

СОДЕРЖАНИЕ

**Андрей Сергеевич ЗАВЬЯЛОВ. К 115-летию со дня рождения. Страницы биографии ..... 7**

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

Соколов Г. Н., Литвинова Т. Р., Зорин И. В., Харламов В. О., Артемьев А. А., Кязымов Ф. А., Титов К. Е. Формирование дисперсного игольчатого феррита в структуре хладостойких сварных швов в условиях температур до  $-70^{\circ}\text{C}$  при ручной дуговой сварке на монтаже металлоконструкций из стали 10ХСНД. Часть 1 ..... 17

Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Кормышев В. Е., Глезер А. М. Структура и свойства рельсов после экстремально длительной эксплуатации ..... 30

Атамашкин А. С., Приймак Е. Ю., Фирсова Н. В. Влияние послесварочного отпуска на механическое поведение фрикционных сварных соединений из среднеуглеродистых сталей при испытании на одноосное растяжение..... 40

Балакин С. М., Беяева Л. А., Хлямов Н. А., Петров В. А. Термоциклическая прочность чугуна СЧ20 при высокотемпературных теплосменах..... 50

Орыщенко А. С., Уткин Ю. А., Попова И. П., Петров С. Н., Цеменко А. В. Исследование характеристик жаропрочности металла центробежно-литых труб, изготовленных из сплава 45Х32Н4ЗСБ, и их сварных соединений при температурах до  $1150^{\circ}\text{C}$ . Часть 1. Жаропрочность труб при температурах до  $1100^{\circ}\text{C}$  ..... 62

Зорин И. В., Соколов Г. Н., Артемьев А. А., Дубцов Ю. Н., Денисевич Д. С., Лысак В. И., Харламов В. О. Исследование влияния соотношения легирующих элементов в системе Ni–Al–Cr–W–Mo–Ta на стойкость наплавленного металла к термической усталости ..... 74

Хромушкин К. Д., Ушаков Б. Г., Кочергин А. В., Сулеев Р. А., Парменова О. Н. Исследование триботехнических характеристик твердых сплавов в узлах трения скольжения ..... 87

Масликова Е. И., Андреева В. Д., Алексеева Е. Л., Яковлев Ю. А. Кинетика диффузии водорода в различных условиях применительно к сплаву ВТ6 ..... 98

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Макаров А. М., Никитина В. Р., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф. Оптимизация параметров процесса напыления покрытий методом ХГДН применительно к условиям производства на примере систем Ni–Ti и Ni–Al ..... 108

Бобкова Т. И., Быстров Р. Ю., Григорьев А. А., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. Технология получения наноструктурированных покрытий с использованием наночастиц карбида вольфрама и металлического хрома ..... 117

Барахтин Б. К., Жуков А. С., Камынин А. В., Гавриков И. С., Анисимов Д. М., Созинов Д. С., Федосеев М. Л. Структура и магнитные свойства материала системы Fe–Cr–Co, изготовленного методом селективного лазерного плавления ..... 125

Горбовец М. А., Косолапов Д. В., Рыжков П. В. Многоцикловая усталость металлокерамического композиционного материала на основе алюминиевого сплава марки 7075-T1, армированного частицами карбида кремния..... 131

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Розов Р. М., Борисова Н. В., Устинова Т. П. Интегральная оценка свойств полиамида-6, полимеризационно-наполненного базальтовой фиброй на стадии синтеза ..... 141

Хорова Е. А., Еремин Е. Н., Вакулов Н. В. Прогнозирование изменения свойств резин на основе гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков при термическом старении в агрессивных средах..... 149

**КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ**

Харьков О. А., Мушникова С. Ю., Парменова О. Н. Оценка коррозионной стойкости азотсодержащей стали в условиях абразивного воздействия..... 156

## РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Марголин Б. З., Морозов А. М., Пирогова Н. Е., Григорьев М. Н. Методика оценки прочности границ зерен аустенитных сталей по результатам испытаний миниатюрных образцов на ударный изгиб..... 164

Марголин Б. З., Пирогова Н. Е., Сорокин А. А., Кохонов В. И. Исследование механизмов коррозионного растрескивания под напряжением облученных аустенитных хромоникелевых сталей, используемых для внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР и PWR..... 174

Марголин Б. З., Пирогова Н. Е., Сорокин А. А., Морозов А. М. Оценка сопротивления коррозионному растрескиванию облученных аустенитных хромоникелевых сталей по результатам испытаний миниатюрных образцов на ударный изгиб ..... 200

## ХРОНИКА

Орыщенко А. С., Цуканов В. В., Савичев С. А., Нигматулин О. Э. Танковая броня в первые годы войны ..... 216

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов ..... 231

УДК 621.791.053:669.14.018.41

### ФОРМИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНОГО ИГОЛЬЧАТОГО ФЕРРИТА В СТРУКТУРЕ ХЛАДОСТОЙКИХ СВАРНЫХ ШВОВ В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУР ДО $-70^{\circ}\text{C}$ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ НА МОНТАЖЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛИ 10ХСНД. Часть 1

**Г. Н. СОКОЛОВ**, д-р техн. наук, Т. Р. ЛИТВИНОВА, И. В. ЗОРИН, канд. техн. наук, В. О. ХАРЛАМОВ, канд. техн. наук, А. А. АРТЕМЬЕВ, канд. техн. наук, Ф. А. КЯЗЫМОВ, К. Е. ТИТОВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 09.01.2020

После доработки 10.03.2020

Принята к публикации 13.03.2020

Представлен анализ металлургических приемов, обеспечивающих улучшение качества электродов для ручной дуговой сварки низкоуглеродистых низколегированных хладостойких сталей. Показано, что повысить технологические и эксплуатационные свойства сварных соединений при сверхнизких климатических температурах до  $-70^{\circ}\text{C}$  до уровня мировых аналогов можно путем осуществления микролегирования металла шва азотом, титаном, оксидом церия и наночастицами алмаза детонационного происхождения. Выявлен состав вводимой в покрытие электрода модифицирующей смеси. Установлено совокупное влияние входящих в нее компонентов на ударную вязкость металла сварного шва на стали 10ХСНД при испытаниях в диапазоне температур от  $-20$  до  $-70^{\circ}\text{C}$ . Структура металла шва состоит преимущественно из дисперсного игольчатого феррита, упрочненного наночастицами предположительно нитридов и карбонитридов титана и алюминия. Показано, что центрами кристаллизации для игольчатого феррита служат микроразмерные неметаллические включения, сформировавшиеся на ультрадисперсных нитридах титана. Выявлено, что ударная вязкость металла сварного шва при отрицательных климатических температурах превышает ее значения для швов, сваренных с использованием массово импортируемых электродов LB-52U японской фирмы KOBELCO. Результаты выполненного исследования дают возможность повысить хладостойкость сварных конструкций нефтехимического и специального назначения, базирующихся в районах Крайнего Севера РФ.

*Ключевые слова:* покрытый электрод, модифицирующая смесь, сварные швы, микролегирование, игольчатый феррит, ударная вязкость, хладостойкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-102-2-17-29

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Рыбин В. В. Хладостойкие стали для технических средств освоения арктического шельфа // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3 (59). – С. 108–126.

© 2020

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

2. Сидлин З. А. О конкурентоспособности российских сварочных электродов // Сварочное производство. – 2016. – № 8. – С. 32–38.
3. Грабин В. Ф. Металловедение сварки плавлением. – Киев: Наук. думка, 1982. – 416 с.
4. Походня И. К., Макаренко В. Д., Корсун А. О., Миличенко С. С. Влияние никеля на структуру и механические свойства шва, выполненного электродами с основным покрытием // Автоматическая сварка. – 1986. – № 2. – С. 1–5.
5. Ефименко Н. Г. Применение редкоземельных металлов в покрытиях сварочных электродов // Сварочное производство. – 1980. – № 7. – С. 28–30.
6. Мельников В. П., Михайлов-Смольняков М. С., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние редкоземельных металлов на формирование структуры и свойств низколегированного металла шва // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 1 (65). – С. 150–161.
7. Кащенко Д. А., Брусницын Ю. Д., Баранов А. В., Руссо В. А., Карпов И. Г. Разработка электродов для сварки магистральных трубопроводов и морской техники из высокопрочных низколегированных хладостойких сталей // Сварочное производство. – 2017. – № 2. – С. 21–29.
8. Pu J., Yu S., Li Y. Role of inclusions in flux aided backing submerged arc welding // Journal of Material Processing Technology. – 2017. – V. 240. – P. 145–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.016>
9. Мороз А. С., Ковалев М. А. Об эффекте металлургического воздействия композиционной сварочной проволоки с частицами  $\text{LaF}_3$  –  $\text{LaBe}$  на свойства и микроструктуру сварных соединений из высокопрочной стали // Сварка и диагностика. – 2016. – № 4. – С. 17–20.
10. Srinivasan G., Bhaduri A. K., Albert S. K. Addition of cerium oxide in the flux formulations of a basic-coated stainless steel electrode // Welding in the World. – 2013. – V. 57, Is. 1. – P. 55–63. <https://doi.org/10.1007/s40194-012-0002-6>
11. Гольдштейн М. И., Фарбер В. М. Дисперсионное упрочнение сталей нитридами. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
12. Bramfitt B. L. The effect of carbide and nitride addition on the heterogeneous nucleation behavior of liquid iron // Metallurgical Transactions. – 1970. – V. 1. – P. 1987–1995. <https://doi.org/10.1007/BF02642799>
13. Рабинович А. В., Трегубенко Г. Н., Бубликов Ю. А. Разработка и производство конструкционных сталей с карбонитридным упрочнением на основе комплексного микролегирования N–Ti–Al // Металлофизика. Новейшие технологии. – 2012. – Т. 34, № 10. – С. 1385–1395.
14. Ilman M. N., Cochrane R. S., Evans G. M. The development of acicular ferrite in reheated Ni–B–Al–N-type steel weld metals containing various levels of aluminum and nitrogen // Welding in the World. – 2015. – V. 59, Is. 4. – P. 565–575. <https://doi.org/10.1007/s40194-015-0231-6>
15. Соколов Г. Н., Лысак В. И., Зорин И. В., Артемьев А. А., Дубцов Ю. Н., Харламов В. О., Антонов А. А. Феноменологическая модель формирования центров кристаллизации в металлическом расплаве при сварке под влиянием ультрадисперсных тугоплавких компонентов // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 4 (84) – С. 159–168.
16. Соколов Г. Н., Трошков А. С., Лысак В. И., Самохин А. В., Благовещенский Ю. В., Алексеев Н. В., Цветков Ю. В. Влияние нанодисперсных карбидов WC и никеля на структуру и свойства наплавленного металла // Сварка и Диагностика. – 2011. – № 3. – С. 36–38.
17. Соколов Г. Н., Лысак В. И., Зорин И. В., Артемьев А. А., Дубцов Ю. Н., Трошков А. С. Влияние ультрадисперсных компонентов на свойства металла сварных соединений металлоконструкций для работы в условиях отрицательных температур // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 4. – С. 45–48.
18. Fattahi M., Nabhani N., Hosseini M., Arabian N., Rahimi E. Effect of Ti-based inclusions on the nucleation of acicular ferrite and mechanical properties of multipass weld et. al. // Micron. – 2013. – V. 45. – P. 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2012.11.004>.
19. Долматов, В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: свойства и применение // Успехи химии. – 2001. – Т. 70, № 7. – С. 3–11.
20. Верещагин А. А., Юрьев Г. С. Структура детонационных алмазов // Неорганические материалы. – 2003. – Т. 39, № 3. – С. 1–7.

