – Л.: Судостроение, 1979. – 245 с.
10. Алексеев С. П. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1970. – 308 с.
11. Яковлев С. Н. Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана. – СПб.: Реноме, 2013. – 176 с.
12. Yakovlev S. N. Self-Oscillation of an Elastic Polyurethane Coating in Polishing // Russian Engineering Research. – 2014. – N 5. – P. 295–298.
13. Govorcin B. E. Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters // Journal of Elastomers and Plastics. – 2003. – V. 35, N 5. – P. 311–323.
14. Крыжановский В. К. Пластмассовые детали технических устройств. – СПб.: НОТ, 2014. – 456 с.
15. Ашейчик А. А. Экспериментальная механика. Определение физико-механических свойств полимеров и эластомеров. – СПб.: Изд-во СПбПУ, 2016. – 168 с.

УДК 678.745.2:539.434

## ТЕРМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИИМИДАТОВ

Д. М. МОГНОНОВ<sup>1</sup>, д-р хим. наук, О. Ж. АЮРОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
О. В. ИЛЬИНА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В. Н. КОРНОПОЛЬЦЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А. М. МАНГАДАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН «Байкальский институт природопользования СО РАН», 670047, Улан-Удэ, Республика Бурятия, ул. Сахьяновой, 6, E-mail: [info@binm.ru](mailto:info@binm.ru)

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», 670013, Улан-Удэ, Республика Бурятия, ул. Ключевская, 40В, E-mail: [office@esstu.ru](mailto:office@esstu.ru)

Поступила в редакцию 04.02.2019

После доработки 23.04.2019

Принята к публикации 29.04.2019

Поликонденсацией эквимолекулярных количеств бис-имидаилхлоридов с бис-фенолами в среде органических растворителей синтезированы иминоаналоги полиарилатов – полиимидаты. Полученные полимеры растворимы в амидных растворителях, растворителях фенольного типа и тетрагидрофуране, характеризуются большим интервалом между показателями тепло- и термостойкости, что открывает широкие возможности для переработки полиамидинов в изделия современными промышленными методами. Механическая прочность пленочных материалов из полиимидатов составляет 65–90 МПа, наблюдается явно выраженная зависимость деформационно-прочностных показателей от величины молекулярной массы полимера.

Несмотря на то, что полиимидаты представляют интерес как промежуточные полимерные интермедиаты при синтезе полиамидов, они обладают собственным комплексом высоких термических и деформационно-прочностных показателей, что делает их перспективными в качестве адгезивов, пленочных материалов, волокон и слоистых пластиков. Одним из наиболее важных в практическом отношении свойств пленочных материалов на основе ПИД является их протонная проводимость после допирования в растворе ортофосфорной кислоты, что позволяет использовать данные полимеры в качестве мембран при конструировании топливных элементов водородной энергетики.

**Ключевые слова:** полиимидаты, поликонденсация, бис-имидаилхлориды, бис-фенолы, термостойкость, растворимость, физико-механические свойства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Могнонов Д. М., Тоневицкий Ю. В., Аюрова О. Ж., Ильина О. В., Корнопольцев В. Н. Термические характеристики и физико-механические свойства ароматических полиамидинов и материалов на их основе // Вопросы материаловедения. – 2018. – Т. 96, № 4. – С. 151–159.
2. Böhme F., Kunert C., Klinger C., Komber H. Structural influences on the properties of aromatic polyamides // Macromol. Symp. – 1998. – V. 128. – P. 183-193.
3. Kurita K., Kusayama Y., Iwakura Y. Polyadditions of bisketenimines. I. Synthesis of polyamides from bisketenimines and diamines // J. Polym. Sci.: Polym. Chem. Ed. – 1977. – V. 15, N 9. – P. 2163.
4. Ogata S., Rarimoto M., Imai Y. Direct synthesis of new aromatic polyamides from aromatic diamines and benzoic acids by using poly(trimethylsilylphosphate) // Macromol. Chem., Rapid Commun. – 1985. – V. 6, N 12. – P. 835.
5. Петрова Т.Д., Платонов В.Е. Реакции соединений с галогенимидоильными группировками // Успехи химии. – 1988. – Т. 57, №3. – С. 405-433
6. The Chemistry of Amidines and Imidates / Eds. S. Patai, Z. Rappoport. Chichester – New York: John Wiley & Sons. – 1991. – 918 p.
7. Соколов Л. Б., Герасимов В. Д., Савинов В. М., Беляков В. К. Термостойкие ароматические полиамиды. – М.: Химия, 1975. – 256 с.
8. Потапов В.И., Терентьев А.П. К вопросу о таутомерии амидов // Доклады АН СССР. – 1960. – Т.132. – С. 626–627.
9. Burdukovsky V.F., Mogonov D.M., Farion I.A. Chapman rearrangement in the synthesis of aromatic polyamides // J. Polym. Sci. Part. A: Polym. Chem. – 2007. – V. 45, N 1. – P. 4656–4660.
10. Chapman A.W. Imino-aryl ethers. Part V. The effect of substitution on the velocity of molecular rearrangement // J. Chem. Soc. – 1927. – P. 1743–1751. DOI:10.1039/JR9270001743.
11. Коршак В. В. Технология пластических масс. – М.: Химия, 1985. – 560 с.
12. Катаев В. М., Попов В. А., Сажин Б. И. Справочник по пластическим массам. – М.: Химия, 1975.

УДК 678.067.2

### ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ТКАНЕЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ И АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН В КАЧЕСТВЕ АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Г. Ф. ЖЕЛЕЗИНА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В. Г. БОВА<sup>2</sup>, канд. техн. наук, С. И. ВОЙНОВ<sup>1</sup>, А. Ч. КАН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

<sup>2</sup>АО НПП «Термотекс», 141351, Хотьково, ул. Заводская д. 1

Поступила в редакцию 12.04.2019

После доработки 8.05.2019

Принята к публикации 28.05.2019

Рассмотрена возможность использования гибридной ткани, изготовленной из высокомодульного углеродного жгута ЖГВ и высокопрочного арамидного жгута Русар-НТ для армирования полимерного композиционного материала. Приведены результаты определения физико-механических характеристик гибридного композиционного материала и значения коэффициентов реализации прочности и модуля упругости углеродных и арамидных волокон в составе композиционного материала.

**Ключевые слова:** арамидные волокна, углеродные волокна, органопластик, углепластик, гибридные полимерные композиты

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. – 2012. – № 3. – С. 10–15.



2. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. – 2016. – № 2 (14) . – С. 16–21.
3. 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. – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Kablov E. N. Materials and chemical technologies for aircraft engineering// Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2012. – V. 82, N 3. – С. 158–167.
5. Гуняев Г. М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. – М.: Химия, 1981. – С. 116–118.
6. Раскутин А. Е. Конструкционные углепластики на основе новых связующих расплавленного типа и тканей Porcher // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. – 2013. – № 5. – С. 1–10. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения 29.01.2019).
7. Раскутин А. Е., Соколов И. И. Углепластики и стеклопластики нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2013. – № 4. – С. 9. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 29.01.2019).
8. Бахарева В. Е., Николаев Г. И. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы. – СПб.: НПО «Профессионал». 2012. – 494 с.
9. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. – 288 с.
10. Baker A., Dutton S., Kelly D. Composite materials for aircraft structures. 2<sup>nd</sup> ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. – С. 249–257
11. Barbero E. J. Introduction to composite materials design. Third edition. – CRC Press, 2018. – С. 45.
13. Железина Г. Ф., Соловьева Н. А., Макрушин К. В., Рысин Л. С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // Авиационные материалы и технологии, 2018. №1. С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
14. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 7–17.
15. Железина Г. Ф., Войнов С. И., Черных Т. Е., Черных К. Ю. Новые арамидные волокна Rucar HT для армирования конструкционных органических композитов // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 1. – (81). – С. 60–72.
16. Tikhonov I. V., Tokarev A. V., Shorin S. V., Shchetinin V. M., Chernykh T. E., Vova V. G. Russian aramid fibres: past–present–future // Fibre Chemistry. – 2013. – N 5. – P. 1–8.
17. Кулагина Г. С., Железина Г. Ф., Тихонов И. В., Дориомедов М. С. Арамидные органические композиты, состояние и перспективы // Матер. II Всеросс. науч.-технич. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения», Москва, ФГУП «ВИАМ», 2017. – С. 79–91.

