

СОДЕРЖАНИЕ

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

Князюк Т. В., Мотовилина Г. Д., Новоскольцев Н. С., Кондратьев Н. А. Зависимость микроструктуры и механических свойств листового проката из хладостойкой стали с гарантированным пределом текучести 420 МПа от режима термомеханической обработки..... 5

Оленин М. И., Романов О. Н., Каштанов А. Д., Афанасьев С. Ю., Бережко Б. И., Бушуев С. В., Шахьян С. А., Алинов Ж. Э., Зернов Э. А. Влияние гомогенизирующего отжига на снижение трещинообразования поковок из стали марки 08X18H10T ..... 15

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Геращенко Д. А., Геращенко Е. Ю., Можайко А. А., Макаров А. М., Беляков А. Н., Быстров Р. Ю. Исследование состава и свойств интерметаллидного слоя Al–Ti и Ni–Ti, полученного на титановом сплаве при лазерной обработке ..... 28

Красиков А. В., Марков М. А., Меркулова М. В., Старицын М. В. Упрочнение покрытия Ni–W методом лазерной обработки..... 36

Можайко А. А., Геращенко Д. А., Старицын М. В. Экспериментальное и теоретическое исследование процесса лазерной обработки покрытия из алюминия на стальной подложке ..... 44

Орыщенко А. С., Геращенко Д. А. Результаты исследования профиля единичных треков покрытий, полученных методом ХГДН из порошков на основе алюминия и никеля ..... 58

Яковлева Н. В., Макаров А. М. Когезионная прочность каталитических композиционных покрытий системы Ni–Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на металлической подложке ..... 71

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Борукаев Т. А., Китиева Л. И. Физико-механические свойства композитов полиэтилен низкой плотности + полибутилтерефталат + совместитель ..... 81

Валуева М. И., Зеленина И. В., Начаркина А. В., Лонский С. Л. Влияние термовлажностного воздействия на структуру и свойства полиимидного углепластика..... 90

Соколова М. Д., Чириков А. А., Гоголева О. В., Зырянов И. В. Сварка сверхвысокомолекулярного полиэтилена и его композита для повышения герметизации футеровочных покрытий ..... 102

**СВАРКА, СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н. Исследование структуры и свойств металла сварного соединения корпуса атомного реактора из Cr–Mo–V стали в процессе изготовления и эксплуатации..... 111

Мальцев Д. А., Кулешова Е. А., Федотова С. В., Василенко В. В., Бубякин С. А. Влияние макроструктуры и фазового состава на эксплуатационные характеристики сварных швов корпусов реакторов типа ВВЭР ..... 124

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ**

**И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

Ильин А. В., Садкин К. Е., Забавичев Н. С. К расчетной оценке усталостной прочности сварных оболочечных конструкций из высокопрочных сталей при малоцикловом нагружении. Часть 2. Разработка расчетной методики..... 140

**РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Кулешова Е. А., Мальцев Д. А., Фролов А. С., Степанов Н. В., Марголин Б. З., Сорокин А. А., Печенкин В. А., Боховко М. В., Кобец У. А. Оценка профиля распухания аустенитной нержавеющей стали с различным содержанием никеля под действием ионного облучения ..... 171

Марголин Б. З., Сорокин А. А., Бучатский А. А., Швецова В. А., Прокошев О. Ю., Пирогова Н. Е. Характеристики и механизмы разрушения облученных аустенитных сталей в области повышенных температур и формулировка критерия разрушения. Часть 1. Экспериментальные исследования ..... 185

Марголин Б. З., Сорокин А. А., Бучатский А. А., Швецова В. А., Фоменко В. Н., Пирогова Н. Е. Характеристики и механизмы разрушения облученных аустенитных сталей в области повышенных температур и формулировка критерия разрушения. Часть 2. Критерий и модель разрушения ..... 203

## ХРОНИКА

110 лет Центральному научно-исследовательскому институту материалов .....	218
90 лет Научно-исследовательскому центру «Курчатовский институт» – ВИАМ .....	223
<b>Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов .....</b>	<b>225</b>

УДК 621.771.016:669.14.018.41

### **ЗАВИСИМОСТЬ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ХЛАДОСТОЙКОЙ СТАЛИ С ГАРАНТИРОВАННЫМ ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ 420 МПа ОТ РЕЖИМА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Т. В. КНЯЗЮК, канд. техн. наук, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, Н. С. НОВОСКОЛЬЦЕВ, Н. А. КОНДРАТЬЕВ

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

Поступила в редакцию 18.02.2022

После доработки 28.02.2022

Принята к публикации 17.03.2022

Для производства листов толщиной 5 и 15 мм из хладостойкой стали с гарантированным пределом текучести 420 МПа были разработаны и опробованы в лабораторных условиях режимы непрерывной прокатки. В настоящем исследовании рассмотрено влияние параметров термомеханической обработки (температуры конца прокатки и скорости охлаждения) на формирование конечной микроструктуры. Механические свойства листов анализировали с учетом сформированных структурных особенностей. Предложены технологические рекомендации для горячей прокатки листов из низкоуглеродистой низколегированной стали с гарантированным пределом текучести 420 МПа.

*Ключевые слова:* хладостойкая сталь, листовая прокат, непрерывная прокатка, термомеханическая обработка, микроструктура, механические свойства

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-05-14

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуськов О. П., Легостаев Ю. Л., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние технологии производства на структуру и свойства стали категории F40 улучшенной свариваемости // Вопросы материаловедения. – 2004. – № 2 (38). – С. 37–46.
2. Сыч О. В., Хлусова Е. И., Орлов В. В. Хладостойкие стали категорий прочности 355–500 МПа для применения в Арктике. Часть 1 // Тяжелое машиностроение. – 2019. – № 9. – С. 15–21.
3. Сыч О. В., Коротовская С. В., Хлусова Е. И., Новоскольцев Н. С. Разработка термомеханических режимов прокатки низколегированной Arс-стали с квазиоднородной ферритно-бейнитной структурой // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 2 (106). – С. 7–17.
4. Soshina T. V., Zisman A. A., Khlusova E. I. Maps of structure changes in austenite of low carbon steel 09CRNi2MOCUV // Inorganic Materials: Applied Research. – 2014. – Т. 5, N 6. – P. 570–577.