21. Тырышкина Л. Е., Чиганова Г. А., Абкарян А. К. Влияние наноалмазов на микроструктуру никелевых покрытий // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2014. – № 2. – С. 54–58.

УДК 625.143.2:539.3

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА РЕЛЬСОВ ПОСЛЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю. Ф. ИВАНОВ<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, В. Е. ГРОМОВ<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук,  
В. Е. КОРМЫШЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, А. М. ГЛЕЗЕР<sup>3</sup>, д-р физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>2</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42, E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

<sup>3</sup>Институт металловедения и физики металлов ГНЦ РФ «ЦНИИ черной металлургии им. И.П. Бардина», 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 9/23

Поступила в редакцию 29.04.2020

После доработки 7.05.2020

Принята к публикации 25.05.2020

Выявлены закономерности и механизмы формирования структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов категории ДТ350 после пропущенного тоннажа 1411 млн. т брутто. Обнаружено образование высокодефектного поверхностного слоя с наноразмерной зеренно-субзеренной структурой (40–50 нм) колоний перлита и субмикроструктурной (150–250 нм) структурой зерен структурно-свободного феррита. Проанализировано изменение твердости, микротвердости, параметра кристаллической решетки, уровня микроискажений, скалярной и избыточной плотности дислокаций по сечению головки рельсов. Обсуждены возможные механизмы преобразования пластин цементита при экстремально длительной эксплуатации рельсов.

*Ключевые слова:* свойства, фазовый состав, рельсы, субмикро- и нанокристаллическая структура, эксплуатация.

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-102-2-30-39

### ЛИТЕРАТУРА

1. Громов В. Е., Перегудов О. А., Иванов Ю. Ф., Коновалов С. В., Юрьев А. А. Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 164 с.

2. Gromov V. E., Ivanov Yu. F., Yuriev A. B., Morozov K. V. Microstructure of quenched rails. – Cambridge: CISP, 2016. – 153 p.

3. Природа поверхностного упрочнения дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, А. А. Юрьев и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2018. – № 4. – С. 67–85.

4. Градиенты структуры и свойств поверхностных слоев дифференцированно закаленных рельсов после длительной эксплуатации / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, А. А. Юрьев и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14, № 3. – С. 297–305.

5. Преобразование карбидной фазы рельсов при длительной эксплуатации / Ю. Ф. Иванов, А. А. Юрьев, В. Е. Громов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, № 2. – С. 140–148.

6. Эволюция структуры и свойств дифференцированно закаленных рельсов в процессе длительной эксплуатации / В. Е. Громов, А. А. Юрьев, Ю. Ф. Иванов и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39, № 12. – С. 1599–1646.

7. Трансформация структуры 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации / В. Е. Громов, А. А. Юрьев, Ю. Ф. Иванов и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 128–134.
8. Egerton F. R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. – Basel: Springer International Publishing, 2016. – 196 p.
9. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials* / Kumar Challa S.S.R. (Ed.) – New York: Springer, 2014. – 717 p.
10. Carter C. B., Williams D. B. *Transmission Electron Microscopy*. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
11. Утевский Л. М. *Дифракционная электронная микроскопия в металловедении*. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
12. Томас Г., Гориндж М. Дж. *Просвечивающая электронная микроскопия материалов*. – М.: Наука, 1983. – 320 с.
13. *Электронная микроскопия тонких кристаллов* / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
14. Конева Н. А., Козлов Э. В., Тришкина Л. И., Лычагин Д. В. Дальнедействующие поля напряжений, кривизна-кручение кристаллической решетки и стадии пластической деформации. Методы измерений и результаты // *Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела. Сб. трудов международной конференции*. – Томск: ТГУ, 1990. – С. 83–93.
15. Конева Н. А., Козлов Э. В. Природа субструктурного упрочнения // *Известия ВУЗов. Физика*. – 1982. – № 8. – С. 3–14.
16. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. *Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Учебное пособие для вузов. 3-е изд.* – МИСИС, 1994. – 328 с.
17. Gavriljuk V. G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires // *Scripta Mater.* – 2001. – V. 45. – P. 1469–1472.
18. Li Y. J., Chai P., Bochers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite // *Acta Mater.* – 2011. – V. 59. – P. 3965–3977.
19. Gavriljuk V. G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation // *Mater. Sci. and Eng. A*. – 2003. – V. 345. – P. 81–89.

УДК 621.791.14:620.172.242

#### **ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕСВАРОЧНОГО ОТПУСКА НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ФРИКЦИОННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ**

А. С. АТАМАШКИН<sup>1</sup>, Е. Ю. ПРИЙМАК<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук, Н. В. ФИРСОВА<sup>3</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>ФГБОУВО «Оренбургский государственный университет», 460018, Оренбург, пр. Победы, 13

<sup>2</sup>ОАО «Завод бурового оборудования», 460026, Оренбург, пр. Победы, 118

<sup>3</sup>Орский гуманитарно-технологический институт (филиал) ОГУ, 462403, Орск, пр. Мира, 15А,  
E-mail: [e.prijmak@zbo.ru](mailto:e.prijmak@zbo.ru)

Поступила в редакцию 7.04.2020

После доработки 10.06.2020

Принята к публикации 14.06.2020

Приведен анализ механического поведения фрикционных образцов сварных соединений из сталей 32Г2 и 40ХН, изготовленных посредством ротационной сварки трением. Проанализировано

влияние различных температурных режимов послесварочного отпуска на механические свойства и деформационное поведение при испытании на одноосное растяжение. В образцах со сварным соединением выявлены уязвимые места, в которых произошло зарождение и распространение трещин. Установлено, что при данном сочетании сталей послесварочный отпуск сварного соединения способствует снижению характеристик интегральной прочности в условиях статического растяжения наряду с существенным снижением относительной продольной деформации испытанных образцов.

*Ключевые слова:* ротационная сварка трением, зона термомеханического влияния, среднеуглеродистые стали, одноосное растяжение, механические свойства, деформация

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-40-49

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. № 195846 (приоритет от 09.11.65 г.) / Клименко Ю. В. Способ сварки металлов трением.
2. Ramesh A.P., Subramaniyan M., Eswaran P. Review on Friction Welding of Similar/Dissimilar Metals // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1362. DOI: 10.1088/1742-6596/1362/1/012032
3. Shinde G., Dabeer P. Review of Experimental Investigations in Friction Welding Technique // IRA-International Journal of Technology & Engineering, 2017. – P. 373–384. DOI: 10.21013/jte.ICSESD 201736
4. Chainarong S., Meengam C., Tehyo M. Rotary Friction Welding of Dissimilar Joints between SSM356 and SSM6061 Aluminium Alloys Produced by GISS. Engineering Journal. – 2017. – V. 21, Is. 1. – P. 181–191. DOI: 10.4186/ej.2017.21.1.181
5. ТУ 3668-002-01423045–2008 Трубы бурильные стальные универсальные. – Введ. 2018-01-04. – Ростехрегулирование, 2018. – 20 с.
6. Лачинян Л. А. Работа бурильной колонны. – М.: Недра, 1992. – 214 с.
7. Iracheta O., Bennett C. J., Sun W. A sensitivity study of parameters affecting residual stress predictions in finite element modelling of the inertia friction welding process // International Journal of Solids and Structures. – 2015. – V. 71. – P. 180–193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.06.018>
8. Dong H., Li Y., Li P., Hao X., Xia Y., Yang G. Inhomogeneous microstructure and mechanical properties of rotary friction welded joints between 5052 aluminum alloy and 304 stainless steel // Journal of Materials Processing Tech. – 2019. – V. 272. – P. 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.039>
9. Li P., Dong H., Xia Y., Hao X., Wang S., Pan L., Zhou J. Inhomogeneous interface structure and mechanical properties of rotary friction welded TC4 titanium alloy/316L stainless steel joints // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – V. 33. – P. 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.001>
10. Атамашкин А. С., Приймак Е. Ю., Кузьмина Е. А. Эволюция структуры и механических свойств сварных соединений, выполненных ротационной сваркой трением, при нагреве // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 14–18. DOI: 10.24892/RIJIE/ 2019010311
11. ГОСТ Р 50278–92 Трубы бурильные с приваренными замками. М.: Стандартинформ, 2010. – 16 с.
12. Ивашко В. В., Кириленко О. М., Вегера И. И., Семенов Д. А. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства горячекатаных труб, изготовленных из стали 32Г2 // Литье и металлургия. – 2011. – № 4 (63). – С. 108–114.
13. Приймак Е. Ю., Яковлева И. Л., Терещенко Н. А., Степанчукова А. В., Морозова А. Н. Эволюция структуры и механизм образования сварных соединений среднеуглеродистых сталей при ротационной сварке трением // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120, № 11. – С. 1187–1192.

14. Кузьмина Е.А., Приймак Е.Ю. Влияние силы проковки на формирование структуры и свойств сварных соединений из среднеуглеродистых сталей в процессе ротационной сварки трением // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2019. – № 2. – С. 34–42.