УДК 678.074

## ВЛИЯНИЕ ОКИСЛЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА ПОВЕРХНОСТНУЮ ЭНЕРГИЮ РЕЗИН

М. Н. НАГОРНАЯ<sup>1,2</sup>, А. В. МЫШЛЯВЦЕВ<sup>2</sup>, д-р хим. наук, Е. А. СТРИЖАК<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП ФНПЦ «Прогресс», 644018, г. Омск, 5-я Кордная, 4, E-mail: [info@progress-omsk.ru](mailto:info@progress-omsk.ru)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Поступила в редакцию 21.03.2019

После доработки 13.05.2019

Принята к публикации 28.05.2019

Исследовано влияние печного технического углерода N121 и N326, окисленного активными формами кислорода, на свойства резин на основе бутилкаучука в сравнении с влиянием канально-го технического углерода К 354. Установлено, что введение окисленных образцов технического углерода в состав резиновых смесей позволяет увеличить время начала подвулканизации резиновых смесей от 8,82 до 11,17 мин, повысить уровень условной прочности при растяжении от 15, 52 до 16,68 МПа. Применение в резинах на основе бутилкаучука в качестве наполнителя технического углерода N121 или N326, окисленного 30%-ным пероксидом водорода, позволяет получить резины с поверхностной энергией, близкой по свойствам к резине, наполненной техническим углеродом К 354.

*Ключевые слова:* резины, технический углерод, окислительная модификация, поверхностная энергия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Солдатов А. И. Формирование структуры углеродной поверхности при воздействии окислителей // Вестн. ЧелГУ. Сер. 4. Химия. – 2004. – № 1. – С. 81–94.
2. Cataldo F., Ursini O. The Role of Carbon Nanostructures in the Ozonization of Different Carbon Black Grades, Together with Graphite and Rubber Crumb in an IR Gas Cell // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2007. – V. 15, N.1. – С. 1.
3. Ван Кревелен Д. В. Свойства и химическое строение полимеров: Учеб. пособие / Пер. с англ. / Под ред. А. Я. Малкина. – М.: Химия, 1976. – 416 с.
4. Сумм Б. Д., Горюнов Д. В. Физико-химические основы смачивания и растекания: Учеб. пособие – М.: Химия, 1976. – 230 с.
5. Дулина О. А., Свиридова Е. И., Буканов А. М. Некоторые особенности смачивания резин водой // Вестник МИТХТ. – 2009. – Т. 4, № 5. – С 85–86.
6. Boehm H. P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons // Carbon. – 1994. – V. 32, N 5. – P. 759–769.
7. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг и др. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 528 с.
8. Киселёва Е. А., Раздьяконова Г. И., Неделькин В. И. О влиянии химического состава поверхности дисперсного углерода на протяженность адсорбционных слоев эластомеров // Каучук и резина. – 2010. – № 4. – С.43–44.
9. Раздьяконов Ю. В., Киселёва Е. А., Стрижак Е. А. Поверхностные энергии технического углерода и каучуков, применяемых при изготовлении шинных резин // Тез. докл. IX междунар. науч.-практич. конф. «Резиновая промышленность. Продукция. Материалы. Технология. Инвестиции», Москва, 2005. – С. 109–110.
10. Park S.-J., Seo M.-K., Nah Ch. Influence of surface characteristics of carbon blacks on cure and mechanical behaviors of rubber matrix compoundings Original Research Article // Journal of Colloid and Interface Science. – 2005. – V. 291, Is. 1. – P. 229–235.

УДК 669.15–194.2:620.194.2:620.179.1

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАРЕНИЯ НА ЗАРОЖДЕНИЕ ТРЕЩИН КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Е. Н. БУТУСОВА<sup>1,3</sup>, В. В. МИШАКИН<sup>2,3</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup> ООО СК «АЭРОХОД», 603003, Нижний Новгород, Щербакова, 37Е, E-mail: Anelka13@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБУН «Федерального исследовательского центра Института прикладной физики РАН», 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru)

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева», 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

Поступила в редакцию 4.04.2019  
После доработки 24.05.2019  
Принята к публикации 28.05.2019

Приведены результаты исследования процессов коррозионного растрескивания под напряжением малоуглеродистых низколегированных сталей с разным уровнем старения. Показано, что с повышением уровня старения снижается предел макроупругости стали и длительность инкубационного периода коррозионного растрескивания при одинаковых номинальных напряжениях. Это может быть объяснено тем, что предел макроупругости определяет начало микропластического течения в материале, активно влияющего на процесс коррозионного растрескивания под напряжением. Отмечено, что зависимость напряжения, достаточного для зарождения трещины, на выбранной базе испытаний от уровня старения имеет трехстадийный характер. На основании теории дефектов предложено обоснование такого поведения исследуемой характеристики.

*Ключевые слова:* малоуглеродистая сталь, коррозионное растрескивание под напряжением, старение, трещина, предел макроупругости, инкубационный период.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А. П. *Металловедение*. – М.: Металлургия, 1978. – 647 с.
2. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. *Специальные стали. Учебник для вузов*. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
3. Кристиан Дж. *Теория превращений в металлах и сплавах. Ч. 1. Термодинамика и общая кинетическая теория / Пер. с англ. / Под ред. А. Л. Ройтбурда*. – М.: Мир, 1978. – 806 с.
4. Чувильдеев В. Н. Влияние старения на эксплуатационные свойства сталей магистральных газопроводов // Сб. тр. научно-практического семинара «Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов» / Под ред. Б. В. Будзуляка, А. Д. Седых. – Н. Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 18–68.
5. Варламов Д. П., Канайкин В. А., Матвиенко А. Ф., Степков О. И. *Мониторинг дефектности и прогноз состояния магистральных газопроводов России: Уральский центр академического обслуживания / Под ред. Д. П. Варламова – Екатеринбург, 2012. – 250 с.*
6. Лякишев Н. П., Кантор М. М., Белкин А. А., Тимофеев В. Н. Об оценке влияния длительной эксплуатации на механические свойства и структуру металла магистральных нефтепроводов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2007. – № 1, т. 73. – С. 75–82.
7. Смирнов М. А., Пышминцев И. Ю., Варнак О. В., Струин А. О. Деформационное старение низкоуглеродистой трубной стали // *Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия*. – 2013. – Т. 13, №1. – С. 129–133.
8. Филиппов Г. А., Ливанова О. В., Чевская О. Н., Шабалов И. П. Дegradационные процессы при эксплуатации и сопротивление хрупкому разрушению трубных сталей // *Металлург*. – 2013. – № 7. – С. 51–60.
9. ГОСТ 10006–80. Трубы металлические. Метод испытания на растяжение. Введ. 1980-03-31. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 12 с.
10. ГОСТ 28334–89. Проволока и канаты стальные для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. Метод испытания на релаксацию при постоянной деформации. – Введ. 1990-06-30. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 7 с.
11. ГОСТ 20295–85. Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. – Введ. 1987-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2003 – 26 с.
12. ГОСТ 19281–89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия. – Введ. 1991-01-01 – М.: Изд-во стандартов, 2015. – 15 с.
13. Норин А. В., Чувильдеев В. Н. Старение сталей труб магистральных газопроводов // *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского*. – 2010. – № 5(2). – С. 171–180.