УДК 621.73.019:621.785.3

### **ВЛИЯНИЕ ГОМОГЕНИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА НА СНИЖЕНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПОКОВОК ИЗ СТАЛИ МАРКИ 08X18H10T**

М. И. ОЛЕНИН<sup>1</sup>, д-р техн. наук, О. Н. РОМАНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
А. Д. КАШТАНОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, С. Ю. АФАНАСЬЕВ<sup>2</sup>, Б. И. БЕРЕЖКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
С. В. БУШУЕВ<sup>1</sup>, С. А. ШАХКЯН<sup>1</sup>, Ж. Э. АПИНОВ<sup>1</sup>, Э. А. ЗЕРНОВ<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>Филиал АО «АЭМ-технологии» «АЭМ – Спецсталь», 196650, Санкт-Петербург, Колпино, территория Ижорский завод, д. 39

Поступила в редакцию 22.12.2021

После доработки 25.05.2022

Принята к публикации 15.06.2022

Приведены экспериментальные данные по трещинообразованию поковок из стали аустенитного класса марки 08X18H10T. Установлено, что на процесс трещинообразования определяющее влияние оказывает гомогенизационный отжиг, введенный в этапы процесса нагрева слитков и поковок перед первым и вторым выносами. Технологияковки крупных поковок из сталей аустенитного класса марки 08X18H10T с включением гомогенизационного отжига в процесс нагрева слитков и поковок может обеспечить высокое качествоковки без образования трещин.

**Ключевые слова:** аустенитная сталь, технологияковки, гомогенизационный отжиг, трещинообразование

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-15-27

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стали и сплавы энергетического оборудования. Справочник / Под ред. С. Б. Рыжова. – М.: Машиностроение, 2008. – 960 с.
2. Бескоровайный Н. М., Калинин Б. А., Платонов П. А., Чернов И. И. Конструкционные материалы ядерных реакторов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 704 с.
3. Азбукин В. Г., Горынин В. И., Павлов В. Н. Перспективные коррозионно-стойкие материалы для оборудования и трубопроводов АЭС. – СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 1997. – 118 с.
4. Марочник сталей и сплавов. Изд. 2-е // А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др. / Под общей ред. А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
5. Гуляев А. П., Гуляев А. А. Металловедение: Учебник для вузов. Изд. 7-е. – М.: И. Д. Альянс, 2015. – 644 с.
6. Охрименко Я. М., Тюрин В. А. Теория процессовковки слитков на прессах. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
7. Мовчан Б. А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах. – Киев: Гостехиздат УССР, – 1962. – 340 с.
8. Патент РФ № 2415183 РФ. Способ производства поковок из низкоуглеродистых ферритно-перлитных сталей / Оленин М. И., Бережко Б. И., Быковский Н. Г., Романов О. Н., Сергеев Ю. В., Бушуев С.В. Опубликовано 10.03.2011. Бюл. № 7.
9. Анастасиади Г. П., Сильников М. В. Неоднородность и работоспособность стали. – СПб.: Полигон, 2002. – 624с.
10. Горынин В. И., Оленин М. И. Пути повышения хладостойкости сталей и сварных соединений. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2017.– 342с.
11. Чернявская С. Г., Красникова С. И., Суламенко А. В. Изменение дельта-феррита в стали 1X16H4B при гомогенизации // МИТОМ. – 1972. – № 9. – С. 66–67.
12. Патент РФ № 2388833. Способ термической обработки высокопрочной коррозионностойкой стали мартенситного класса / Оленин М. И., Бережко Б. И., Горынин В. И., Павлов В. Н., Быковский Н. Г., Осипова И. С. Опубликовано 10.05.2010. Бюл. № 13.
13. Оленин М. И., Павлов В. Н., Быковский Н. Г., Башаева Е. Н., Гусельникова Т. М. Влияние гомогенизации на хладостойкость высокопрочных коррозионностойких сталей // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 2(58). – С. 33–37.
14. Оленин М. И., Каштанов А. Д., Романов О. Н., Махорин В. В. Влияние гомогенизирующего отжига на снижение содержания  $\delta$ -феррита в высокопрочной высокохромистой стали мартенситного класса марки 07X15H5Д4Б, полученной методом селективного лазерного сплавления // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 2(106). – С. 47–54.
15. Берштейн М. Л. Структура деформированных сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 330 с.

16. Счастливец В. М., Табатчикова Т. И., Яковлева И. Л., Егорова Л. Ю., Круглова А. А., Хлусова Е. И., Орлов В. В. Влияние размеров аустенитного зерна и степени деформации на формирование структуры стали класса прочности К60 // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 4 (68). – С. 27–35.
17. Добрынина М. В., Филимонов Г. Н., Павлов В. Н. Влияние режима окончательной обработки на структуру горячедеформированной аустенитной стали марки 08Х18Н10Т // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2(70). – С. 25–32.
18. Зисман А. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. Исследование рекристаллизации аустенита стали 09ХН2МД в условиях горячей прокатки методом релаксации напряжений // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2 (70). – С. 26–24.
19. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. Изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1977. – 480 с.
20. ГОСТ 5632–2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. – М.: Стандартинформ, 2015. – 54 с.
21. Бородулин Г. М., Мошкевич Е. И. Нержавеющая сталь. – М.: Металлургия, 1973. – 319 с.
22. Явойский В. И., Близнюков С. А., Вишкарев А. Ф., Горохов Л. С., Хохлов С. Ф. Включения и газы в сталях. – М.: Металлургия, 1979. – 272 с.
23. Онищенко А. К., Беклемищев Н. Н. Теория промышленнойковки стали и сплавов. – М.: Спутник, 2011. – 245 с.
24. Онищенко А. К. Мегапластическая деформация и оптимальная величина укова слитков // Технология металлов. – 2006. – № 10. – С. 12–15.
25. Голиков И. Н., Масленков С. Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. – М.: Металлургия, 1977. – 224 с.
26. Блюмин А. А., Звездин Ю. И., Орлова В. Н., Тимофеев Б. Т. Влияние термической обработки на структуру и механические свойства стали перлитного класса электрошлаковой выплавки // Вопросы судостроения. Сер. Металловедение. – 1980. – Вып. 31. – С. 14–20.
27. Звездин Ю. И., Орлова В. Н., Романов О. Н. Свойства отливок сечением до 800 мм из стали марки 10НЗМФА, полученных методом электрошлаковой выплавки // Судостроительная промышленность. Сер. Металловедение. Металлургия. – 1986. – Вып. 1. – С. 20–25.
28. Харламов А. А. DEFORM – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс]. – М., 2003. URL: <https://sapr.ru/article/7481> (дата обращения: 15.02.2022).