15. Selvamani S.T., Palanikumar K. Optimizing the friction welding parameters to attain maximum tensile strength in AISI 1035 grade carbon steel rods. Measurement. – 2014. – V. 53. – P. 10–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.03.008>

16. Emre H.E., Kaçar R. Fatigue behavior of friction welded drill pipes // Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. – 2013. – V. 28, N 2. – P. 417–426.

УДК 669.13:620.181.4:539.434

## ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЧУГУНА СЧ20 ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОСМЕНАХ

С. М. БАЛАКИН, Л. А. БЕЛЯЕВА, канд. техн. наук, Н. А. ХЛЯМКОВ, В. А. ПЕТРОВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 1.02.2018

После доработки 3.03.2020

Принята к публикации 4.04.2020

Для прогнозирования долговечности изложниц из чугуна СЧ20 в условиях термоусталости при наливке жидкого металла исследована термоциклическая прочность чугуна марки СЧ20. Испытания образцов проведены путем циклического нагрева в печи до максимальных температур (от 700 до 1000°С) и последующего охлаждения на воздухе и в воде. На основе металлографических измерений глубины трещин в образцах и расчетов методом конечных элементов размаха деформаций получены зависимости типа Коффина и скорости роста трещины в образцах. Результаты исследований позволяют прогнозировать долговечность изложниц из чугуна СЧ20 в условиях термоусталости при наливке жидкого металла.

*Ключевые слова:* изложница, чугун СЧ20, термоциклическая прочность, долговечность, фазовые превращения.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-50-61

### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. В., Лубяной Д. А., Самсонов Ю. Н., Каминская И. А., Лубяная С. В. Разработка технологии внепечной обработки доменного чугуна для изготовления сменного металлургического оборудования с повышенной эксплуатационной стойкостью // Металлург. – 2014. – № 6. – С. 86–88.

2. Пантелеева А. В., Ковалевич Е. В. Компьютерное моделирование напряженного состояния изложниц для слитков высоколегированной стали // Литейное производство. – 2013. – № 7. – С. 21–23.

3. Машиностроение. Энциклопедия. Стали. Чугуны. Т. II–2 / Г. Г. Мухин, А. И. Беляков, Н. Н. Александров и др. / Под общ. ред. О. А. Банных и Н. Н. Александрова. – 2000. – 784 с.

4. Чугун. Справочник / Под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.

5. ОСТ 5.9299–79. Термическая усталость и формоизменение при теплосменах. Методы испытаний.

6. Термопрочность деталей машин / Под ред. И. А. Биргера и Б. Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1975.

7. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272с.

8. Методические рекомендации МР 125-02–95. Правила составления расчетных схем и определения параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами. – М., 1995.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖАРОПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА ЦЕНТРОБЕЖНО-ЛИТЫХ ТРУБ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СПЛАВА 45X32H43СБ, И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 1150°С.**

**Часть 1. Жаропрочность труб при температурах до 1100°С**

А. С. ОРЫЩЕНКО, чл.-кор. РАН, Ю. А. УТКИН, И. П. ПОПОВА, канд. техн. наук,  
С. Н. ПЕТРОВ, канд. хим. наук, А. В. ЦЕМЕНКО

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

Поступила в редакцию 12.03.2020

После доработки 18.03.2020

Принята к публикации 24.03.2020

Исследована жаропрочность сплава 45X32H43СБ, разработанного в ЦНИИ КМ «Прометей» для змеевиковых систем высокотемпературных установок получения этилена. Исследовано макрокристаллическое строение металла центробежно-литых труб, проведен количественный анализ дисперсных фаз в межграничном пространстве сплава. Показано, что разработанный сплав обладает структурной стабильностью и способностью сопротивляться высокотемпературной ползучести при рабочих температурах 1000–1100°С.

*Ключевые слова:* жаропрочный сплав, длительная прочность, макрокристаллическое строение, центробежно-литые трубы, карбиды.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-62-73

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Исследование свариваемости жаростойких сплавов 40ХН35Б, 40ХН48В, 15ХН34Б для центробежнолитых труб и разработка композиции шва / К. А. Ющенко, Н. И. Пинчук, А. А. Наконечный и др. // Автоматическая сварка. – 1985. – № 7 (388). – С. 26–31.
2. Королев Н. М., Потапов И. И., Шишкалов С. В. Заварка дефектов литья из сплава 50Х25Н35В5К15С // Сварочное производство. – 1983. – № 7. – С. 39.
3. Земзин В. Н. Жаропрочность сварных соединений. – Л.: Машиностроение, 1972, С. 272.
4. Song R., Zhang M., Dong J., Du C. Investigation of Cr34Ni45 ethylene cracking furnace tube in service // Advanced Materials Research. – 2013. – Т. 834–836. – С. 390–400.
5. 5. Materials\_Development: Carburization-resistant/creep-resistant materials. Heat resistant alloy for cracking and reformer tubes KHR45A. URL: [https://www.kubota.com/products/materials/technology/materials\\_development/](https://www.kubota.com/products/materials/technology/materials_development/) (reference date 06/07/2020)
6. Centralloy® ET 45 Micro. Material data sheet: Schmidt + Clemens Group. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/10921567/centralloyr-et-45-micro-schmidt-clemens> (reference date 06/07/2020)
7. Colwell R. L, Hoffman J. J. Weld cracking in modified heat resistant casting, a microstructural investigation // Proceedings of the NACE international annual conference corrosion, 1998. – P. 423.
8. Пташник А. В., Кондратьев С. Ю., Анастасиади Г. П., Петров С. Н. Превращения упрочняющих карбидных фаз в жаропрочных сплавах HP40Nb при высокотемпературной эксплуатации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – № 3. – С. 40–53.
9. Кондратьев С. Ю., Анастасиади Г. П., Петров С. Н., Пташник А. В., Святышева Е. В. Морфологические характеристики карбидов хрома в жаропрочных сплавах HP40NbTi в литом состоянии и после высокотемпературной выдержки // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2016. – № 1(727). – С. 22–29.
10. Kondratev S. Yu., Sviatysheva E. V., Anastasiadi G. P., Petrov S. N. Fragmented structure of niobium carbide particles in as-cast modified hp alloys // Acta Materialia. – 2017. – V. 127. – P. 267–276.



11. Орыщенко А. С., Уткин Ю. А., Петров С. Н., Пташник А. В. Исследования макрокристаллического строения центробежно-литых труб и количественный анализ дисперсных фаз в межграничном пространстве сплавов базовой композиции 50X32H43 при рабочих температурах. // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 73–84.

12. Song R., Wu S. Microstructure evolution and residual life assessment of service exposed Cr35Ni45 radiant tube alloy // Engineering Failure Analysis. – 2018. – N 88. – P.63–72.

13. Рудской А. И., Кондратьев С. Ю., Анастасиади Г. П., Орыщенко А. С., Фукс М. Д., Петров С. Н. Трансформация структуры жаропрочного сплава 0,45С–26Cr–33Ni–2Si–2Nb при длительной высокотемпературной выдержке // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 10 (700). – С. 7–14.

УДК 669.018.44:539.434

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМЕ Ni–Al–Cr–W–Mo–Ta НА СТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА К ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

И. В. ЗОРИН, канд. техн. наук, Г. Н. СОКОЛОВ, д-р техн. наук, А. А. АРТЕМЬЕВ, канд. техн. наук, Ю. Н. ДУБЦОВ, канд. техн. наук, Д. С. ДЕНИСЕВИЧ, канд. техн. наук, В. И. ЛЫСАК, д-р техн. наук, В. О. ХАРЛАМОВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 27.04.2020

После доработки 12.05.2020

Принята к публикации 19.05.2020

Представлен анализ влияния соотношения легирующих элементов в системе Ni–Al–Cr–W–Mo–Ta на стойкость наплавленного металла к термической усталости. Установлено совокупное влияние легирующих элементов на стойкость наплавленного металла к появлению трещин в условиях циклического изменения температуры в диапазоне 20–1150°C. Показано, что в рассматриваемой системе легирования чувствительность металла к образованию трещин термической усталости преимущественно зависит от количества тугоплавких элементов, обуславливающих образование топологически плотноупакованных (ТПУ)-фаз. Содержание в наплавленном металле 3,5 мас.% вольфрама, 3,0 мас.% молибдена, 2,5 мас.% тантала не вызывает появления усталостных трещин. Разработанный тип наплавленного металла обеспечивает повышенный уровень термической стойкости и стойкости к окислительному износу по сравнению с высоколегированными никелевым и кобальтовым промышленными сплавами.

*Ключевые слова:* наплавленный металл, термоциклирование, тугоплавкие легирующие элементы, топологически плотноупакованные (ТПУ)-фазы, трещины термической усталости, термическая стойкость, окислительный износ.

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-102-2-74-86

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kohopaa J., Hakonen H., Kivivuori S. Wear resistance of hot forging tools surfaced by welding // Wear. – 1989. – V. 130. – P. 103–112. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(89\)90225-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(89)90225-1)

2. Соколов Г. Н. Новые термостойкие композиционные материалы для наплавки на прессовый инструмент // Вопросы материаловедения. – 2004. – № 4. – С. 51–60.

3. Каблов Е. Н., Бунтушкин В. П., Поварова К. Б., Базылева О. А., Морозова Г. И., Казанская Н. К. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al // Металлы. – 1999. – № 1. – С. 58–65.

4. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Базылева О. А. Литейные конструкционные сплавы на основе алюминиды никеля // Двигатель. – 2010. – № 4. – С. 24–25.

5. Бондаренко Ю. А., Кузьмина Н. А., Базылева О. А., Раевских А. Н. Исследование структуры и фазового состава интерметаллидного сплава системы NiAl–Ni<sub>3</sub>Al, полученного методом высоко-

градиентной направленной кристаллизации // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 2 (94). – С. 52–60. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2018-94-2-52-60>.

6. Schnell A., Hoebel M., Samuleson J. Study of the weldability of gamma prime hardened superalloys // *Advanced Materials Research*. – 2011. – V. 278. – P. 434–439. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.278.434>.

7. Соколов Г. Н., Зорин И. В., Цурихин С. Н., Арисова В. Н., Лысак В. И. Электрошлаковая наплавка термостойкого сплава на основе Ni<sub>3</sub>Al на сталь с целью упрочнения инструмента для горячего деформирования сталей // *Вопросы материаловедения*. – 2004. – № 2. – С. 87–98.