14. ГОСТ 26294–84. Сварные соединения. Методы испытаний на коррозионное растрескивание. – Введ. 1984-01-01 – М.: Изд-во стандартов, 1985 – 11 с.
15. Болдин М. С., Нохрин А. В., Чувильдеев В. Н., Чегуров М. К., Бутусова Е. Н., Степанов С. П., Козлова Н. А., Лопатин Ю. Г., Котков Д. Н. Исследование процесса зарождения трещин коррозионного растрескивания под напряжением в малоуглеродистых низколегированных сталях // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2010. – № 5(2). – С. 186–189.
16. Микропластичность. Сб. статей / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1972. – 340 с.
17. Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М. Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 312 с.
18. Пиккеринг Ф. Б. Физическое металловедение и разработка сталей. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.

УДК 669.35'5:620.197.2

### **УДАЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ С ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ ЛАТУНИ РАСТВОРАМИ КИСЛОТ**

Л. М. МИРОНОВИЧ, д-р хим. наук, А. Ю. ЕЛИСЕЕВ, А. Ю. ЕЛИСЕЕВА

*ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», 305040, г. Курск,  
ул. 50 лет Октября, 94. E-mail: lm.myronovych@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.02.2019

После доработки 15.04.2019

Принята к публикации 23.04.2019

Изучено комплексное влияние различных факторов на процесс очистки латуни марки Л-68, применяемой для изготовления теплообменного оборудования, от продуктов коррозии. При использовании в качестве рабочего раствора кислот различной силы было установлено, что скорость процесса очистки зависит от природы кислоты и ее начальной концентрации. При применении сильных кислот рекомендуется использовать рабочий раствор с малыми концентрациями и последующим увеличением их в процессе очистки. При дополнительном вводе в систему кислорода и повышении температуры рабочего раствора повышается скорость очистки латуни. Процесс удаления продуктов коррозии протекает без существенных изменений конфигурации поверхности, а, следовательно, без расходования металла.

*Ключевые слова:* теплообменное оборудование, латунь, удаление продуктов коррозии, кислота, кинетические исследования

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Альянс, 2004. – 753 с.
2. Тарасюк В. М. Эксплуатация котлов: практическое пособие для оператора котельной. – М.: ЭНАС, 2008. – 272 с.
3. Балабан-Ирменин Ю. В. Новые подходы к оценке интенсивности внутренней коррозии металла трубопроводов тепловых сетей // Теплоэнергетика. – 2001. – № 6. – С. 77–80.
4. Пожидаева С. Д., Елисеева А. Ю., Сотникова Д. А., Иванов А. М. Об использовании отходов меди и бронзы как вторичного сырья // Химическая технология. – 2014. – № 6. – С. 356–363.
5. Трофимов Н. И., Ткачукова Г. В. Применение сульфаминовой кислоты для снятия продуктов коррозии с предметов прикладного искусства // Реставрация, исследование и хранение музейных художественных ценностей. – 1978. – № 3. – С. 3.
6. Акользин П. А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования. – М.: Энергоиздат, 1982. – 304 с.

7. Пат. РФ 2604162 С23G1/02, С23F1/18. Способ очистки поверхностей меди и ее сплавов от продуктов коррозии и окисления соединениями меди (II) / Иванов А. М., Елисеева А. Ю., Пожидаева С. Д.; № 2014106143/02; Заявл. 19.02.14; Оpubл. 27.08.15 // Бюл. 24.

8. А. с. СССР 398707, МКИ С23G1|02, F28G9/00. Способ очистки латунных аппаратов / Гронский Р. К., Маклакова В. П., Заявл. 21.5.71; Оpubл. 27.9.73 // Бюл. 38.

9. А. с. СССР 791789, МКИ С23G1/02. Способ очистки медной поверхности / Флак С. М., Зарецкий Е. И., Казюта В. И., Федосов А. И., Еременко В. В., Власова Л. А. Заявл. 06.07.77, Оpubл. 30.12.80 // Бюл. 48.

10. Пат. РФ 2077788, С23G1/02. Способ очистки медной поверхности / Хახанина Т. И., Ключева Т. Б., Семакина О. К., Шулепов И. А., Жуков В. Т. Заявл. 07.06.1994, Оpubл. 20.04.1997.

11. Елисеев А. Ю., Миронович Л. М., Елисеева А. Ю. Растворение медьсодержащих сплавов теплообменного оборудования в присутствии окислителей и кислых реагентов // Изв. Юго-западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2018. – Т. 8, № 3 (28). – С. 116–122.

УДК 621.039.534:621.822.5:620.193.4:666.3/7

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПАР ТРЕНИЯ НАСОСА В СРЕДЕ СВИНЕЦ – ВИСМУТ

В. В. СТЕПАНОВ<sup>1</sup>, А. Д. КАШТАНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, С. Ю. ЩУЦКИЙ<sup>2</sup>, А. Н. АГРИНСКИЙ<sup>2</sup>,  
Н. И. СИМОНОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>АО «ЦКБМ», 190020, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, д. 138, корпус 1, лит. Б,  
E-mail: [postbox@ckbm.ru](mailto:postbox@ckbm.ru)

Поступила в редакцию 18.04.2018

После доработки 4.04.2019

Принята к публикации 5.04.2019

Рассматриваются результаты исследований по выбору материала нижнего радиального подшипника насоса, предназначенного для обеспечения циркуляции теплоносителя свинец – висмут. Циркуляция жидкого теплоносителя обеспечивается вертикальным осевым насосом, имеющим «длинный» вал. В подобной конструкции необходимо предусмотреть установку нижнего подшипника, смазка которого должна осуществляться теплоносителем свинец – висмут. В результате анализа условий работы осевого насоса нижний подшипник было решено выполнить по схеме подшипника скольжения гидродинамического типа. Материалы пар трения в таком подшипнике должны выдерживать нагрузки, возникающие при эксплуатации насоса в агрессивной среде теплоносителя свинец – висмут. На основании изучения литературных данных и экспериментального исследования коррозионной и тепловой стойкости в среде свинец – висмут для изготовления радиального подшипника насоса были выбраны неметаллические материалы – керамика и композиционный материал на основе углерода.

*Ключевые слова:* керамика, свинец – висмут, теплоноситель, насос, покрытия, металлография

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баландин Ю. Ф., Марков В. Г. Конструкционные материалы для установок с жидкометаллическими теплоносителями. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 208 с.

2. Горынин И.В., Карзов Г.П., Марков В.Г. Конструкционные материалы для корабельных атомных энергетических установок с жидкометаллическим (свинец–висмут) теплоносителем // Роль российской науки в создании отечественного подводного флота / Под общ. ред. акад. А. А. Саркисова. – М.: Наука, 2008.

3. Горынин И. В., Карзов Г. П., Марков В. Г., Яковлев В. А. Конструкционные материалы для атомных реакторов с жидкометаллическими теплоносителями в виде свинца или сплава свинец – висмут // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1999. – № 9 – С. 20–24.



4. Weisenburger A., Aoto K., Muller G., Heinzl A., Schumacher G., Furukawa T. Behaviour of chromium steels in liquid Pb-55.5Bi with changing oxygen content and temperature // J. Nuclear Materials. – 2006. – V. 358. – P. 69–76.