УДК 621.793.7:621.9.048.7:669.017.165

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СЛОЯ Al–Ti И Ni–Ti, ПОЛУЧЕННОГО НА ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА<sup>1</sup>, А. А. МОЖАЙКО<sup>1, 2</sup>,  
А. М. МАКАРОВ<sup>1</sup>, А. Н. БЕЛЯКОВ<sup>1</sup>, Р. Ю. БЫСТРОВ<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>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Поступила в редакцию 15.03.2021

После доработки 30.03.2021

Принята к публикации 31.03.2021

Приведены результаты исследования интерметаллидных покрытий систем Al–Ti и Ni–Ti, полученных с использованием метода «холодного» газодинамического напыления на подложке из титанового сплава и лазерной обработки. Прекурсорное покрытие было получено с помощью нанесения алюминия и никеля методом «холодного» напыления и затем оно было обработано лазером. Показано изменение состава и свойств покрытия при различных режимах лазерной обра-

ботки. Исследованы структура, микротвердость покрытия, а также представлены результаты рентгенофазового анализа.

**Ключевые слова:** «холодное» газодинамическое напыление, прекурсорное покрытие, лазерная обработка, интерметаллид, титановый сплав

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-28-35

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Inozemtsev A. A., Bashkatov I. G., Koryakovtsev A. S. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития. – М.: ВИАМ, 2010. – С. 43–46.
2. Ночовная Н. А., Базылева О. А., Каблов Д. Е., Панин П. В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля I / Под ред. Е. Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2018. – 303 с.
3. Titanium' 2003: Science and Technology // Proc. 10th World Conf. on Titanium, 13–18 July 2003, Hamburg, Germany, 1–5. – P. 3425.
4. Гринберг Б. А., Иванов М. А. Интерметаллиды Ni<sub>3</sub>Al и TiAl: микроструктура, деформационное поведение. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 359 р.
5. Shipway P. H., Hussain T., Preston S. P., Davis C. Process parameter optimization of laser clad iron based alloy: Predictive models of deposition efficiency, porosity and dilution // Surface and Coatings Technology. – 2018. – May. – P. 198–207.
6. Leyens C., Beyer E. Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition // Laser Surface Engineering / Ed. by J. R. Lawrence, C. Dowding, D. Waugh and J. B. Griffiths. – Cambridge: Elsevier, 2015. – P. 181–192.
7. Volyanski I., Shishkovskiy I. V., Yadroitsev I., Shcherbakov V. I., Morozov Yu. G. Layer-by-layer laser synthesis of intermetallic compounds of the Cu–Al–Ni system and the shape memory effect // Inorganic materials: Applied Research. – 2016. – V. 52(6). – P. 617–623.
8. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Машек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 1 (77). – С. 87–96.
9. Oryshchenko A. S., Gerashchenkov D. A. Aluminum matrix functional coatings with high microhardness on the basis of Al–Sn + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite powders fabricated by cold gas dynamic spraying // Inorganic Materials: Applied Research. – 2016. – V. 7(6). – P. 863–867. <https://doi.org/10.1134/S2075113316060125>
10. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Alkhimov A., Fomin V. M. Cold spray technology. – Elsevier Ltd., 2007.
11. Nath A. K., Sarkar S. Laser transformation hardening of steel in Woodhead publishing series in welding and other joining technologies advances in laser materials processing (Second Edition). Chapter 11. – Woodhead Publishing, 2018. – P. 257–298.
12. Gerashchenkov D. A., Farmakovskii B.V., Bobkova T. I., Klimov V. N. Features of the formation of wear-resistant coatings from powders prepared by a micrometallurgical process of high-speed melt quenching // Metallurgist. – 2017. – V. 60(9–10). – P. 1103–1112.
13. Tang C., Cheng F., Man H. Effect of laser surface melting on the corrosion and cavitation erosion behaviors of a manganese–nickel–aluminum bronze // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – V. 373(1–2). – P. 195–203. DOI: 10.1016/j.msea.2004.01.016.
14. Kwok C. T., Cheng F. T., Man H. C. // Surf. Coat. Technol. – 2001. – N 145. – P. 206–214.

УДК 621.9.048.7:669.24'27

#### УПРОЧНЕНИЕ ПОКРЫТИЯ Ni–W МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

А. В. КРАСИКОВ, канд. хим. наук, М. А. МАРКОВ, канд. техн. наук, М. В. МЕРКУЛОВА,  
М. В. СТАРИЦЫН

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

Поступила в редакцию 15.03.2022

После доработки 30.03.2022

Принята к публикации 31.03.2022

Калориметрическими исследованиями показано, что нанокристаллическое покрытие Ni – 37 мас. %W, нанесенное методом электроосаждения, не претерпевает фазовых превращений при температурах не выше 1000°C. Исследование свойств покрытий показало, что при лазерной обработке на выбранном режиме происходит существенный рост зерна в покрытии, но химический состав его не изменяется. Установлено, что при определенной величине энергозатраты наблюдается значительное повышение микротвердости покрытия.