8. Лукин В. И., Базылева О. А., Ковальчук В. Г., Голев Е. В., Ходакова Е. А. Исследование свойств отливок из интерметаллидного сплава ВКНА-1ВР после исправления дефектов методом сварки // *Сварочное производство*. – 2014. – № 10. – С. 5–12.

9. Сорокин Л. И. Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов // *Сварочное производство*. – 1999. – № 12. – С. 11–17. <https://doi.org/10.1080/09507110009549215>.

10. Wu S., Shao L., Li Z. Effects of service thermal cycles on the microstructure and mechanical property of K4648 superalloy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – V. 683. – P. 533–541. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.122>.

11. Максютя И. И., Кляс О. В., Квашицкая Ю. Г., Мьяльница Г. Ф., Михнян Е. В. Технологические особенности высокохромистого никелевого сплава, комплексно-легированного рением и танталом // *Современная электрометаллургия*. – 2014. – № 1. – С. 41–48.

12. Патент РФ № 2478029. Композиционная проволока для сварки и наплавки / Дубцов Ю. Н., Зорин И. В., Соколов Г. Н., Лысак В. И. Оpubл. 27.03.2013 // Бюл. № 9.

13. Sokolov G. N., Zorin I. V., Artemiev A. A., Elsukov S. K., Dubtsov Yu. N., Lysak V. I. Thermal and wear-resistant alloy arc welding depositions using composite and flux-cored wires with TiN, TiCN, and WC nanoparticles // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – V. 272. – P. 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.014>.

14. Бабинец А. А. Методика оценки термической стойкости многослойного наплавленного металла // *Автоматическая сварка*. – 2015. – № 10. – С. 49–53.

15. Бабинец А. А., Рябцев И. А., Кондратьев И. А., Рябцев И. И., Гордань Г. Н. Исследование термической стойкости наплавленного металла, предназначенного для восстановления прокатных валков // *Автоматическая сварка*. – 2014. – № 5. – С. 17–21.

16. Соколов Г. Н., Артемьев А. А., Зорин И. В., Лысак В. И., Литвиненко-Арьков В. Б. Диагностика износостойкости наплавленного металла методом склерометрии // *Сварка и диагностика*. – 2012. – № 2 (март–апрель). – С. 34–39.

17. Кривоносова Е. А., Щицын Ю. Д., Акулова С. Н., Мышкина А. В., Неулы-бин С. Д., Белинин Д. С. Снижение дефектности жаропрочных никелевых сплавов в технологиях наплавки // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 12–19. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.02.

18. Петрушин Н. В., Елютин Е. С. Влияние легирования на температуру плавления интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al // *Вопросы материаловедения*. – 2017. – № 1 (89). – С. 75–83.

19. Белявин А. Ф., Куренкова В. В., Федотов Д. А. Долговечность наплавленных ремонтных швов на монокристалльном жаропрочном никелевом сплаве в условиях циклического окисления // *Автоматическая сварка*. – 2014. – № 2. – С. 13–24.

УДК 669.295:669.788:533.15

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

К. Д. ХРОМУШКИН, канд. техн. наук, Б. Г. УШАКОВ, канд. техн. наук, А. В. КОЧЕРГИН,  
Р. А. СУЛЕЕВ, О. Н. ПАРМЕНОВА

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

Поступила в редакцию 25.03.2018  
После доработки 17.04.2020  
Принята к публикации 14.05.2020

Приведены экспериментальные данные по исследованию параметров трения твердых сплавов в узлах трения скольжения, включая температуру нагрева, шероховатость поверхности, износ и коэффициент трения в зависимости от длительности испытания и пути трения.

*Ключевые слова:* трение, износ, твердые сплавы, шероховатость поверхности, коэффициент трения, нагрев

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-87-97

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Проников А. С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 590 с.
2. Кипарисов С. С., Левинский О. Я., Петров А. П. Карбид титана (получение, свойства и применение). – М.: Metallurgia, 1987.
3. Производство и применение твердых сплавов / О. Н. Эйдук и др. – М.: Metallurgia, 1981.
4. Износостойкие сплавы. – М.: Машиностроение, 2005. – 428 с
5. Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков В. Н. Трение и износ в экстремальных условиях. Справочник. – М.: Машиностроение, 1986.
6. Толстов-Анциферов И. А. Износостойкие наплавочные материалы. – М.: Машиностроение, 2005. – 206 с.
7. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981.
8. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1998.
9. Spijker P., Anciaux G., Molinari J. F. Relations between roughness, temperature and dry sliding friction at the atomic scale // Tribology International. – 2013. – V. 59. – P. 222–229.
10. Blau P. The significance and use of the friction coefficient // Tribology International. – 2001. – V. 34. – P. 585–591.
11. Person B. N., Albohr O., Tartaglino U., Volokitin A., Tosarti E. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing rubber friction and adhesion // Journal of Physics Condensed Matter. – 2005. – V. 17.
12. Spijker P., Anciaux G., Molinari J. F. Dry sliding contact between rough surfaces at the atomistic scale // Tribology Letters. – 2011. – V. 44. – P. 279–285.
13. Burwell J. T., Kaye J., Nijmegen D. W., Morgan D. A. // Journal Apply. Mech. – 1941. – V. 8, N 2.
14. Пружанский Л. Ю., Натчук А. И. Исследование влияния шероховатости стальной поверхности на износ некоторых композитных материалов на основе фторопласта-4 // Трение, изнашивание и качество поверхности. – М.: Наука, 1973. – С. 90–103.
15. Жигаев В. Д., Насиров С. М. О микрогеометрии поверхностей трения при изнашивании абразивной прослойкой // Трение, изнашивание и качество поверхности. – М.: Наука, 1973. – С. 104–106.
16. Хрущев М. М., Пружанский Л. Ю. Интегральная оценка истирающей способности стальной обработанной поверхности // Трение, изнашивание и качество поверхности. – М.: Наука, 1973. – С. 107–118.
17. ГОСТ 27964–88 Измерение параметров шероховатости. – М.: Изд-во стандартов, 1992.

## КИНЕТИКА ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СПЛАВУ ВТ6

Е. И. МАСЛИКОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В. Д. АНДРЕЕВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Е. Л. АЛЕКСЕЕВА<sup>2</sup>,  
Ю. А. ЯКОВЛЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, E-mail: infoimmit@spbsty.ru*

*<sup>2</sup>ФГБУН «Институт проблем машиноведения Российской Академии наук» (ИП Маш РАН),  
199178, Санкт-Петербург, Большой пр. Васильевского Острова, 61*

Поступила в редакцию 17.03.2020

После доработки 22.06.2020

Принята к публикации 29.06.2020

Выполнены исследования диффузии водорода в сплаве ВТ6 после различных видов термической обработки и провоцирующего наводороживания. Проанализировано влияние микролегирования на склонность к образованию гидридов и к охрупчиванию титановых сплавов, а также влияние оксидной пленки на наводороживание при термической обработке без защитной атмосферы.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, наводороживание, легирование, оксидная пленка

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-98-107

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гельд П. В., Рябов Р. А. Водород в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1974. – 272 с.
2. Цвиккер У. Титан и его сплавы / Пер. с нем. – Берлин – Нью-Йорк, 1974; М.: Металлургия, 1979. – 512 с.].
3. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 215 с.
4. Шмыков А. А., Хорошайлов В. Г., Гюлиханданов Е. Л. Термодинамика и кинетика процессов взаимодействия контролируемых атмосфер с поверхностью стали. – М.: Металлургия, 1991. – 160 с.
5. Колачаев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1981. – 416 с.
6. Eliezer D., Tal-Gutelmacher E., Cross C. E., Boellinghaus T. Hydrogen absorption and desorption in a duplex annealed Ti–6Al–4V alloy during exposure to different hydrogen-containing environments // *Materials Science and Engineering*. – 2006. – A433. – P. 298–304.
7. Бурнышев И. Н., Калюжный Д. Г. О катодном наводороживании титана // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2014. – Т. 16, №2. – С. 250–256.
8. ГОСТ 24956–81. Титан и сплавы титановые. Метод определения водорода. – М.: Изд-во стандартов, 1997.
9. Полянский В. А., Полянский А. М., Козлов Е. А. Новый измерительный комплекс для абсолютного определения содержания водорода в материалах водородной энергетики // Третья Российская конференция «Физические проблемы водородной энергетики», 20–22 ноября 2006 г., Санкт-Петербург. ФТИ им. А.Ф. Иоффе. – 2006. – С. 110–112.
10. Кудинова Н. Р., Полянский В. А., Полянский А. М., Яковлев Ю. А. Определение энергий связи растворенного водорода на основной модели многоканальной диффузии в твердом теле // *Физико-математические науки*. – 2015. – № 4 (230). – С. 9–23.
11. Металлография титановых сплавов / Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун и др. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
12. Face-centered tetragonal titanium hydrides in fine-grained commercial pure (grade 2) titanium / Z. Z. Li, P. Ou, N. Sun et al. // *Materials Letters*. – 2013. – N 8, V. 105. – P. 16–19.
13. Мерсон Е. Д. Исследование механизма разрушения и природы акустической эмиссии при водородной хрупкости низкоуглеродистой стали // Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Тольятти, 2016.

14. Полетаев Д. О. Прогноз растворимости водорода и кремния в  $\alpha$ -Ti методом функционала электронной плотности // Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Белгород, 2016.
15. Головин П. В., Медведева Н. А., Скрыбина Н. Е.. Сорбционная способность сплавов состава  $Ti_xV_{1-x}$  по отношению к водороду // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2013. – Т. 15, N 2.
16. [Zhu T.](#), [Li M.](#) Effect of 0,77 %wt H addition on the microstructure of Ti–6Al–4V alloy and mechanism of  $\delta$  hydride formation // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – V. 481, Iss. 1–2. – P. 480–485.
17. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Interaction of Hydrogen with Aerospace Titanium Alloys. – Negev, Beer-Sheva 84105, Israel, 2003.
18. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Hydrogen-Assisted Degradation of Titanium Based Alloys/ Materials Transactions. – V. 45, N 5. – 2004. – P. 1594–1600.
19. Жарков А. Ю., Рудских В. В., Левченкова О. Н., Волкова Т. С., Светлаков С. В. Исследование процесса гидрирования дроби титана при пониженном давлении водорода. <http://www.chmz.net/press/news-chmz/files/2014-04-15/13/14.pdf>
20. Tao S., Notten P., Van Santen R., Jansen A. Density functional theory studies of the hydrogenation properties of Mg and Ti // Physical Review B. – 2009. – N 4, V. 79 (14). – P. 144–121.
21. Гюлиханов Е. Л., Кисленков В. В., Хайдоров А. Д. Термическая обработка металлов. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. – 2014. – 166 с.
22. Ливанов В.А., Буханцев А. А., Колачев Б. А. Водород в титане. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 246 с.