5. Iincev G. D., Karnik M. Paulovic, Doubkova J. A. The effect of temperature and oxygen content on the flowing liquid metal corrosion of structural steels in the Pb–Bi eutectic // Nuclear Engineering and Design. – 2006. – V. 236. – P. 1909–1921.

6. Вернажский А. П., Островский М. С., Шубина Н. Б. Износостойкость конструкционной керамики в горном оборудовании // Горный информационно–аналитический бюллетень. – 2011. – вып. 3.

7. Матренин С. В., Слосман А. И. Техническая керамика: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ. – 2004. – 75 с.

8. Левин В. Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. Изд. 4. – М.: Атомиздат, 1979. – 288 с.

9. Кингери У. Д. Введение в керамику. Изд. 2–е. – М.: Стройиздат, 1967. – 499 с.

УДК 669.15–194.55:539.421:620.179.16

### ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 38ХНЗМФА-Ш ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИЗЛОМОВ И ЗНАЧЕНИЯМ СКОРОСТЕЙ УПРУГИХ ВОЛН

В. В. ЕВСТИФЕЕВА<sup>1</sup>, В. Н. ЛИТОВЧЕНКО<sup>1</sup>, В. В. МИШАКИН<sup>2,3</sup>, д-р техн. наук,  
Р. А. ВОРОБЬЕВ<sup>1,3</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> АО «ЦНИИ «Буревестник», 603052, Нижний Новгород, Сормовское шоссе, 1А. E-mail: ev\_vv@bk.ru

<sup>2</sup> Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН», 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 603005, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 20

Поступила в редакцию 20.02.2019

После доработки 27.05.2019

Принята к публикации 28.05.2019

Приведены результаты исследования влияния температуры отпуска на параметры статической прочности и трещиностойкости конструкционной особо высококачественной стали 38ХНЗМФА-Ш. Проведено исследование рельефа поверхности разрушения методом электронного фрактографического анализа после термической обработки. Обнаружена связь характеристик изломов с критическим коэффициентом интенсивности напряжений. Исследовано влияние температуры отпуска на скорость ультразвуковых объемных волн. Найдена линейная связь между скоростью упругих волн и критическим коэффициентом интенсивности напряжений стали. Полученная зависимость позволяет провести оценку изменения трещиностойкости стали неразрушающим методом контроля при вариации температуры отпуска. Методом электронной фрактографии проведен анализ изломов образцов с трещиной. Исследования рельефа поверхности разрушения после различных режимов термической обработки показали, что микрорельеф представлен уплощенными ямками-конусами. Повышение температуры отпуска сопровождается увеличением диаметра ямок-конусов на поверхности разрушения. Между параметром трещиностойкости и диаметром ямок установлена квадратичная зависимость. Показано, что вклад структурного состояния матрицы феррита в значение трещиностойкости намного более весомый, чем вклад обособленных карбидов. Измерены скорости упругих волн в стали, установлено, что их значение возрастает с повышением температуры отпуска. Сделан прогноз характеристик прочности и трещиностойкости конструкционной стали при высоких отпусках по значениям скорости поперечных волн. Отклонение спрогнозированных значений трещиностойкости  $K_{1C}$  и предела прочности  $\sigma_b$  от экспериментальных составляет не более 5,4 и 12,6% соответственно.

**Ключевые слова:** трещиностойкость, скорость упругих волн, термическая обработка, электронная фрактография.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – С. 264.

2. Gross D., Seelig T. Fracture Mechanics: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. – P. 74.
3. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей. – Новосибирск: Наука, 1996. – С. 43.
4. Raj B., Moorthy V., Jayakumar T., Rao K. B. S. Assessment of microstructures and mechanical behaviour of metallic materials through non-destructive characterization // International Materials. Reviews. – 2003. – V. 48, N 5. – P. 273–325.
5. Droney B. E., Klinman R. Ultrasonic techniques for determining the mechanical properties of steel // AIP Conference Proceedings. – 1982. – V. 84. – P. 210.
6. Павлов А. М., Павлов А. В., Жилкашинова А. М., Сатбаева З. А. Исследование связи скорости ультразвука с механическими свойствами литой стали // Технические науки – от теории к практике. – 2016. – № 8 (56). – С. 60–68.
7. Ботаки А. А., Ульянов В. Л., Шарко А. В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 11.
8. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Кн. 1 / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – С. 134.
9. Криштал М.М., Ясников И. С., Полунин В. И. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ в примерах практического применения / Под общ. ред. М. М. Кришталла. – М.: Техносфера, 2009. – С. 34.
10. Изотов В.И., Киреева Е.Ю. Исследование особенностей хрупкого разрушения углеродистой стали в различных структурных состояниях методом растровой электронной микроскопии подтравленной поверхности изломов // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т. 112, № 3. – С. 320–327.
11. Практическая растровая электронная микроскопия / Пер. с англ. / Под ред. Дж. Гоулдстейна и Х. Яковица. – М.: Мир, 1978. – 642 с.
12. Гуляев А. П., Гуляев А. А. Металловедение. – М.: ИД «Альянс», 2011. – 644 с.
13. Курдюмов Г. В. Явления закалки и отпуска стали. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 64 с.
14. Шайманов Г. С., Симонов М. Ю., Симонов Ю. Н., Перцев А. С. Особенности поверхности разрушения стали 09Г2С после холодной радиальнойковки // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 3. – С. 119–134.
15. Георгиев М. Н., Липчин Н. Н., Симонов Ю. Н. Связь структуры металла с фрактографическими особенностями поверхности усталостных изломов // ФММ. – 1987. – Т. 63, № 3. – С. 622–624.
16. Григоренко В. Б., Морозова Л. В., Орлов М. Р. Исследование причин появления участков с различной морфологией излома в кованных заготовках из стали 38ХНЗМФА // Труды ВИАМ. – 2014. – № 8. – С. 11.
17. Ботвина Л. Р. Разрушение. Кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука, 2008. – С. 25.
18. Георгиев М. Н., Догадушкин В. Ю., Межова Н. Я., Минаев В. Н., Строк Л. П. О механизме распространения усталостной трещины в металлических материалах // ФХММ. – 1982. – Т. 18, № 4. – С. 35–42.
19. Белоусов М. В., Черепин В. Т., Васильев М. А. Превращения при отпуске стали. – М.: Металлургия, 1973. – С. 32.
20. Souissi M., Numakura H. Elastic properties of Fe–C and Fe–N martensites // ISIJ International. – 2015. – V. 55, N. 7. – P. 1512–1521.

21. Воробьев Р. А., Евстифеева В. В., Литовченко В. Н., Мишакин В. В., Дубинский В. Н. Применение ультразвуковой диагностики для оценки трещиностойкости стали 38ХНЗМФА // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 2. – С. 64–69.

22. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. – М.: Metallurgy, 1978. – С. 305.

УДК 669.14.018.293:539.421:620.171.2

## **КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СТАЛЕЙ ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА. ПРИМЕНЕНИЕ РОССИЙСКИХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ТРЕБОВАНИЙ**

В. Ю. ФИЛИН, 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 30.04.2019

После доработки 6.06.2019

Принята к публикации 7.06.2019

Реализация крупномасштабных проектов освоения Арктики неизбежно требует участия как российских, так и иностранных производителей морской техники и, соответственно, применения как отечественных, так и зарубежных сталей. В связи с этим целесообразно сопоставить порядок назначения отечественных и зарубежных нормативных требований к сталям, предназначенным для эксплуатации при низких климатических температурах, и металлу сварных соединений, и проанализировать теоретическую и экспериментальную обоснованность этих требований. Это особенно важно в связи с тем, что различия в требованиях к качеству металла могут служить инструментом для отеснения российских производителей металлопродукции от участия в международных проектах.