**Ключевые слова:** покрытие Ni–W, лазерная обработка, электроосаждение, калориметрические исследования, микротвердость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-36-43

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Geraschenkov D. A., Makarov A. M., Geraschenkova E. Y., Vasiliev A. F. Obtaining Functional Intermetallic Ni–Ti Coatings by Heterophase Transfer Combined with Laser Treatment // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2019. – V. 10. – P. 1378–1383.
2. Makarov A. M., Gerashchenkov D. A., Aleksandrov S. E., Belyakov A.N., Bykova 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.
3. Gerashchenkov D. A., Kuznetsov P. A., Makarov A. M., Krasikov A. V., Markov M. A. Investigation of the intermetallic coating of the Ni–Fe system obtained by surface laser treatment on a steel substrate // *Journal of Physics: Conference Series* 1758, 2021. – P. 012011.
4. Panagopoulos C. N., Markaki A. E., Agathocleous P. E. Excimer laser treatment of nickel-coated cast iron // *Materials Science and Engineering*. – 1998. – V. A241. – P. 226–232.
5. Matsukawa K., Kataoka M., Morinushi K., The effect of pulsed laser annealing on wear and corrosion properties of electroless Ni–P plating // *Tribology Transactions*. – 1994. – V. 37. – P. 573–579.
6. García-Alonso M. C., Escudero M. L., López V., Macías A. The corrosion behavior of laser treated Ni–P alloy coatings on mild steel // *Corrosion Science*. – 1996. – V. 38. – P. 515–530.
7. Garcia-Alonso M. C., Escudero M. L., Lopez V., Macias A. Microstructure and corrosion behavior of Ni–P laser surface alloys // *ISIJ International*. – 1996. – V. 36, N. 2. – P. 172–178.
8. Chen H., Ren X., Zhang X., Li J. Wear and Corrosion Properties of Crystalline Ni–W Alloy Coatings Prepared by Electrodeposition // *Materials Science Forum*. – V. 849. – P. 671–676.
9. Василько А. Т. Электрохимия вольфрама. – Киев: Техніка, 1969. – 164 с.
10. Donten M. Bulk and surface composition, amorphous structure, and thermocrystallization of electrodeposited alloys of tungsten with iron, nickel, and cobalt // *J Solid State Electrochem*. – 1999. – N 3. – P. 87–96.
11. Yamasaki T., Tomohira R., Ogino Y., Schloßmacher P., Ehrlich Y. Formation of ductile amorphous & nanocrystalline Ni–W alloys by electrodeposition // *Plating & surface finishing*. – 2000. – N. 87. – P. 148–152.
12. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т.3, кн. 1 /Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – 872с.

УДК 621.9.048.7:621.793

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОКРЫТИЯ ИЗ АЛЮМИНИЯ НА СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКЕ

А. А. МОЖАЙКО<sup>1,2</sup>, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, М. В. СТАРИЦЫН<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>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Поступила в редакцию 15.03.2022

После доработки 27.03.2022

Принята к публикации 30.03.2022

Лазерная обработка поверхности – сложный процесс, при котором под воздействием лазера поверхность материала плавится, при этом изменяются его структура и свойства. В настоящей работе рассматривается моделирование процесса и приводятся результаты исследования влияния параметров лазерной обработки на размеры ванны расплава. Основной целью исследования является выявление зависимости глубины ванны расплава, а именно толщины слоя, в котором протекает процесс перемешивания компонентов, от параметров лазера. В результате исследования установлено, что после лазерной обработки поверхности образцов с толщиной покрытия 20, 40 и 80 мкм при скорости перемещения лазера 100 мм/с и мощности 180 Вт происходит полное перемешивание материала покрытия с материалом подложки. Также показано, что при скорости перемещения лазера 400 и 800 мм/с и мощности 180 Вт в зоне воздействия лазера не происходит перемешивания компонентов, так как энерговыделения недостаточно.

*Ключевые слова:* лазерная обработка поверхности, тепловое моделирование, метод конечных элементов, алюминий, ванна расплава, газодинамическое напыление

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-44-57

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Samant A. N., Du B., Paital S. R., Kumar S., Dahotre N. B. Pulsed laser surface treatment of magnesium alloy: Correlation between thermal model and experimental observations // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – V. 209. – P. 5060–5067.
2. Fribourg G., Deschamps A., Bréchet Y., Mylonas G., Labeas G., Heckenberger U., Perez M. Microstructure modifications induced by a laser surface treatment in an AA7449 aluminium alloy // *Materials Science and Engineering*. – 2011. – V. 528. – P. 2736–2747.
3. Chauhan A. S., Jha J. S., Telrandhe S., S. V., Gokhale A. A., Mishr S. K. Laser surface treatment of  $\alpha$ - $\beta$  titanium alloy to develop a  $\beta$ -rich phase with very high hardness // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – V. 288. – P. 116873.
4. Syed B., Maurya P, Lenka S., Padmanabham G., Shariff S. M. Analysis of high strength composite structure developed for low-carbon-low-manganese steel sheet by laser surface treatment // *Optics & Laser Technology*. – 2021. – V. 143. – P. 107285.
5. Makarov A. M., Gerashchenkov D. A., Kuznetsov P. A., Ryabov V. V., Vasiliev O. S. Investigation of the influence of laser treatment modes on coatings of aluminum, nickel, nickel-titanium systems // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2021. – V. 1758. – P. 12024.
6. Wu Y., Lin J., Carlson B. E., Lu P., Balogh M. P., Irish N. P., Mei Y. Effect of laser ablation surface treatment on performance of adhesive-bonded aluminum alloys // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – V. 304. – P. 340–347.
7. Dong Z., Liu Y., Wen W., Ge J., Liang J. Effect of Hatch Spacing on Melt Pool and As-built Quality During Selective Laser Melting of Stainless Steel: Modeling and Experimental Approaches // *Materials*. – 2019. – V. 12, N 1. – P. 50.
8. Mohanty S., Hattel J. H. Numerical model based reliability estimation of selective laser melting process // *Phys. Procedia*. – 2014. – V. 56. – P. 379–389.
9. Ansari M. J., Nguyen D.-S., Park H. S. Investigation of SLM Process in Terms of Temperature Distribution and Melting Pool Size: Modeling and Experimental Approaches // *Materials*. – 2019. – V. 12, N 8. – P. 1272.
10. Chaurasia J. K., Jinoop A. N., Paul C. P., Bindra K. S., Bontha S. Study of melt pool geometry and solidification microstructure during laser surface melting of Inconel 625 alloy // *Optik*. – 2021. – V. 246. – P. 167766.
11. Kuznetsov P., Shakirov I., Mozhayko A., Zhukov A., Bobyr V. Comparison of sequential and circular scanning thermal fields and their influence on microstructure of Alnico alloy produced by laser powder bed fusion // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – V. 1967. – P. 012064.
12. Li C., Liu J. F., Guo Y. B. Prediction of residual stress and part distortion in selective laser melting, *Procedia CIRP*. – 2016. – V. 45. – P. 171–174.