УДК 621.762:621.793.7

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ХГДН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ПРОИЗВОДСТВА НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМ Ni–Ti И Ni–Al

А. М. МАКАРОВ, В. Р. НИКИТИНА, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ

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

Поступила в редакцию 18.02.2020

После доработки 21.03.2020

Принята к публикации 24.03.2020

Разработаны практические рекомендации использования метода «холодного» газодинамического напыления для получения функциональных покрытий в условиях производства. Исследование было проведено с использованием порошков из никеля, титана и алюминия марок: ПНЭ-1 (Ni), ПТОМ-1 (Ti) и ПА-ВЧ (Al). На примере механических смесей (Ni + Ti) и (Ni + Al) были оптимизированы температурно-скоростные параметры процесса, обеспечивающие высокую адгезию покрытия при максимальной производительности и высоком коэффициенте использования порошка на установке ДИМЕТ-403.

*Ключевые слова:* порошки, защитные покрытия, лазерная обработка, «прекурсор», газотермическое напыление, сверхзвуковое «холодное» газодинамическое напыление.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-108-116

### ЛИТЕРАТУРА

1. Makarov A. M., Gerashchenkov G. D., Aleksandrov S. E., Markov M. A., Gerashchenkova E. Yu., Belyakov A. N., Byakova A. D. Study of the Method of Obtaining Functional Interest-Metallic Coatings Based on Ni–Ti Reinforced with WC Nanoparticles // Key Engineering Materials. – 2019. – V. 822. – P. 760–767.
2. Бобкова Т. И. Деев А. А., Быстров Р. Ю., Фармаковский Б. В. Нанесение износостойких покрытий с регулируемой твердостью с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления // Металлообработка. – 2012. – № 5–6. – С. 45–49.

3. Геращенко Д. А., Макаров А. М., Геращенко Е. Ю., Васильев А. Ф. Получение функционального интерметаллидного покрытия Ni–Ti путем комбинации технологий гетерофазного переноса и лазерной обработки // Вопросы материаловедения. – 2018. – №3 (95). – С. 102–110.
4. Макаров А. М., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф. Оптимизация параметров процесса напыления покрытий методом ХГДН применительно к условиям производства на примере порошка алюминия // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2 (90). – С. 116–123.
5. Irissou E., Legoux J.-G., Arsenault B., Moreau C. Investigation of Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Cold Spray Coating // Thermal Spray Technol. – 2007. – V. 16, N 5–6. – P. 661–668.
6. Guo X., Zhang G., Li W.Y., Dembinski L., Gao Y., Liao H., Coddet C. Microstructure, microhardness and dry friction behavior of cold-sprayed tin bronze coatings // Applied Surface Science. – 2007. – V. 254. – P. 1482–1488.
7. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
8. Li W.-Y., Li C.-J., Liao H., Coddet C. Effect of heat treatment on the microstructure and microhardness of cold-sprayed tin bronze coating // Applied Surface Science. – 2007. – V. 253, N 14. – P. 5967–5971.
9. 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. – V. 2, N 94. – P. 81–87.
10. Nielsen S. E. Laser fusing-a technique for surface improvement. – Industrial Laser Solutions, 2009, P. 13.
11. Mathew R., Stoddart P., Nolan D., Durandet Y. Thermal modification of zinc-aluminum coated steel using lasers // Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2011). – P. 457–462.
12. Металлы с памятью формы. Механизм эффекта памяти формы [Электронный ресурс] URL: <http://uas.su/books/newmaterial/101/razdel101.php> (дата обращения: 26.06.2019).
13. Каблов Е. Н., Бунтушкин В. П., Поварова К. Б., Базылева О. А., Морозова Г. И., Казанская Н. К. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al. – М.: ВИАМ, 1998. – P. 21.
14. Гринберг Б. А., Иванов М. А. Интерметаллиды Ni<sub>3</sub>Al и TiAl: микроструктура, деформационное поведение. – Екатеринбург, 2002.
15. Износостойкие материалы для пар трения, работающих при высоких скоростях скольжения [Электронный ресурс] URL: <http://chiefengineer.ru> (дата обращения: 25.06.19).

УДК 621.762.2:621.793.7

### ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОЧАСТИЦ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА И МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ХРОМА

Т. И. БОБКОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ<sup>1</sup>, А. А. ГРИГОРЬЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук,  
Е. А. САМОДЕЛКИН<sup>1</sup>, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук

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

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), 195251,  
Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Поступила в редакцию 2.03.2020

После доработки 13.05.2020

Принята к публикации 22.06.2020

Приведены результаты исследования комплексных процессов получения композиционных порошковых материалов из карбида вольфрама и металлического хрома. Раскрыты технологические приемы формирования функционально-градиентных покрытий с высокой микротвердостью – до 426 HV с использованием технологии микроплазменного напыления.

**Ключевые слова:** плазмохимический синтез, метод распылительной сушки, метод грануляции с использованием материала связки, метод микроплазменного напыления, микротвердость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-117-124

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов И. Н., Сырков А. Г. Химико-физические основы и методы получения поверхностно-структурированных металлов. – СПб.: СПбГУ, 2011. – 72 с.
2. Жабрев В. А., Калинин В. Т., Марголин В. И., Николаев А. И., Тупик В. А. Физико-химические процессы синтеза наноразмерных объектов. – СПб.: Изд-во «Элмор», 2012. – 328 с.
3. Суздаев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – СПб. Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. – 445 с.
4. Шолкин С. Е., Юрков М. А., Создание управляемой наноструктуры в покрытии, полученном методами газотермического напыления // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 2 (62). – С. 68–74.
5. Gang J., Marnilori J., Grosdidier T. Nanostructures in thermal spray coatings // Scripta Materials – 2003 – V. 48 – P. 1599–1604.
6. Марголин В. И., Потапов А. А., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Развитие нанотехнологий на основе нанокompозитов. – СПб: Изд-во СПб ЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 190 с.
7. Бобкова Т. И., Деев А. А., Быстров Р. Ю., Фармаковский Б. В. Нанесение износостойких покрытий с регулируемой твердостью с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления // Металлообработка. – 2012. – № 5–6 (71–72). – С. 45–49.
8. Геращенко Е. Ю., Самоделкин Е. А., Кузнецов П. А., Первухина М. С., Яковлева Н. В. Исследование механизма сверхскоростной универсальной дезинтеграторно-активаторной обработки для получения магнитомягких порошковых материалов на основе аморфной ленты сплава системы Fe–Cu–Nb–Si–B // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 1 (73). – С. 102–112.
9. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Перспективные исследования и разработки научного нанотехнологического центра ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в области наноматериалов // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 118–126.
10. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2017.

УДК 621.762.2:621.318.12:537.622

#### СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Fe–Cr–Co, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Б. К. БАРАХТИН<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, А. С. ЖУКОВ<sup>1</sup>, А. В. КАМИНИН<sup>2</sup>,  
И. С. ГАВРИКОВ<sup>2</sup>, Д. М. АНИСИМОВ<sup>1</sup>, Д. С. СОЗИНОВ<sup>1</sup>, М. Л. ФЕДОСЕЕВ<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 «Спецмагнит», 127238, Москва, Дмитровское шоссе, 58

Поступила в редакцию 17.03.2020

После доработки 14.05.2020

Принята к публикации 22.06.2020

Исследовано строение магнитотвердого материала системы Fe–Cr–Co, изготовленного на установке Russian SLM FACTORY методом селективного лазерного плавления из сферического порошка с размером частиц менее 80 мкм. Порошок был получен методом атомизации расплава. Исследования структуры, магнитных и механических параметров металла образцов проведены при различных скоростях сканирования и мощности лазера. Путем построения петли гистерезиса получены данные, свидетельствующие о более высоком уровне магнитных характеристик ( $B_r$ ,  $B_d$ ,

$H_d$ ,  $H_{cb}$ ,  $H_{cm}$  и  $BH_{max}$ ) металла образцов, полученных методом селективного лазерного плавления, чем аналогичных, полученных по литейным технологиям.

**Ключевые слова:** селективное лазерное плавление, металлические порошки, структура, магнитные свойства

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-125-130

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попович А. А. Аддитивные технологии как новый способ создания перспективных функциональных материалов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2020.– №1 (775). – С. 19–25.
2. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Абулкасимов М. М. Технологии обработки материалов концентрированным потоком энергии // *Надежность и качество сложных систем*. – 2015. – № 3 (11). – С. 69–79.
3. Zhang J., Jung Y.-G. Additive Manufacturing: materials, processes, quantifications and applications. – Butterworth-Heinemann, Oxford, 2018.
4. Froes F., Boyer R. Additive manufacturing for the aerospace industry. – Elsevier, Amsterdam, 2019.
5. Structure and Properties of the Bulk Standard Samples and Cellular Energy Absorbers / P. Kuznetsov, A. Zhukov, A. Deev et al. – Rieka: IntechOpen, 2018.
6. Рудской А. И., Варгасов Н. Р., Барахтин Б. К. Термопластическое деформирование металлов. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2018.– 286 с.
7. Корзникова Г. Ф. Формирование структуры при горячей деформации сжатием магнитотвердого сплава Fe–Cr–Co // *Физическая мезомеханика*. – 2015. – Т. 18, № 2.– С.89–104.
8. Wimpenny D. I., Pandey P. M., Kumar L. J. Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies. – Springer, Singapore, 2017.
9. Zhukov A., Barakhtin B., Shakirov I., Bobyr V. The Emergence of inhomogeneity in the chemical composition of powder applicable for manufacturing products by additive technologies // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – V. 36. – P. 19–25.
10. Григорович В. К. Электронное строение и термодинамика сплавов железа. – М.: Наука, 1970. – 292 с.
11. Аганаев Ю. П., Гурьев А. М., Лыгденов Б. Д., Мэй Ш. Оценка устойчивости формы межфазной границы при периодической кристаллизации сплавов в условиях воздействия высококонцентрированных источников тепла // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 115–119.