*Ключевые слова:* арктические конструкции, требования к материалам, трещиностойкость, торможение хрупкой трещины.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Zerbst U., Schödel M., Webster S., Ainsworth R. Fitness-for-service fracture assessment of structures containing cracks. A workbook based on the European SINTAP/FITNET procedure. Elsevier Ltd., 2007. – 315 p.

2. BS 7910:2013+A1:2015. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. – 492 p.

3. Российский морской регистр судоходства. НД № 2-020101-104. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII: Материалы. – СПб., 2018. – 183 с.

4. DNVGL-OS-B101. Offshore standard. Metallic materials. Ed. January 2018. – 147 p.

5. Ильин А. В., Леонов В. П., Филин В. Ю. Разработка методики оценки сопротивления хрупкому разрушению сварных конструкций для шельфа Арктики. // Научн.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства.– 2008.– Вып. 31. – С. 147–175.

6. Ильин А. В., Филин В. Ю. О соотношении локальных и энергетического критериев нестабильного хрупкого разрушения хладостойких сталей. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 12. – С. 44–49.

7. Ильин А. В., Филин В. Ю. Проблемы научного обоснования требований к сталям для сварных конструкций Арктики // Нефть. Газ. Новации. – 2015. – № 10. – С. 56–61.

8. Ильин А. В., Филин В. Ю., Артемьев Д. М. Сопоставление различных методик оценки трещиностойкости металла сварных конструкций, работающих в арктических условиях // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2015. – Вып. 40/41.– С. 62–71.

9. Российский морской регистр судоходства. НД № 2-020201-015 Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб, 2018. – 456 с.

10. Гуменюк В. А., Иванов Ю. Г., Красиков С. В., Ильин А. В., Филин В. Ю. Исследование сопротивления низкотемпературному хрупкому разрушению новых сталей для магистральных трубопроводов и судостроительных сталей высокой прочности // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – № 56. – 2010. – С. 107–118.
11. Ильин А. В., Артемьев Д. М., Филин В. Ю. Моделирование МКЭ распространения и торможения хрупкого разрушения в пластинах с исходной трещиной // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 1(1). – С. 56–65.
12. Ильин А. В., Артемьев Д. М., Филин В. Ю. Анализ корреляции критических температур вязко-хрупкого перехода и температуры торможения хрупкого разрушения на основе численного моделирования МКЭ // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 2. – С. 46–55.
13. Российский морской регистр судоходства. НД № 2-020301-005 Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов. – СПб, 2017. – 178с.
14. Ильин А. В., Филин В. Ю. Определение параметра трещиностойкости CTOD для материала нетермообработываемых сварных соединений конструкций шельфа и обоснование требований к результатам испытаний // Сборник статей по материалам 1 Международной конференции «Деформация и разрушение материалов». М.: Интерконтакт наука, 2006. – С. 630–632.
15. Евенко В. И., Башаев В. К., Ильин А. В., Леонов В. П., Филин В. Ю., Щеголева Е. Г. Проблемы аттестации высокопрочных хладостойких материалов для конструкций арктического шельфа России, применение расчетных оценок сопротивления хрупкому разрушению для обоснования требований к сталям и сварным соединениям // Вопросы материаловедения. – 2009. – Вып. 3(59). – С. 242–262.
16. Филин В. Ю. Расчеты сопротивления хрупкому разрушению металла сварных конструкций из хладостойких низколегированных сталей // Сб. материалов VI Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 10–13 ноября 2015 г., ИМЕТ РАН. – С. 835–837.
17. Ильин А. В., Филин В. Ю., Башаев В. К. К вопросу об определении трещиностойкости хладостойкой высокопрочной стали в толщине до 150 мм // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 112–123.
18. ISO 2394:2015 General principles on reliability for structures. Fourth ed., – 119 p.
19. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль. Т. 3: Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение. – 2004. – 864 с.
20. API STD 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities. 21st Ed., September 2013 (includes Errata 1 to 5). – 118 p.
21. Филин В. Ю., Ильин А. В. Описание вероятностного подхода к выбору коэффициента запаса в условии прочности сварных соединений / Материалы XI всероссийской конференции Тест-Мат. «Физико-механические испытания, прочность, надежность, высокотемпературные испытания», Москва, 1 февраля 2019 г., ВИАМ. – С. 355–371.
22. Pussegoda L. N., Malik L., Morrison J. Measurement of Crack Arrest Fracture Toughness of a Ship Steel Plate // J. of Testing & Evaluation. – 1998. – V.26. – P. 187–197.
23. ASME BPVC Section XI. Division 1. Rules for inspection and testing of components of light-water cooled plants. Article A-4000: Material properties.
24. Мотовилина Г. Д., Филин В. Ю., Глибенко О. В. Особенности разрушения высокопрочной свариваемой конструкционной стали для арктического применения при температурах, близких к температуре нулевой пластичности // Деформация и разрушение материалов. – 2015.– № 4.– С. 42–48.

УДК 669.15–194.56:621.039.531:620.194.2

**МОДЕЛЬ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ.  
Часть 1. Анализ механизмов повреждения и формулировка определяющих уравнений**

Б. З. МАРГОЛИН<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА<sup>1</sup>,  
В. А. ПОТАПОВА<sup>1</sup>, АКИ TOIVONEN<sup>2</sup>, FAIZA SEFTA<sup>3</sup>, CÉDRIC POKOR<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Центр технических исследований Финляндии VTT, Эспоо, Финляндия

<sup>3</sup>EDF R&D, EDF-Lab Les Renardières, Moret-sur-Loing, France

Поступила в редакцию 1.02.2019

После доработки 16.03.2019

Принята к публикации 18.03.2019

Проведен анализ механизмов, потенциально оказывающих влияние на коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) облученных аустенитных сталей в среде теплоносителя I контура легководных реакторов типа PWR и ВВЭР. На основании анализа и обобщения литературных и оригинальных данных определен критерий инициации КРН. Сформулированы условия, необходимые для развития межзеренной трещины по механизму КРН. Рассмотрена природа низкотемпературной ползучести облученных аустенитных сталей и предложены уравнения, ее описывающие. На основании сформулированного критерия зарождения зернограничных микротрещин и полученных уравнений ползучести разработана модель инициации КРН.

**Ключевые слова:** аустенитная сталь, нейтронное облучение, коррозионное растрескивание под напряжением, критерий инициации растрескивания