13. Bonacina C., Comini G., Fassano A., Primicerio M. Numerical solutions of phase change problems // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1973. – V. 16. – P. 1825–1832.
14. Kurzynowski T., Stopyra W., Gruber K., Ziółkowski G., Kuźnicka B., Chlebus E. Effect of Scanning and Support Strategies on Relative Density of SLM-ed H13 Steel in Relation to Specimen Size // *Materials*. – 2019. – V. 12, N 2. – P. 39.
15. Balichakra M., Bontha S., Krishna P., Balla V. K. Laser surface melting of  $\gamma$ -TiAl alloy: an experimental and numerical modeling study // *Mater. Res. Express*. – 2019. – V. 6. – P. 046543.
16. Farid N., Sharif A., Gupta P. D., O'Connor G. M. Selective laser ablation of molybdenum from aluminium in a multi-layered thin film system // *Surfaces and Interfaces*. – 2021. – V. 26. – P. 101438.
17. Зубченко А. С., Колосков М. М., Каширский Ю. В. Марочник сталей и сплавов. Изд. 2-е. – М.: Машиностроение, 2003.
18. Branco D. D. C., De Vasconcelos L. S., An L., Zhao K., Cheng G. J. Ultrastrong pure aluminum structure with gradient nanocrystals via selective pulsed laser melting: Computation framework and experiments // *J. Mech. Phys. Solids*. – 2021. – V. 151. – P. 104391.
19. Oryshchenko A. S., Gerashchenkov D. A. Aluminum matrix functional coatings with high microhardness on the basis of Al–Sn + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite powders fabricated by cold gas dynamic spraying // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2016. – V. 7. – P. 863–867.
20. Gerashchenkov D. A., Farmakovskii B. V., Bobkova T. I., Klimov V. N. Features of the Formation of Wear-Resistant Coatings from Powders Prepared by a Micrometallurgical Process of High-Speed Melt Quenching, *Metallurgist*. – 2017. – V. 60. – P. 1103–1112.
21. Gerashchenkov D. A., Kuznetsov P. A., Makarov A. M., Krasikov A. V., Markov M. A. Investigation of the intermetallic coating of the Ni–Fe system obtained by surface laser treatment on a steel substrate // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2021. – V. 1758. – P. 12011.
22. Geraschenkov D. A., Vasiliev A. F., Farmakovskiy B. V., Mashek A. Ch. Study of the flow temperature in the process of cold gas-dynamic spraying of functional coatings // *Materials Science*. – 2014. – N 1. – P. 87–96.
23. Кубашевски О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа: Справочник / Под ред. Л. А. Петровой; Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1985. – 183 с.

УДК 621.793.7

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ЕДИНИЧНЫХ ТРЕКОВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХГДН ИЗ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И НИКЕЛЯ**

А. С. ОРЫЩЕНКО, чл.-корр. РАН, 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 14.04.2022

После доработки 20.05.2022

Принята к публикации 2.06.2022

Экспериментально исследованы профили отдельных треков в зависимости от расхода порошка, скорости перемещения сопла и температуры при создании методом холодного газодинамического напыления (ХГДН) покрытия из монометаллического порошка алюминия, смеси двух монометаллических порошков системы алюминий–никель и никель–титан, а также композиционного порошка из смеси монометаллического порошка алюминия и корунда. Порошки алюминия и никеля выбраны в качестве исследуемых, так как они являются основой для большинства функциональных покрытий. Установлена зависимость профиля трека от скорости сканирования, определен шаг между треками, обеспечивающий равномерное покрытие.

*Ключевые слова:* холодное газодинамическое напыление, порошковая металлургия, профиль треков, скорость перемещения сопла,

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-110-2-58-70



## ЛИТЕРАТУРА

1. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. – 2010. – 536 р.
2. Herman H., Sampath S., McCune R. Thermal Spray: Current Status and Future Trends // MRS Bull. – 2000. – V. 25.
3. Davis J. R. Introduction to Thermal Spray Processing: Handbook of Thermal Spray Technology. – 2004. – P. 3–13.
4. The Influence of Nozzle Design on HVOF Exit Gas Velocity and Coating Microstructure / Korpiola K. et al. // J. Therm. Spray Technol. – 1997. – V. 6.
5. Davis J. R. Cold Spray Process, Thermal Spray Technology. – ASM International, 2004. – P. 77–84.
6. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф. Фармаковский Б. В., Машек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – V. 2, № 77. – С. 87–96.
7. The 2016 Thermal Spray Roadmap / Vardelle A. et al. // J. Therm. Spray Technol. – 2016. – V. 25.
8. Cold spraying – A materials perspective / Assadi H. et al. // Acta Mater. – 2016. – V. 116. – P. 382–407.
9. Low Pressure Cold Spraying under 6 Bar Pressure Deposition: Exploration of High Deposition Efficiency Solutions Using a Mathematical Modelling / Raelison R.N. et al. // Surf. Coat. Technol. – 2016. – V. 302.
10. Deposition Efficiency of Low Pressure Cold Sprayed Aluminum Coating / Huang G. et al. // Mater. Manuf. Process. – 2018. – V. 33.
11. High Pressure Cold Sprayed (HPCS) and Low Pressure Cold Sprayed (LPCS) Coatings Prepared from OFHC Cu Feedstock: Overview from Powder Characteristics to Coating Properties / Koivuluo H. et al. // J. Therm. Spray Technol. – 2012. – V. 21.
12. Davis J. R. Process Comparisons, Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. – ASM International, 2001. – P. 183–193.

УДК. 621.793.7:66.097.5

### КОГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ КАТАЛИТИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ni–Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

Н. В. ЯКОВЛЕВА, А. М. МАКАРОВ

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

Поступила в редакцию 23.05.2022

После доработки 16.06.2022

Принята к публикации 17.06.2022

Методом холодного газодинамического напыления и последующего отжига получены пористые композиционные покрытия на основе системы Ni–Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на металлической подложке. Установлено, что при максимальном содержании гидроксида алюминия Al(OH)<sub>3</sub> в исходной порошковой смеси 70%, формируется качественное покрытие. Получены зависимости влияния состава металлической и керамической составляющих на когезию покрытий в условиях ультразвуковой обработки.