УДК [669.715+661.665.1]:539.431

### **МНОГОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ 7075-T1, АРМИРОВАННОГО ЧАСТИЦАМИ КАРБИДА КРЕМНИЯ**

М. А. ГОРБОВЕЦ, канд. техн. наук, Д. В. КОСОЛАПОВ, П. В. РЫЖКОВ

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

Поступила в редакцию 24.03.2020

После доработки 14.05.2020

Принята к публикации 20.05.2020

Проведено исследование многоциклового усталости металлокерамического композиционного материала на основе алюминиевого сплава марки 7075-T1, полученного методом горячей экструзии. Исследование многоциклового усталости проведено на пяти уровнях заданной амплитуды



напряжения при комнатной температуре и на четырех уровнях заданной амплитуды напряжения при повышенной температуре (100°C). Испытаны гладкие образцы корсетного типа с круглым сечением, изготовленные согласно требованиям ГОСТ 25.502–79. Образцы синтезированного материала прошли стадию термообработки, характерной для матричного алюминиевого сплава 7075. Сырьем исходной матрицы композиционного материала являлись частицы сферической формы размером от 5 до 70 мкм, а сырьем армирующего компонента – частицы порошка карбида кремния, которые после продолжительного механического легирования с частицами матрицы приобретают форму гранул от 400 до 600 мкм.

Исследование характеристик усталости позволили сделать вывод, что введение в матричный сплав 7075-T1 армирующей фазы объемом 20% на основе частиц карбида кремния позволило достигнуть увеличения пределов выносливости на базе 2·10<sup>7</sup> циклов в 1,3 раза. Повышение температуры испытания (100°C) приводит к снижению предела выносливости на 8%.

Рассмотрено изменение значений прогрессирующей деформации и резонансной частоты в процессе испытаний на многоцикловую усталость при комнатной и повышенной температурах (100°C). При комнатной температуре с повышением долговечности происходит накопление прогрессирующей деформации, при повышенной температуре (100°C) с понижением долговечности на каждом уровне напряжений проявляется более выраженный эффект падения резонансной частоты.

*Ключевые слова:* металлический композиционный материал, дисперсно-упрочненные композиты, алюминиевый сплав, механические характеристики, предел ограниченной выносливости

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-131-140

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. – 2016. – №2 (14) . – С. 16–21.
2. Каблов Е. Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. – М.: ВИАМ, 2015. – 720 с.
3. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С., Сидоров В. В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2013. – №3. – С. 47–54.
4. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №1 (34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Луценко А. Н., Славин А. В., Ерасов В. С., Хвацкий К. К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – №S. – С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
6. Горбовец М. А., Славин А. В. Доказательство соответствия материала требованиям части 33 авиационных правил // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – №3. – С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-89-94.
7. Березовский В. В., Шавнев А. А., Ломов С. Б., Курганова Ю. А. Получение и анализ структуры дисперсноупрочненных композиционных материалов системы Al–SiC с различным содержанием армирующей фазы // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – №S6. – С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-17-23.
8. Гращенков Д. В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – №S. – С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
9. Каблов Е. Н., Щетанов Б. В., Гращенков Д. В., Шавнев А. А., Няфкин А. Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №S. – С. 373–380.

10. Kablov E. N., Grashchenkov D. V., Shchetanov B. V., Shavnev A. A. AlSiC-based metal matrix composites for power electronic devices. // Composites: Mechanics, Computations, Applications. – 2013. – V.4, N.1. – P. 65–74.
11. Polmear I. J. Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals. – John Wiley & Sons, Australia, 1995. – 235 p
12. Cottu J.-P., Couderc J.-J., Viguier B., Bernard L. Influence of SiC reinforcement on precipitation and hardening of a metal matrix composite // Journal of Materials Science. – 1992. – V. 27, N 11. – P. 3068–3074.
13. Беляев М. С., Горбовец М. А., Рыжков П. В. Сопротивление усталости жаропрочных никелевых сплавов, полученных селективным лазерным сплавлением // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – №3(52). DOI: doi.org/ 10.18577/2071-9140-2018-0-3-50-55.
14. Горбовец М. А., Ходинев И. А., Рыжков П. В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2018. – № 9. – Ст. 6. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.02.2020). dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60, УДК 620.178.35
15. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
16. Туркова В. А. Инкрементальный анализ двухосного нагружения пластины с круговым отверстием: приспособляемость, знакопеременная пластичность и рэтчеттинг // Вестник СамГУ. – 2015. – № 3(125).
17. Ерасов В. С., Нужный Г. А., Гриневиц А. В., Терехин А. Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытаний на усталость. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2013. – № 10. Ст. 6. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.02.2020).

УДК 678.675:677.47

#### **ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СВОЙСТВ ПОЛИАМИДА-6, ПОЛИМЕРИЗАЦИОННО-НАПОЛНЕННОГО БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРОЙ НА СТАДИИ СИНТЕЗА**

Р. М. РОЗОВ, Н. В. БОРИСОВА, канд. техн. наук, Т. П. УСТИНОВА, д-р техн. наук

*Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Ю. А. Гагарина, 413100, Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17, E-mail: [eti@techn.sstu.ru](mailto:eti@techn.sstu.ru)*

Поступила в редакцию 17.03.2020

После доработки 08.05.2020

Принята к публикации 21.05.2020

Исследованы состав, физико-механические и структурные особенности полиамида-6, модифицированного на стадии синтеза базальтовыми наполнителями. Установлено влияние вводимых наполнителей на структурные особенности, деформационно-прочностные, технологические и физико-химические свойства синтезированного полимера. Выявлено положительное влияние термообработки наполнителей на их адгезионное взаимодействие с полимерной матрицей при синтезе композита. Показано, что при введении более 7,5 мас.% волокнистого наполнителя наблюдается тенденция к повышению физико-механических характеристик синтезируемого полимера. Проведена оценка поведения синтезированного композита в условиях повышенных температур методом термогравиметрического анализа, которая показала, что термическая обработка базальтовой фибры позволяет значительно повысить энергию активации деструкции, что подтверждает эффективность проведенной термомодификации базальтовой нити. С помощью инфракрасной спектроскопии показано, что синтезируемый полимер полностью идентифицируется со спектральной картиной, характерной для полиамида-6.

*Ключевые слова:* полиамид-6, базальтовые наполнители, полимеризационное совмещение компонентов, структурные особенности, технологические свойства, физико-механические характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калиничев Э. Л., Саковцев М. Б. Полимерные материалы для литевых деталей: свойства, классификация и выбор // Полимерные материалы. – 2016. – № 1. – С. 57–59.
2. Раскутин А. Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. – № 5. – 2017. – С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348
3. Лахмай М. В. Улучшение физико-механических свойств полимерного конструкционного материала полиамида-6 блочного различными модифицирующими добавками // Новая наука: современное состояние и пути развития. – 2017. – Т.2, № 3. – С. 151–153.
4. Структурообразование, составы и свойства дисперсно-наполненных полимерных нанокомпозитов / И. Д. Симонов-Емельянов, Н. В. Алексимов, А. Н. Трофимов и др. // Пластические массы. – 2012. – № 6. – С. 7–13.
5. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / Под ред. А. А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2014. – 592 с.
6. Синтез и свойства поликапроамида, модифицированного диоксидом кремния / И. И. Гарифуллин, А. А. Ахметова, А. Н. Федорчук и др. // Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – Т.20, № 11. – С. 26–27.
7. ГОСТ Р 57941–2017 Композиты полимерные. Инфракрасная спектроскопия. Качественный анализ: Национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2018. – 17 с.
8. ГОСТ Р 56721–2015 Пластмассы. Термогравиметрия полимеров. Часть 1. Общие принципы: Национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2016. – 10 с.
9. ГОСТ Р 57713–2017 Композиты полимерные. Методы определения плотности и относительной плотности по вытесненному объему жидкости: национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2018. – 15 с.
10. ГОСТ 11262–2017 Пластмассы. Метод испытания на растяжение: Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
11. ГОСТ 4670–2015 Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика: Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2017. – 7 с.
12. ГОСТ 4647–2015 Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи: Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2017. – 20 с.
13. ГОСТ 15088–2014 Пластмассы. Метод определения температуры размягчения термопластов по Вика: Межгосударственный. – М.: Стандартинформ, 2015. – 20 с.

УДК 678.074:678.019.391

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ РЕЗИН НА ОСНОВЕ ГИДРИРОВАННЫХ  
БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНЫХ КАУЧУКОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ СТАРЕНИИ  
В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ**

Е. А. ХОРОВА<sup>1,2</sup>, Е. Н. ЕРЕМИН<sup>2</sup>, д-р техн. наук, Н. В. ВАКУЛОВ<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> ФГУП «ФНПЦ «Прогресс», 644018, Омск, ул. 5-я Кордная, д. 4, E-mail: info@progress-omsk.ru

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

Поступила в редакцию 27.04.2020

После доработки 6.05.2020

Принята к публикации 22.06.2020

Исследованы резины на основе частично и полностью гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков (ГБНК) Therban AT 5065 VP и Therban AT 5005 VP, взятых в соотношениях 100:0, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 соответственно. Дана оценка технического ресурса работы резинокордных оболочек путем прогнозирования изменения свойств резин в процессе термического старения на воздухе и в моторном масле М-14В<sub>2</sub> при повышенных температурах по ГОСТ 9.713–86 и методике ускоренного старения, разработанной ФГУП ФНПЦ «Прогресс». Представлены результаты исследования резин на основе ГБНК в условиях термического старения в агрессивных средах при повышенных температурах. Оценена работоспособность резин путем прогнозирования изменения относительного удлинения к окончанию срока службы изделия по ГОСТ 9.713–86. Установлено, что резина с соотношением ГБНК Therban AT 5065 VP и Therban AT 5005 VP 50:50 является термически более стабильной и имеет наибольший срок службы.