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пиминов В. А., Евдокименко В. В. Надежность на весь срок эксплуатации // РЭА [Росэнергоатом]. – 2015. – № 2. – С. 16–19.
2. Карзов Г. П., Марголин Б. З. Основные механизмы радиационного повреждения материалов ВКУ и материаловедческие проблемы их длительной эксплуатации // РЭА [Росэнергоатом]. – 2015. – № 2. – С. 8–15.
3. Radiation-induced material changes and susceptibility to intergranular failure of light-water-reactor core internals / S. M. Bruemmer, E. P. Simonen, P. M. Scott, et al. // J. Nucl. Mater. – 1999. – V. 274. – P. 299–314.
4. Influence of Carbide Precipitation and Rolling Direction on Intergranular Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Hydrogenated High-Temperature Water / K. Arioka, T. Yamada, T. Terachi, et al. // Corrosion – 2006. – V. 62. – P. 568–572.
5. Multi-scale characterization of stress corrosion cracking of cold-worked stainless steels and the influence of Cr content / S. Lozano-Perez, T. Yamada, T. Terachi, et al. // Acta Materialia. – 2009. – V. 57. – P. 5361–5381.
6. Nishioka H., Fukuya K., Fujii K., Torimaru T. IASCC Initiation in Highly Irradiated Stainless Steels under Uniaxial Constant Load Conditions // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – V. 45, N 10 – P. 1072–1077.
7. Radiation effects on the stress corrosion and other selected properties of type 304 and type 316 stainless steel / A.J. Jacobs, J.P. Wozadlo, K. Nakata et al. // Proc. of 3<sup>rd</sup> Intern. Symp. On Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems Water Reactors, 1988. – P. 673–680.
8. Scott P. A review of irradiation assisted stress corrosion cracking // J. Nucl. Mater. – 1994. – N 211. – P. 101–122.
9. Bruemmer S. M., Charlot L. A., Atteridge D. G. Sensitization development in austenitic stainless steels-measurement and prediction of thermomechanical history effects // Corrosion. – 1987. – N 44. – P. 427.
10. Grain boundary composition and irradiation-assisted stress corrosion cracking resistance in type 348 stainless steel / A. J. Jacobs, J. P. Wozadlo, K. Nakata et. al. // Corrosion. – 1994. – V. 50. – P. 731–740.
11. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюрёв В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970. – 422 с.
12. Логан Х. Л. Коррозия металлов под напряжением. – М.: Металлургия, 1970. – 341 с.
13. Busby J. T., Was G. S., Kenik E. A. Isolating the effect of radiation-induced segregation in irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels // J. Nucl. Mater. – 2002. – V. 302. – P. 20–40.



14. Was G.S., Farkas D., Robertson I. M. Micromechanics of dislocation channeling in intergranular stress corrosion crack nucleation // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2012. – V. 16. – P. 134–142.
15. Karlsen W., Diego G., Devrient B. Localized deformation as a key precursor to initiation of intergranular stress corrosion cracking of austenitic stainless steels employed in nuclear power plants // *J. Nucl. Mater.* – 2010. – V. 406. – P. 138–151.
16. Jiao Z., Was G. S. Localized deformation and IASCC initiation in austenitic stainless steels // *J. Nucl. Mater.* – 2008. – V. 382. – P. 203–209.
17. Li X., Almazouzi A. Deformation and microstructure of neutron irradiated stainless steels with different stacking fault energy // *J. Nucl. Mater.* – 2009. – V. 385. – P. 329–333.
18. Little E. A. Fracture mechanics evaluations of neutron irradiated type 321 austenitic steel // *J. Nucl. Mater.* – 1986. – V. 139. – P. 261–276.
19. Марголин Б. З., Федорова В. А., Филатов В. М.. Метод оценки долговечности внутрикорпусных устройств ВВЭР по критерию инициации межкристаллитного коррозионного растрескивания облученных аустенитных сталей // *Проблемы прочности*. — 2012. — № 2. — С. 5-22.
20. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Бучатский А. А., Нестерова Е. В., Каштанов А. Д.. Исследование влияния термического старения на длительную прочность и пластичность стали X18H9 // *Вопросы материаловедения*. – №4 (64) . – 2010. – С. 118–127.
21. Fukuya K. Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2013. – 50(№ 3). – P. 213–254.
22. Garner F. A. Void swelling and irradiation creep in light water reactor (LWR) environments // *Understanding and Mitigating Ageing in Nuclear Power Plants* / Ed. P. G. Tipping. – Woodhouse Publishing, – 2010, – P. 308–356.
23. Ernestova M. Influence of the Neutron Spectrum on the Sensitivity to IASCC and Microstructure of CW 316 Material // *Proc. of the 8th International Symposium Fontevraud 8, Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs Safety, Performance and Reliability; SFEN 2014*.
24. Slow strain rate tensile tests on irradiated austenitic stainless steels in simulated light water reactor environments / Y. Chen, A. S. Rao, B. Alexandreanu et. al. // *Nuclear Engineering and Design*. – 2014. – V. 269. – P. 38– 44.
25. Stephenson K. J., Was G. S. The role of dislocation channeling in IASCC initiation of neutron irradiated stainless steel // *J. Nucl. Mater.* – 2016. – V. 481. – P. 214–225.
26. Mechanism of dislocation channel-induced irradiation assisted stress corrosion crack initiation in austenitic stainless steel / M. D. McMurtrey, B. Cui, I. Robertson et. al. // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2015. – V. 19. – P. 305–314.
27. Марголин Б. З., Пирогова Н. Е., Потапова В. А., Сорокин А. А., Бардашова Н. В., Петров С. Н., Михайлов М. С. Исследование механизмов коррозионного растрескивания стали для ВКУ ВВЭР на основе имитационных испытаний // *Вопросы материаловедения*. – 2017. – № 4 (92). – С. 193–218.
28. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Бучатский, Балакин С. М. Прогнозирование скорости роста трещины в аустенитных материалах в условиях ползучести и нейтронного облучения // *Вопросы материаловедения*. – 2005. – № 4(44). – С. 59–68.
29. Alexandreanu B., Capell B., Was G. S. Combined effect of special grain boundaries and grain boundary carbides on IGSCC of Ni–16Cr–9Fe–xCr alloys // *Materials Science and Engineering A*. – 2001. – V. 300. – P. 94–104.
30. Скалли Дж. Основы учения о коррозии и защите металлов. – М.: Мир, 1978. – 223.
31. West E. A., McMurtrey M. D., Jiao Z., Was G. S. Role of Localized Deformation in Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking Initiation // *Met. and Mat. Trans.* – 2012. – 43A. – P. 136–146.
32. Post-irradiation SCC investigations on highly irradiated core internals component materials / A. Toivonen, P. Aaltonen, W. Karlsen et al. // *Proceedings of Fontevraud 6 Conference "Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs"*, 18–22 Sept. 2006, Royal Abbeey, France.

33. Fractographic observations on highly irradiated AISI 304 steel after constant load tests in simulated PWR water and argon and after supplementary tensile and impact tests / A. Toivonen, U. Ehrnstén, W. Karlsen et. al. // Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System – Water Reactors / Edited by T.R. Allen, P.J. King, and L. Nelson TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2005.

34. Determination of the time to failure curve as a function of stress for a highly irradiated AISI 304 stainless steel after constant load tests in simulated PWR water environment / C. Pokor, A. Toivonen, M. Wintergerst et al. // Proceedings of Fontevraud 7 Conference "Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs", 26–30 Sept. 2010, Avignon, France.

35. Дж. Хирт, И. Лоте. Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 599 с.

36. Кан Р.У., Хаазен П. Физическое металловедение. Т.3. – М.: Металлургия, 1972. – 663 с.

37. Fukuya K., Nishioka H., Fujii K. Fracture behavior of austenitic stainless steels irradiated in PWR // J. Nucl. Mater. – 2008. – V. 378. – P. 211–219.

38. Nishioka H., Fukuya K., Fujii K. Deformation Structure in Highly Irradiated Stainless Steels // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – V. 45, N 4. – P. 274–287.

39. Namburi H. K., Hojna A., Zdenek F.. Effect of tensile strain on microstructure of irradiated core internal material // Proc. of the 24<sup>th</sup> International Conference Nuclear Energy for New Europe. Portoroz, Slovenia, 2015.

40. Characterization of surface oxides formed on irradiated stainless steels in simulated PWR primary water K. Fukuya; H. Nishioka; K. Fujii et.al. // Fontevraud 8: Conference on Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs' Safety, Performance and Reliability; Avignon (France); 15–18 Sep 2014.

41. Методология исследования коррозионных пленок на нержавеющей сталях / В. А. Зуёк, Р. А. Рудь, И. А. Петельгузов и др. // Вопросы атомной науки и техники. – 2010. – № 1(95). – С. 141–149.