**Ключевые слова:** холодное газодинамическое напыление, каталитический носитель, пористое покрытие, гидроксид алюминия, ультразвуковая обработка, когезия, потеря массы

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-71-80

## ЛИТЕРАТУРА

1. Adegbite S.A. Measuring the adhesion of alumina coatings onto FeCrAlloy supports using a mechanical testing system // Applied Surface Science. – 2012. – N 259. – P. 338–342.

© 2022

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

2. Yang J., Holt E.M., Huang K., Blanco-Garscia P., Wagland A. Cohesive strength measurement of catalyst layer: Uniform drying and on-line monitoring // *Chemical engineering research and design*. – 2018. – N 132. – P. 1117–1130.
3. Kong X., Qiu M., Wang A., Yang L., Zhou R., Fan Y., Kong D., Gu C. Influence of alumina binders on adhesion and cohesion during preparation of Cu–SAPO–34/Monolith Catalysts // *Applied ceramic technology*. – 2018. – N 15(6). – P. 1490–1501.
4. Pranevicius L. L., Valatkevicius P., Valincius V., Montassier C. Catalytic behavior of plasma-sprayed Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings doped with metal oxides // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – N 125. – P. 392–395.
5. Яковлева Н. В., Макаров А. М., Повышев А. М., Шишкова М. Л. Исследование фазовых превращений при синтезе каталитических покрытий на металлическом носителе. // *Журнал прикладной химии*. – 2018. – № 1 (91). – С. 36–44.
6. Wang F., Zhang D., Zheng S., Qi B. Characteristic of cold sprayed catalytic coating for hydrogen production through fuel reforming // *International journal of hydrogen energy*. – 2010. – N 35. – P. 8206–8215.
7. Moridi A., Hassani-Gangaraj S. M., Guagliano M., Dao M. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives // *Surface Engineering*. – 2014. – N 6 (36). – P. 369–395.
8. Silva F., Cinca N., Dosta S., Cano I. G., Guilemany J., Benedetti A. V. Cold gas spray coatings: basic principles, corrosion protection and applications // *Eclética Química Journal*. – 2017. – N 1 (42). – P. 9–32.
9. Singh H., Sidhu T., Kali S.S. Cold spray technology: future of coating deposition processes // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2012. – N 22. – P. 69–84.
11. Ryu S.H., Hwang C. H., Jeong H., G. Kim, Ahn S. I., Park J. S., Choi J. H. Enhanced adhesion strength of Pt/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts on STS-444 substrate via  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> intermediate layer formation: application for CO and C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> oxidation // *Catalysts*. – 2022. – N 12 (38). – P. 1–9.
12. He L., Fan Y., Luo L., Bellettre J., Yue J. Preparation of Pt/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst coating in microreactors for catalytic methane combustion // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – N 380. – P. 122424.
13. Blanco-Garscia P., Yang J., Salman A.D. A Review of Measurement Techniques of Mechanical Properties of the Catalyst Layer in Catalytic Converters // *Johnson Matthey technology review*. – 2019. – N 3 (63). – P. 177–190.

УДК 678.742.21+678.742.4

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ ПОЛИЭТИЛЕН НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ + ПОЛИБУТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ + СОВМЕСТИТЕЛЬ

Т. А. БОРУКАЕВ<sup>1</sup>, д-р хим. наук, Л. И. КИТИЕВА<sup>2</sup>, канд. хим. наук

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова», 360004, Нальчик, пр. Чернышевского, 174. E-mail: boruk-chemical@mail.ru

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Ингушский государственный университет», 386001, Магас, пр. Зязикова, 7

Поступила в редакцию 24.02.2022

После доработки 16.03.2022

Принята к публикации 18.03.2022

Получены полимерные композиты на основе полиэтилена низкой плотности и полибутилентерефталата. Установлено, что использование совместителя позволяет улучшить совместимость исходных термодинамически несовместимых полимеров. Показано, что полимерные композиты, содержащие совместитель, по своим физико-механическим характеристикам превосходят исходные полимеры и смеси на их основе.

**Ключевые слова:** композиты, полиэтилен низкой плотности, полибутилентерефталат, совместитель, физико-механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-105-1-81-89