*Ключевые слова:* гидрированные бутадиен-нитрильные каучуки, агрессивная среда, термическое старение, прогнозирование, срок службы

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-102-2-149-155

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Метод ускоренного определения гарантийных сроков хранения резин / А. С. Кузьминский, Л. И. Любчанская, Т. Г. Дегтева и др. // Каучук и резина. – 1963. – № 4. – С. 17–20.
2. ГОСТ 12337–84. Масло моторное для дизельных двигателей. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2009.
3. ГОСТ 9.713–86. Резины. Метод прогнозирования изменения свойств при термическом старении. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
4. Высокотехнологичная резина для «зеленых» моторов. URL: <http://press.unipeck.ru/eng/26655/>.
5. Khorova E. A., Razdyakonova G. I., Khodakova S. Ya. Effect of the structure of hydrogenated butadiene-nitrile rubber on the resistance to aggressive media and high temperatures // Procedia Engineering. – 2016. – V.152. – P. 556–562.
6. Хорова Е. А., Мышлявцев А. В. Применение гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков в составе изделий, эксплуатируемых в условиях воздействия повышенных температур и агрессивных сред // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3 (95). – С. 129–136.
7. Осошник И. А., Шутилин Ю. Ф., Карманова О. В.. Производство резиновых технических изделий: учеб. пособие / Под ред. Ю. Ф. Шутилина. – Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2007. – 434 с.
8. ГОСТ 270–75. Резины. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. – М.: Стандартинформ, 2008.
9. ГОСТ 9.030–74. Резины. Методы испытаний на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред. – М.: Стандартинформ, 2008.
10. ГОСТ 9.024–74. Резины. Методы испытаний на стойкость к термическому старению. – М.: Изд. Стандартов, 1989.

УДК 669.14.018.8'786:620.193.1

#### ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

О. А. ХАРЬКОВ, канд. техн. наук, С. Ю. МУШНИКОВА, канд. техн. наук, О. Н. ПАРМЕНОВА

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

Поступила в редакцию 12.02.2020

После доработки 24.03.2020

Принята к публикации 26.03.2020

Приведены результаты испытаний на коррозионно-эрозионную стойкость азотсодержащей стали 04X20H6Г11M2AFB в сравнении со сталями 08X18H10T, АБ2-2 и титановым сплавом BT1-0 с применением двух методов. Показано, что определение износостойкости стали при трении о лед

с абразивом затруднено вследствие быстрого таяния льда. Наиболее эффективна методика оценки стойкости к коррозионно-эрозионному износу при одновременном абразивном воздействии на поверхность металлических образцов и 3,5%-ного раствора NaCl с определением скорости репассивации оксидной пленки. Установлено, что восстановление электрохимического потенциала нержавеющей стали марки 04X20H6Г11M2АФБ происходит 1,5 раза быстрее, чем стали 08X18H10Т, что показывает перспективность применения азотсодержащей стали для изготовления «ледового пояса» ледоколов, в том числе в качестве плакирующего слоя биметалла.

*Ключевые слова:* нержавеющая сталь, азотсодержащая сталь, коррозионно-эрозионная стойкость, биметалл, плакированная сталь

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-156-163

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ованесьян К. К., Харьков А. А., Логинов В. Б. Исследование причин интенсивного коррозионного износа наружной обшивки корпусов ледоколов // *Технология судостроения*. – 1990. – № 3. – С. 15–18.
2. Качурин Л. Г., Андросенко В. Я., Логинов В. Б., Ованесьян К. К., Псаломщиков В. Ф., Харьков А. А. Физико-химические процессы при механическом взаимодействии металла со льдом // *Технология судостроения*. – 1990. – № 3. – С. 22–24.
3. Соколов О. Г., Малышевский В. А., Легостаев Ю. Л., Грищенко Л. В. Высокопрочные плакированные стали, стойкие к коррозионно-эрозионному износу // *Прогрессивные материалы и технологии*. – 1993. – № 1. – С. 12–13.
4. Легостаев Ю. Л., Малышевский В. А., Мотовилина Г. Д., Семичева Т. Г. Высокопрочная плакированная сталь для работы в экстремальных условиях. Особенности строения переходной зоны // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. – 2004. – Вып. 21. – С. 98–109.
5. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю., Малахов Н. В., Ямпольский В. Д. Создание перспективных принципиально новых коррозионно-стойких корпусных сталей, легированных азотом // *Вопросы материаловедения*. – 2005. – № 2 (42). – С. 40–54.
6. Сагарадзе В. В., Катаева Н. В., Мушникова С. Ю., Калинин Г. Ю., Харьков О. А., Малышевский В. А. Новые конструкционные материалы для корпусов арктических судов. // *Научно-технические проблемы освоения Арктики*. – М.: Наука, 2015. – С. 437–451.
7. Сагарадзе В. В., Катаева Н. В., Мушникова С. Ю., Калинин Г. Ю., Харьков О. А., Костин С. К., Парменова О. Н. Структура и свойства плакированной двухслойной стали для корпусов арктических ледоколов // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 3(83). – С. 14–25.
8. Kamachi Mudali U., Baldev Raj. High Nitrogen Steels and Stainless Steels: Manufacturing, Properties and Applications. – Alpha Science International, 2004. – 266 p.
9. Schröder C., Wendler M., Kreschel T., Volkova O., Weiß A. Development of a Stainless Austenitic Nitrogen-Alloyed CrMnNiMo Spring Steel // *Crystals*. – 2019. – N 9, V. 456. – P. 1–15.
10. Development of High Nitrogen Stainless Steel for Cryogenic Applications / V. Anil Kumar, R. K. Gupta, M. K. Karthikeyan et al. // *Materials Science Forum*. – 2015. – V. 830–831. – P. 23–26.
11. Мушникова С. Ю., Легостаев Ю. Л., Харьков А. А., Петров С. Н., Калинин Г. Ю. Исследование влияния азота на стойкость к питтинговой коррозии аустенитных сталей // *Вопросы материаловедения*. – 2004. – № 2 (38). – С. 126–135.
12. Коршунов Л. Г., Сагарадзе В. В., Черненко Н. Л., Печеркина Н. Л., Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю., Харьков О. А. Структура и трибологические свойства азотсодержащих нержавеющей аустенитных сталей // *Вопросы материаловедения*. – 2012. – № 3 (71). – С. 136–145.
13. Коршунов Л. Г., Гойхенберг Ю. Н., Черненко Н. Л. Влияние легирования и термической обработки на структуру и трибологические свойства азотсодержащих нержавеющей аустенитных

сталей при абразивном и адгезионном изнашивании // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2007. – № 5. – С. 9–18.

УДК 669.15–194.56:621.039.531:539.421

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ГРАНИЦ ЗЕРЕН АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ МИНИАТЮРНЫХ ОБРАЗЦОВ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. М. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА,  
М. Н. ГРИГОРЬЕВ

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

Поступила в редакцию 23.03.2020

После доработки 13.05.2020

Принята к публикации 22.06.2020

Предложена методика оценки прочности границ зерен по результатам испытаний миниатюрных образцов на ударный изгиб. Дано обоснование использования испытаний на ударный изгиб при низкой температуре для оценки прочности границ зерен хромоникелевых аустенитных сталей. Определена температура испытаний, при которой доля хрупкого межзеренного разрушения охрупченной хромоникелевой стали 10X18H9 составляет не менее 90%. Разработаны три типа миниатюрных образцов различной геометрии, обеспечивающих получение примерно одной и той же энергии разрушения при их испытании на ударный изгиб. Показаны случаи, когда необходимо использовать миниатюрные образцы различной геометрии.

*Ключевые слова:* аустенитная сталь, прочность границ зерен, испытания на ударный изгиб, миниатюрные образцы, хрупкое межзеренное разрушение, методика исследований

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-102-2-164-173

### ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин Б. З., Швецова В. А., Прокошев О. Ю., Курсевич И. П., Смирнов В. И., Минкин А. И. Характеристики антикоррозионной наплавки для расчета сопротивления хрупкому разрушению материала корпуса реактора // *Вопросы материаловедения*. – 2005. – № 2 (42). – С. 186–213.
2. Курсевич И. П., Марголин Б. З., Прокошев О. Ю., Смирнов В. И., Федорова В. А., Нестерова Е. В., Петров С. Н. Влияние длительного температурного воздействия на механические свойства и структуру аустенитной стали X18H9 и металла сварных швов // *Вопросы материаловедения*. – 2012. – № 3. – С. 109–125.
3. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / К. Л. Брайент, С. К. Бенерджи и др. – М.: *Металлургия*, 1988. – 552 с.
4. Review of effects of long-term aging on the mechanical properties and microstructures of types 304 and 316 stainless steel / J. A. Horak et al. – 1983. – P. 301–313.
5. Кадмар М. Х. Жидкометаллическое охрупчивание // *Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Пер. с англ. / Под ред. К. Л. Брайента, С. К. Бенерджи*. – М.: *Металлургия*, 1988. – 552 с.
6. Margolin B. Z., Kursevich I. P., Sorokin A. A., Neustroev V. S. FCC-to-BCC phase transformation in austenitic steels for WWER internals with significant swelling // *Proc. of 7<sup>th</sup> Intern. Symp. on Contribution of Materials Investigation to Improve the Safety and Performance of LWRs, France, Fontevraud, 26–30 September 2010, A097-T02*.
7. Trinkaus H., Ullmaier H. High temperature embrittlement of metals due to helium: is the lifetime dominated by cavity growth or crack growth? // *J. Nucl. Mater.* – 1994. – V. 212–215, part 1. – P. 303–309.
8. Nogami S., Hasegawa A., Tanno T., Imasaki K. High-Temperature Helium Embrittlement of 316FR Steel // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – V. 48 (1). – 2011. – P. 130–134.
9. Henry J., Vincent L., Averty X., Marini B., Jung P. Effect of a high helium content on the flow and fracture properties of a 9Cr martensitic steel // *J. Nucl. Mater.* – 2007. – V. 367–370, part A. – P. 411–416.