42. Чухров Ф. В. Минералы. Справочник. Т. 2, вып.3. – М.: Наука, 1967. – 676 с.

43. The radiation swelling effect on fracture properties and fracture mechanisms of irradiated austenitic steels. Part I. Ductility and fracture toughness B. Margolin, A. Sorokin, V. Shvetsova et al. // J. Nucl. Mater. – 2016. – V. 480. – P. 52–68.

44. Качанов Л. М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН ССР, ОТН.–1958. – № 8. – С. 3–10.

45. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966.– 452 с.

46. McDowell P. D. L. Continuum modeling of localized deformation in irradiated bcc materials // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 432. – P. 414–427.

УДК 669.15–194.56:621.039.531:620.194.2

## **МОДЕЛЬ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ.**

### **Часть 2. Определение параметров модели и ее верификация**

Б. З. МАРГОЛИН<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА<sup>1</sup>,  
В. А. ПОТАПОВА<sup>1</sup>, АКИ TOIVONEN<sup>2</sup>, FAIZA SEFTA<sup>3</sup>, CÉDRIC POKOR<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland

<sup>3</sup>EDF R&D, EDF-Lab Les Renardières, Moret-sur-Loing, France

Поступила в редакцию 1.02.2019

После доработки 18.03.2019

Принята к публикации 21.03.2019

На основании полученных и имеющихся в литературе экспериментальных данных определены коэффициенты, параметры и функции, входящие в определяющие уравнения модели, разработан-

ной в первой части настоящей работы. Проведена верификация модели. Показано, что модель позволяет адекватно прогнозировать зависимость порогового напряжения  $\sigma_{th}^{IASCC}$  (ниже которого коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) при любой продолжительности испытаний не происходит) от дозы нейтронного облучения, а также рассчитать время инициации КРН при напряжениях, превышающих  $\sigma_{th}^{IASCC}$ .

**Ключевые слова:** аустенитная сталь, нейтронное облучение, коррозионное растрескивание под напряжением, пороговое напряжение, параметры модели, верификация

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Slow strain rate tensile tests on irradiated austenitic stainless steels in simulated light water reactor environments / Y. Chen, A.S. Rao, B. Alexandreanu et. al. // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – V. 269. – P. 38–44.
2. The effects of irradiation and testing temperature on tensile behaviour of stainless steels / C. Bailat, A. Almazouzi, N. Baluc et al. // J. Nucl. Mater. – 2000. – N 283–287. – P. 446–450.
3. Makin M. J., Minter F. J. Irradiation hardening in copper and nickel // Acta Metallurgica. – 1960. – V. 8. – P. 691–699.
4. Марголин Б. З., Федорова В. А., Филатов В. М. Метод оценки долговечности внутрикорпусных устройств ВВЭР по критерию инициации межкристаллитного коррозионного растрескивания облученных аустенитных сталей // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 3 (63). – С. 105–117.
5. Chopra O. K. Degradation of LWR Core Internal Materials due to Neutron Irradiation, NUREG/CR-7027, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2010.
6. Nishioka H., Fukuya K., Fujii K., Torimaru T. IASCC Initiation in Highly Irradiated Stainless Steels under Uniaxial Constant Load Conditions // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – V. 45, N 10. – P. 1072–1077.
7. Post-irradiation SCC investigations on highly irradiated core internals component materials / A. Toivonen, P. Aaltonen, W. Karlsen et. al. // Proceedings of Fontevraud 6 Conference "Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs", 18–22 Sept. 2006, Royal Abbey, France.
8. Takakura K., Nakata K., Kubo N., Fujimoto K., Sakima K. IASCC Evaluation Method of Irradiated Cold Worked 316SS Baffle Former Bolt in PWR Primary Water // Proc. of the ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP 2009, Prague, Czech Republic, 2009. – PVP2009-77279.
9. Conermann J., Shogan R., Fujimoto K., Yonezawa T., Tamaguchi Y. Irradiation effects in a highly irradiated cold worked stainless steel removed from a commercial PWR // Proc. of 12th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, USA, August 14–18, 2005. – 2005. – P. 277–287.
10. Freyer P., Mager T., Burke M. Hot cell crack initiation testing of serious heats of highly irradiated 316 stainless steel components obtained from three commercial PWRs // Proc. of 13th Intern. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Canada, August 19–23, 2007.
11. Куревич И. П., Марголин Б. З., Прокошев О. Ю., Кохонов В. И. Механические свойства аустенитных сталей при нейтронном облучении: влияние различных факторов // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 4 (48). – С. 55–68.
12. Effect of neutron irradiation on tensile properties of materials for pressure vessel internals of WWER type reactors / A. A. Sorokin, B. Z. Margolin, I. P. Kursevich et. al. // J. Nucl. Mater. – 2014. – V. 444. – P. 373–384.
13. Fukuya K. Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2013. – V. 50, N 3. – P. 213–254.
14. Pokor C., Courtemanche G., Tanguy B., Massaud J.-P., Monteil N. IASCC of Core Internals of PWRs: EDF R&D and Engineering program to assess internals lifetime management, In: Fontevraud 7 Symposium – Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs, Avignon, France, 26–30 September 2010, Paris, France, SFEN.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РОСТА КОРОТКИХ И ДЛИННЫХ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ОБЛУЧЕННЫХ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗЦАХ

### Часть 1. Постановка задачи. Исследование влияния остроты исходного надреза на кинетические диаграммы роста усталостных трещин в образцах

В. И. СМИРНОВ, канд. техн. наук, А. И. МИНКИН, Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, В. И. КОХОНОВ

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

Поступила в редакцию 8.02.2019

После доработки 12.03.2019

Принята к публикации 18.03.2019

Рассмотрены основные методические особенности исследования кинетики роста усталостных трещин при испытании облученных малоразмерных образцов. Исследовано влияние остроты исходного надреза на кинетические диаграммы роста длинных усталостных трещин в образцах. На базе проведенных экспериментальных исследований выполнена оценка размеров зоны влияния концентратора напряжений в зависимости от его типа в применяемых малоразмерных образцах. Выполнен краткий литературный обзор основных проблем при исследовании кинетики роста коротких усталостных трещин. Сформулированы задачи дальнейших исследований.

*Ключевые слова:* аустенитная сталь, нейтронное облучение, циклическая трещиностойкость, кинетика роста коротких и длинных усталостных трещин

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Федорова В. А., Кохонов В. И., Козлов А. В., Евсеев М. В., Козманов Е. А. Исследование влияния нейтронного облучения на статическую и циклическую трещиностойкость хромоникелевой аустенитной стали // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 1(53). – С. 111–122.
2. Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Сорокин А. А., Кохонов В. И. Влияние нейтронного облучения на скорость роста усталостных трещин в аустенитной стали 08X18H10T и металле ее сварных соединений // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 2 (74). – С. 123–138.
3. Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Сорокин А. А., Швецова В. А., Потапова В. А. Влияние радиационного набухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть II. Скорость роста усталостных трещин // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3 (87). – С. 192–210.
4. ASTM E647–99. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, Annual Book of ASTM Standards, Section 3. – V. 03.01., pp. 1040–1085.
5. RCC-MR, Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands, Appendix A16, Edition 2002, AFCEN, France, 2002.
6. ISO 12108:2002. Metallic materials. Fatigue testing. Fatigue crack growth method.
7. Херцберг Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. – М.: Металлургия, 1989, 575 с.
8. РД ЭО 1.1.2.09.0714–2011. Методика расчета прочности основных элементов реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. – М.-СПб., 2011. – 121 с.
9. Kelegemur M. H., Chaki T. K. The effect of various atmospheres on the threshold fatigue crack growth behavior of AISI 304 stainless steel // Int. J. of Fatigue. – 2001. – V. 23. – P. 169–174.
10. Forth S. C., Newman J. C. Jr., Forman R. G. Anomalous Fatigue Crack Growth Data Generated using the ASTM Standards. 35<sup>th</sup> NSFFM, Reno, NV, May 2005.
11. Смирнов В. И., Ильина Т. А. Исследование влияния уровня нагружения и асимметрии цикла нагружения на кинетику роста краевых трещин в цилиндрических образцах с кольцевым надрезом // Заводская лаборатория. – 1989. – № 6. – С.73–77.