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин Э. Л., Саковцева М. Б., Павлова И. В., Кавокин Е. И., Сакович Д. А. Эффективный подход к созданию современных композиционных материалов // Полимерные материалы. – 2008. – № 3. – С. 4–14.
2. Колосов А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 5 (часть 1). – С. 245–256.
3. Чуков Н. А., Лигидов М. Х., Пахомов С. И., Микитаев А. К. Смеси полимеров на основе полипропилена // Российский хим. журнал. – 2015. – Т. 59, № 4. – С. 114–125.
4. Markovic G., Visakh P. M., Pasquini D. Recent Developments in Polymer Macro and Nano Blends. – Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017. – 342 pp.
5. Кахраманлы Ю. Н. Несовместимые полимерные смеси и композиционные материалы на их основе. – Баку: «ЭЛМ», 2013. – 152 с.
6. Гаева М. Х., Борукаев Т. А., Машуков Н. И., Микитаев А. К. Полимерные смеси на основе полибутилентерефталата и полиолефинов, устойчивые к действию высоких температур // Пластические массы. – 2003. – № 10. – С. 28–31.
7. Кацапова О. В., Лапковский В. В. Изучение физико-химических свойств волокнистых материалов из смесей полиалкилентерефталатов и изотактических полиолефинов // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. XXII, № 5(85). – С. 13–16.
8. Микитаев М. А., Козлов Г. В., Микитаев А. К. Структурный анализ совместимости полимерных смесей // Пластические массы. – 2017. – № 1–2. – С. 20–23.
9. Микитаев М. А., Козлов Г. В., Микитаев А. К., Заиков Г. Е. Пластичность смесей полиэтилен-терефталат/полибутилентерефталат // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 7. – С. 132–134.
10. Тхакахов Р. Б., Карамурзов Б. С., Тхакахов Э. Р., Пшихачев А. Г. Процессы релаксации и разрушения в композитах с наноструктурной морфологией // Пластические массы. – 2012. – № 3. – С. 28–33.
11. Хайрулин Р. З., Суханов П. П., Архиреев В. П. Влияние молекулярной массы полипропилена на свойства системы полипропилен-поликапролактан // Вестник Казанского технологического университета. – 2007. – Т. 10, № 5. – С. 69–76.
12. Микитаев М. А., Мамхегов Р. М., Козлов Г. В., Микитаев А. К., Заиков Г. Е. Зависимость вязкости расплава смесей полиэтилен-терефталат/полибутилентерефталат от их совместимости // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 16. – С. 154–156.
13. Акаева М. М., Машуков Н. И. Исследование стойкости к агрессивным средам композиционных материалов на основе ПБТ + ПЭВП // Пластические массы. – 2008. – № 11. – С. 5–8.
14. Фомина Н. Н., Хозин В. Г. Компатибилизация смесей полимеров при переработке отходов изделий из термопластов // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Т. 13, № 4. – С. 229–236.
15. Екимов А. И., Айзинсон И. Л., Кулачинская О. Б. Некоторые аспекты антагонизма компонентов в термопластичных полимерных материалах // Полимерные материалы. – 2007. – № 09. – С. 6–11.
16. Смеси полимеров / Под ред. В. Н. Кулезнева. – М.: Химия, 1980. – 303 с.
17. Алексеева Т. Т., Липатов Ю. С., Яровая Н. В. Межфазная область в компатибилизированных взаимопроникающих сетках на основе полиуретана-полистирола // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2005. – Т. 47, № 8. – С. 1535–1544.
18. Maiti S. N., Misra A. Poly(butylene terephthalate)/High Density Polyethylene Alloys. Mechanical Properties and Rheology // J. of Applied Polym. Sci. – 1992. – V. 45. – P. 1837–1847.
19. Bruggen E. P. A., Koster R. P., Picken S. J., Ragaert K. Influence of Processing Parameters and Composition on the Effective Compatibilization of Polypropylene–poly(ethylene terephthalate) Blends // International Polymer Processing. – 2016. – V. 31, № 2. – P. 179–187.
20. Диканова Н. С., Мацевич А. В., Коврига О. В., Аскадский А. А., Кравченко Т. П., Аристов В. М. Исследование релаксационных механических свойств нанокompозитов на основе ПЭНД // Пластические массы. – 2017. – № 3–4. – С. 14–18.

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛИИМИДНОГО УГЛЕПЛАСТИКА

М. И. ВАЛУЕВА, канд. техн. наук, И. В. ЗЕЛЕНИНА, А. В. НАЧАРКИНА, С. Л. ЛОНСКИЙ

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

Поступила в редакцию 2.03.2022

После доработки 15.03.2022

Принята к публикации 17.03.2022

Представлены результаты исследования влияния лабораторно имитируемых внешних воздействующих эксплуатационных факторов – водо- и влагонасыщения, совместного воздействия повышенной температуры и влажности, экспозиции в камере тропического климата на свойства высокотемпературного углепластика на основе расплавного терморезактивного полиимидного связующего. Проведены исследования структуры, температуры стеклования и упругопрочностных характеристик углепластика после экспозиций, оценено изменение массы образцов углепластика в процессе длительного воздействия воды и влаги.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, ПКМ, высокотемпературные углепластики, полиимидные связующие, термовлажностное воздействие, структура, свойства

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-90-101

### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. – СПб.: Научные основы и технологии. – 2011. – 416 с.
2. Shi-Yong Yang. Advance polyimide materials: synthesis, characterization, and applications. 1<sup>st</sup> edition. – Elsevier, 2018. – 498 p.
3. Гуляева А. Г., Курносоев А. О., Гуляев И. Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ» для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2021. – №1 (95) . – С. 43–53. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
4. Зеленина И. В., Гуляев И. Н., Кучеровский А. И., Мухаметов Р. Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора физико-механических свойств и микроструктуры объемно-армированного углепластика // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 2. – С. 64–71. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
5. Валуева М. И., Зеленина И. В., Ахмадиева К. Р., Жаринов М. А. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – №12. – С. 67–79. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
6. Валуева М. И., Зеленина И. В., Жаринов М. А., Хасков М. А. Высокотемпературные углепластики на основе терморезактивного полиимидного связующего // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3 (103). – С.89–102.
7. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 2. – С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
8. Каблов Е. Н., Лаптев А. Б., Прокопенко А. Н., Гуляев А. И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-технич. журн. – 2021. – № 4. – Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 24.01.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
9. Kablov E. N., Startsev V. O. Climatic aging of aviation polymer composite materials: I. Influence of significant factors // Russian metallurgy (Metally). – 2020. – V. 2020, N 4. – P. 364–372.

10. Kablov E. N., Startsev V. O. Climatic aging of aviation polymer composite materials: II. Development of methods for studying the early stages of aging // Russian metallurgy (Metally) . – 2020. – V. 2020, N 10. – P. 1088–1094.
11. Гуляев И. Н., Зеленина И. В., Валева Е. О., Шведкова А. К. Исследование влияния повышенной температуры и влажности на свойства термостойких углепластиков // Конструкции из композиционных материалов. – 2015. – № 3. – С. 55–60.
12. Гуляев И. Н., Зеленина И. В., Валева Е. О., Хасков М. А. Влияние климатического старения на свойства высокотемпературных углепластиков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2021. – № 2. – С. 39–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-39-51.
13. Валева Е. О., Старцев В. О., Зеленина И. В. Термическое старение, деградация поверхности и влагоперенос в углепластике марки ВКУ-ЗТР // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2020. – № 6–7. – С. 118–128. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-118-128.
14. Старцев В. О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно-теплом климате // Дис. ... докт. техн. наук. – М.: ВИАМ, 2018. – 308 с.
15. Валева Е. О. Влияние тепловлажностного воздействия на свойства термостойких полимерных композиционных материалов на основе фталонитрильной матрицы // Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2018. – 130 с.
16. Бессонов М. И., Котон М. М., Кудрявцев В. В., Лайус Л. А. Полиимиды – класс термостойких полимеров. – Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1983. – 328 с.
17. Пат. US 6127509A. № 09/319,218. Polyimides having high  $T_g$ , high TOS, and low moisture regain. – Заявл. 04.12.1997; опублик. 03.10.2000.
18. Деев И. С., Кобец Л. П. Структурообразование в наполненных терморезистивных полимерах // Коллоидный журнал. – 1999. – Т. 61, № 5. – С. 650–660.
19. Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных углепластиков // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3 (95). – С. 157–169.
20. Деев И. С., Добрянская О. А., Куршев Е. В. Влияние морской воды на микроструктуру и механические свойства углепластика в напряженном состоянии // Материаловедение. – 2012. – № 11. – С. 37–41.
21. Хасков М. А. Сравнительное определение температур стеклования полимерных композиционных материалов методами ДСК, ТМА и ДМА // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 3(79). – С. 138–144.