10. Miura T., Fujii K., Fukuya K. Micro-mechanical investigation for effects of helium on grain boundary fracture of austenitic stainless steel // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 457. – P. 279–290.
11. 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.
12. Effect of the Accelerated Irradiation and Hydrogen/Helium Gas on IASCC Characteristics for Highly Irradiated Austenitic Stainless Steels / K. Fujimoto, T. Yonezawa, E. Wachi et al. // Proc. 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, PA, 2005. – P. 299–310.
13. Influence of the Neutron Spectrum on the Sensitivity to IASCC and Microstructure of CW 316 Material / M. Ernestova, J. Burda, J. Kociket et al. // Proc. of the 8th International Symposium Fontevraud 8, Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs Safety, Performance and Reliability; SFEN 2014.
14. Gusev M. N., Maksimkin O. P., Garner F. A. Peculiarities of plastic flow involving “deformation waves” observed during low-temperature tensile tests of highly irradiated 12Cr18Ni10Ti and 08Cr16Ni11Mo3 steels // J. Nucl. Mater. – 2010. – V. 403. – P. 121–125.
15. Рубан С. В., Максимкин О. П. Изменение физико-механических свойств аустенитной хромоникелевой нержавеющей стали X18H9 (AISI 304), облученной нейтронами и деформируемой при отрицательных температурах // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып. 1. – С. 5–9.
16. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Т. 1: Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974.
17. Fukuya K., Nishioka H., Fujii K., Kamaya M., Miura T., Torimaru T. Fracture behavior of austenitic stainless steels irradiated in PWR // J. Nucl. Mat. – 2008. – V. 378. – P. 2011–2019.

УДК 669.15–194.56:621.039.531:620.194.2

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР И PWR**

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА, А. А. СОРОКИН, канд. 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 23.01.2020

После доработки 4.06.2020

Принята к публикации 23.06.2020

Проведены испытания на коррозионное растрескивание образцов из облученных хромоникелевых аустенитных сталей марок 321 (сталь (08–12)X18H10T), 316 (сталь 06X16H11M3) и 304 (сталь 02X18H9). Образцы облучали в различных энергетических спектрах нейтронов до различных повреждающих доз в диапазоне от 4,5 до 150 сна. Испытания проводили в автоклавах в водной среде, имитирующей теплоноситель 1-го контура реакторов типа ВВЭР, при температурах 290–315°C. Проанализировано влияние величины повреждающей дозы облучения и энергетического спектра нейтронов на склонность сталей к коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН). Определены доминирующие механизмы КРН для различных аустенитных сталей. Проведено сравнение режимов нагружения на сопротивление КРН образцов, облученных до одной и той же повреждающей дозы.

*Ключевые слова:* аустенитные хромоникелевые стали, повреждающая доза облучения, коррозионное растрескивание под напряжением

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-102-2-174-198

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пиминов В. А., Евдокименко В. В. Надежность на весь срок эксплуатации // 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 // Росэнергоатом. – 2015. – № 2. – С. 8–15.
3. Scott P. A review of irradiation assisted stress corrosion cracking // J. Nucl. Mater. – 1994. – N 211. – P. 101–122.
4. Investigations on core basket bolts from a VVER 440 power plant / U. Ehrnstén, J. Pakarinen, W. Karlsen et. al. / Engineering Failure Analysis. – 2013. – N 33 – P. 55–65.
5. Andresen P. L., Was G. S. A historical perspective on understanding IASCC // J. Nucl. Mater. – 2019. –N 517 – P. 380–392.
6. 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. O3-A008-T2.
7. Tanguy B., Pokor C., Stern A., Bossis P. Initiation stress threshold irradiation assisted stress corrosion cracking criterion assessment for core internals in PWR environment // Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference, 2011, Baltimore, Maryland, USA, PVP2011-58051.
8. Gérard R., Pokor C. Internal Components: Design and Main Ageing Mechanisms // Soteria Training Symposium on Irradiation Effects in Structural Materials for Nuclear Reactors, 2012, Seville.
9. 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, N10. – P. 1072–1077.
10. 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.
11. 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 PVR 2009, Prague, Czech Republic, 2009. – PVP2009-77279.
12. 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
13. Analysis of mechanisms inducing corrosion cracking of irradiated austenitic steels and development of a model for prediction of crack initiation / B. Margolin, A. Sorokin, N. Pirogova et. al. // Engineering Failure Analysis. – 2020. – V. 107 (104235) – P. 1–20.
14. – Irradiation assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steel WWER reactor core internals / A. Hojná, M. Ernestová, O. Hietanen et. al. // 15th International Conference on Environmental Degradation, TMS. – 2011. – P. 1257–1272.
15. 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.
16. Cracking susceptibility of irradiated stainless steels in a simulated PWR environment / Y. Chen, A. S. Rao, W. Soppet et. al. // 22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology San Francisco, California, USA – August 18–23, 2013.
17. Stephenson K. J., Was G. S. Crack initiation behavior of neutron irradiated model and commercial stainless steels in high temperature water // J. Nucl. Mater. – 2014. –V. 444 (1–3) –P. 331–341.
18. 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. –V. 283–287. – P. 446–450.
19. Bosch R. W., Vankeerberghen M., Gérard R. Crack initiation testing of thimble tube material under PWR conditions to determine a stress threshold for IASCC // J. Nucl. Mater. – 2015. –V. 461. – P. 112–121.
20. 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.

21. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюрев В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970. – 421 с.

22. Scott P. M. Environment-assisted cracking in austenitic components // Intern. J. Pressure Vessel and Piping. – 1996. – V. 65. – P. 255–264.

23. Influence of the Neutron Spectrum on the Tensile Properties of Irradiated Austenitic Stainless Steels, in Air and in PWR Environment / J.-P. Massoud, M. Zamboch, P. Brabec et al. // Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System-Water Reactors, Snowbird, UT, August 2005.

24. Influence of the Neutron Spectrum on the Sensitivity to IASCC and Microstructure of CW 316 Material / M. Ernestova, J. Burda, J. Kocik et. al. // Proc. of the 8th International Symposium Fontevraud 8, Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs Safety, Performance and Reliability; SFEN 2014.

25. Investigation of high temperature annealing effectiveness for recovery of radiation-induced structural changes and properties of 18Cr–10Ni–Ti austenitic stainless steels / B. A. Gurovich, E. A. Kuleshova, A. S. Frolov et. al. // J. Nucl. Mater. – 2015. –V. 465 – P. 565–581.

26. 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.

27. 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.

28. Little E. A. Fracture mechanics evaluations of neutron irradiated type 321 austenitic steel //J. Nucl. Mater. – 1986. –V. 139. – P. 261–276.

УДК 669.15–194.56:621.039.531:620.194.2

### **ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ МИНИАТЮРНЫХ ОБРАЗЦОВ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ**

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук,  
А. М. МОРОЗОВ, 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 23.03.2020

После доработки 29.05.2020

Принята к публикации 22.06.2020

Проведены испытания на ударный изгиб миниатюрных образцов, изготовленных из хромоникелевых нержавеющей аустенитных сталей марок 321 (сталь 08X18H10T), 316 (сталь 06X16H11M3) и 304 (сталь 02X18H9), облученных до различных повреждающих доз от 4 до 125 сна в различных энергетических спектрах нейтронов. На основании этих испытаний определено влияние повреждающей дозы и энергетического спектра нейтронов на энергию межзеренного разрушения, определяющую прочность границ зерен. Рассмотрено два спектра нейтронов – один характерен для активной зоны реакторов типа PWR и ВВЭР, другой – для активной зоны реакторов на быстрых нейтронах. Рассмотрена связь между сопротивлением коррозионному растрескиванию облученных хромоникелевых сталей 321, 316 и 304 и прочностью границ зерен.

*Ключевые слова:* аустенитные хромоникелевые стали, коррозионное растрескивание под напряжением, миниатюрные образцы, испытания на ударный изгиб

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-102-2-200-215

## ЛИТЕРАТУРА

1. Analysis of mechanisms inducing corrosion cracking of irradiated austenitic steels and development of a model for prediction of crack initiation / B. Margolin, A. Sorokin, N. Pirogova et al. // *Engineering Failure Analysis*. – 2020. – V. 107 (104235) – P. 1–20.
2. Fukuya K., Nishioka H., Fujii K. Fracture behavior of austenitic stainless steels irradiated in PWR // *J. Nucl. Mater.* – 2008. – V. 378. – P. 211–219.
3. 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.
4. Miura T., Fujii K., Fukuya K. Micro-mechanical investigation for effects of helium on grain boundary fracture of austenitic stainless steel // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – V. 457. – P. 279–290.
5. Effect of the Accelerated Irradiation and Hydrogen/Helium Gas on IASCC Characteristics for Highly Irradiated Austenitic Stainless Steels / K. Fujimoto, T. Yonezawa, E. Wachi et al. // *Proc. 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*, PA, 2005. – P. 299–310.
6. Boothby R. M. Radiation effects in nickel-based alloys // *Comprehensive Nucl. Mater.* – 2012. – V. 4. – P. 123–150.
7. Intergranular fracture in irradiated Inconel X-750 containing very high concentrations of helium and hydrogen / C. D. Judge, N. Gauquelin, L. Walters et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – V. 457. – P. 165–172.
8. Stoller R. E., Maziasz P. J., Rowcliffe A. F., Tanaka M. P. Swelling behavior of austenitic stainless steels in a spectrally tailored reactor experiment: Implications for near-term fusion machines // *J. Nucl. Mater.* – 1988. – V. 155–157. – P. 1328–1334.
9. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / К. Л. Брайент, С. К. Бенерджи и др. – М.: Металлургия, 1988. – 552 с.
10. Gusev M. N., Maksimkin O. P., Garner F. A. Peculiarities of plastic flow involving “deformation waves” observed during low-temperature tensile tests of highly irradiated 12Cr18Ni10Ti and 08Cr16Ni11Mo3 steels // *J. Nucl. Mater.* – 2010. – V. 403. – P. 121–125.
11. Trinkaus H., Ullmaier H. High temperature embrittlement of metals due to helium: is the lifetime dominated by cavity growth or crack growth? // *J. Nucl. Mater.* – 1994. – V. 212–215, Part 1. – P. 303–309.
12. Scott P. A review of irradiation assisted stress corrosion cracking // *J. Nucl. Mater.* – 1994. – V. 211 – P. 101–122.
13. Physical and mechanical modelling of neutron irradiation effect on ductile fracture. Part 1. Prediction of fracture strain and fracture toughness of austenitic steels // B. Margolin, A. Sorokin, V. Smirnov et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2014. – V. 452. – P. 595–606.