12. Small-Crack Test Methods, ASTM STP 1149 / Larsen, J. M., Allison, J. E., Eds., – 1992. – 356 p.
13. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. Методические указания. РД 50-345–82, 1983. – 95 с.
14. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчета конструктивных элементов на прочность / Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 302 с.
15. Glinka G., Newport A. Universal features of elastic notch tip stress fields // *Int. J. of Fatigue*. – 1987. – V. 9, N 3. – P. 143–150.
16. Эль Хаддад М. Х., Смит К. Н., Топпер Т. Х. Распространение коротких усталостных трещин // *Теоретические основы инженерных расчетов*. – 1979. – № 1. – С. 43–47.
17. Кудрявцев А. П. Нераспространяющиеся усталостные трещины. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.
18. About the fatigue crack propagation threshold of metals as a design criterion: A review / U. Zerbst, M. Vormwald, R. Pippan et al. // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2016. – V. 153. – P. 190–243.
19. Mc Dowell D. L. Basic issues in the mechanics of high cycle metal fatigue // *Int. J. of Fracture*, 1996. – V. 80. – P. 103–145.
20. Tanaka K., Nakai Y. Propagation and non-propagation of short fatigue cracks at a sharp notch // *Fatigue and Fracture Engineering Material and Structure*. – 1983. – N 6 (4). – P. 315–327.
21. Shin C. S., Smith R. A. Fatigue crack growth at stress concentrations: the role of notch plasticity and crack closure // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1998. – N 29 (3). – P. 301–315.
22. Dong P., Hong J. K., Cao Z. Stresses and stress intensities at notches: ‘anomalous crack growth’ revisited // *Int. J. of Fatigue*. – 2003. – V. 25. – N 9–11. – P. 811–825.
23. Терентьев В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 288 с.
24. Ritchie R. O., Lankford J. Small fatigue cracks: a statement of the problem and potential solutions // *Material Science and Engineering*. – 1996. – V. 84. – P. 11–16.
25. Кишкина С. И. Структурные особенности роста коротких трещин в высокопрочной стали // *Физико-химическая механика материалов*. – 1991. – Т. 27, № 5. – С. 48–52.
26. Hussain K., De los Rios, E. R., Navarro A. A two-stage micromechanics model for short fatigue cracks // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1993. – V. 44, N 3. – P. 425–436.
27. Ciavarella M., Monno F. On the possible generalizations of the Kitagawa–Takahashi diagram and of the El Haddad equation to finite life // *Int. J. of Fatigue*. – 2006. – V. 28. – P. 1826–1837.
28. Atzori B., Lazzarin P., Meneghetti G. Fracture mechanics and notch sensitivity // *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures*. – 2003. – V. 26 (3). – P. 257–267.
29. Weight functions, CTOD, and related solutions for cracks at notches / R. Jones et al. // *Engineering Failure Analysis*. – 2004. – V. 11, N 1. – P. 79–114.
30. Nishioka T., Atluri S. N. Analytical solution for embedded elliptical cracks, and finite element alternating method for elliptical surface cracks, subject to arbitrary loadings // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1983. – V. 17, N 3. – P. 247–268.
31. Kujawski D. Estimation of stress intensity factors for small cracks at notches // *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures*. – 1991. – № 14 (10). – P. 953–965.
32. Jones R., Peng D. A simple method for computing the stress intensity factors for cracks at notches // *Engineering Failure Analysis*. – 2002. – V. 9, N 6. – P. 683–702.
33. Jergesus H. A simple formula for the stress intensity factors of cracks in side notches // *Int. J. of Fracture*. – 1972. – V. 8. – P. 267–276.
34. Harkegard G. An effective stress intensity factor and the determination of the notched fatigue limit // *In Fatigue Thresholds: Fundamentals and Engineering Applications*. – V. II. – Engineering Materials Advisory Services Ltd, 1982. – P. 867–879.



35. Wormsen A., Fjeldstad A., Harkegard G.. The application of asymptotic solutions to a semi-elliptical crack at the root of a notch // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2006. – V. 73, N 13. – P. 1899–1912.
36. Fjeldstad A. Modelling of fatigue crack growth at notches and other stress raisers // Thesis for the deg. ph. doc. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, 2007. – 155 p.
37. Gross R., Mendelson A.. Plane elastostatic analysis of V-notched plates // *Int. J. of Fracture Mechanics*. – 1972. – V. 8. – P. 267–276.
38. Boukharouba T., Tamine T., Nui L. et al. The use of notch stress intensity factor as a fatigue crack initiation parameter // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1995. – V. 52. – P. 503–512.
39. Dini D., Hills D. A.. When does a notch behave like a crack? // *J. of Mech. Eng. Sc.* – 2006. – N 220. – P. 27–43.
40. Malkin J., Tetelman A.S. Relation between  $K_{Ic}$  and microscopic strength for low alloy steels // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1971. – V. 3. – P. 151–167.
41. Tobler R. L., Shu Q. S. Fatigue crack initiation from notches in austenitic stainless steels // *Cryogenics*. – 1986. – V. 26. – P. 396–401.
42. Jack A. R., Price A. T. The initiation of fatigue cracks from notches in mild steel plates // *Int. J. of Fracture Mechanics*. – 1970. – V. 6. – P. 401–409.
43. Герасимчук О. Н. Взаимосвязь между пороговыми размахами коэффициента интенсивности напряжений материала и переход от короткой к длинной трещине // *Проблемы прочности*. – 2014. – №3. – С. 77–95.
44. Miller K. J. The two thresholds of fatigue behavior // *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures*. – 1993. – V. 16. – P. 931–939.
45. Chapetti M. D., Kitano T., Tagawa T., Miyata T. Fatigue limit of blunt-notched components // *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures*. – 1998. – V. 21. – P. 1525–1536.
46. Chapetti M. D. Fatigue propagation threshold of short cracks under constant amplitude loading // *Int. J. of Fatigue*. – 2003. – V. 25. – P. 1319–1326.
47. Tanaka K., Akiniwa Y. Resistance-curve method for predicting propagation thresholds of short fatigue cracks at notches // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1988. – V. 30. – P. 863–876.
48. Meggiolaro M. A., Miranda A. C. O., Castro J. T. P. Short crack threshold estimates to predict notch sensitivity factors in fatigue // *Int. J. of Fatigue*. – 2007. – V. 29, N 9–11. – P. 2022–2031.
49. Tanaka K, Nakai Y, Yamashita M. Fatigue growth threshold of small cracks // *Int. J. of Fracture*. – 1981. – V. 17. – P. 519–533.
50. Livieri P., Tovo R. Fatigue limit evaluation of notches, small cracks and defects: an engineering approach // *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures*. – 2004 – V. 27. – P. 1037–1049.
51. Ярема С. Я. Об основах и некоторых проблемах механики усталостного разрушения // *Физико-химическая механика материалов*. – 1987. – Т. 23, № 5. – С. 17–29.
52. Suresh S. *Fatigue of Materials*, Second Edition, Cambridge University Press, 1998. – 679 p.