УДК 621.791.46/48

### **СВАРКА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ЕГО КОМПОЗИТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ФУТЕРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ**

М. Д. СОКОЛОВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. А. ЧИРИКОВ<sup>1</sup>, О. В. ГОГОЛЕВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
И. В. ЗЫРЯНОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup> Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение  
ФГБУН Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН»,  
677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, [ipog.ipng@ysn.ru](mailto:ipog.ipng@ysn.ru)

<sup>2</sup> ПАО Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», 678174, Мирный, ул. Ленина, 39,  
[institut-yna@alrosa.ru](mailto:institut-yna@alrosa.ru)

Поступила в редакцию 15.04.2022

После доработки 11.05.2022

Принята к публикации 2.06.2022

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) является одним из самых перспективных материалов триботехнического назначения благодаря уникальному комплексу технических

свойств: высокой прочности, износо-, влаго- и морозостойкости, стойкости в агрессивных средах, низкому коэффициенту трения. В настоящее время все больше горнодобывающих предприятий, в том числе АК «АЛРОСА» (ПАО), успешно используют листы СВМПЭ для защиты бункеров, кузовов самосвалов т. п. Однако из-за большой длины макромолекул СВМПЭ при нагревании не переходит в вязкотекучее состояние, что практически исключает возможность его переработки традиционными для термопластов технологиями (экструзией, литьем, сваркой). Изделия из него в настоящее время могут быть изготовлены методом горячего прессования и с небольшими габаритными размерами. Поэтому исследования, направленные на расширение возможности свариваемости СВМПЭ с образованием прочного сварного шва, являются актуальными, так как в результате можно получить габаритные и конструктивно более сложные изделия.

В настоящей работе для сварки СВМПЭ предлагается применение магнитной индукции. На основании результатов проведенных механических и структурных исследований установлена высокая эффективность способа сварки сверхвысокомолекулярного полиэтилена и его композитов с применением магнитной индукции с ферромагнетиком в виде металлической стальной сетки. Выбран оптимальный режим сварки, позволяющий получать качественный сварной шов. Установлено, что сохранение прочностных свойств сварного шва при выбранном режиме сварки на уровне монолитного образца обусловлено обеспечением регулируемого локального нагрева материала в зоне сварки и повышенной адгезией на границе раздела фаз СВМПЭ – металлическая сетка.

*Ключевые слова:* сверхвысокомолекулярный полиэтилен, футеровочное покрытие, сварка, ферромагнетик, стальная сетка, электромагнитная индукция, прочность шва, надмолекулярная структура, адгезия.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-102-110

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасенко А. А., Чижик Е. Ф. Защитные футеровки и покрытия горно-обогачительного оборудования. – Москва: Недра, 1985. – 208 с.
2. Елькин А. Б., Евсеева И. А. Оценка экономической эффективности мероприятий по безопасности и охране труда // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – Т. 6, № 2 (22). – С. 157–169.
3. Слаутин О. В., Проничев Д. В., Поверхностная обработка и покрытия [Электронный ресурс]: Учеб.-метод. пособие: Ч. 1. – Волгоград: ВолгГТУ, 2017. – 160 с.
4. Patel K., Chikkali S. H., Sivaram S. Ultrahigh molecular weight polyethylene: Catalysis, structure, properties, processing and applications // Progress in polymer science. – 2020. – V. 109. – P. 101290).
5. Gurgen S., Celik O.N., Kushan M. C. Tribological behavior of UHMWPE matrix composites reinforced with PTFE particles and aramid fibers // Composites Part B-Engineering. – 2019. – V. 173. – P. 106949. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106949.
6. Валуева М. И, Колобков А. С., Малаховский С. С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 3 (97). – С. 49–57.
7. Kurtz S. M. Ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement: UHMWPE handbook. – Elsevier Academic Press, 2004. 379 p.
8. Bracco P., Bellare A., Bistolfi A., Affatato S. Ultra-high molecular weight polyethylene: influence of the chemical, physical and mechanical properties on the wear behavior // A Review Materials. – 2017. – № 10. – P. 791.
9. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 2(51). – С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
10. Friction and wear properties of polyphenyl ester and graphite filler in the carbon fibre-reinforced ultra-high-molecular-weight polyethylene composites / Z. Wang, L. Guo, P. Gao et al. // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2018. – V. 49, N 1. – P. 21–29. DOI: 10.1002/mawe.201700112.
11. Экструдруемые полимер-полимерные композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) / С. В. Панин, Л. А. Корниенко, В. О. Алексенко и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2018. – Т. 19, № 1. – С. 16–23.

12. Чесноков А. В., Косоногова Л. Г. Перспективные направления усовершенствования композитной анкерной крепи // Науковий вісник Національного Гірничого університету. – 2013. – № 1. – С. 39–44.

13. Quality Assessment of Melanocratic Basalt for Mineral Fiber Product, Southern Urals, Russia / A. Pisciotta, B. V. Perevozchikov, B. M. Osovetsky et al. // Natural resources research. – 2015. – V. 24, N 3. – P. 329–337. DOI: 10.1007/s11053-014-9253-9.

14. Gogoleva O. V., Petrova P. N., Popov S. N., Okhlopkova A. A. Wear-Resistant Composite Materials Based on Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene and Basalt Fibers // Journal of Friction and Wear. – 2015. – V. 36, N 4. – P. 301–305.

15. Патент РФ №184919 от 14.11.2018. Устройство для сварки сверхвысокомолекулярного полиэтилена / Шадрин Н. В., Чириков А. А., Федоров А. Л., Антоев К. П., Соколова М. Д.

16. Чириков А. А., Соколова М. Д., Гоголева О. В., Федоров А. Л. Изучение структурообразования в сварном шве при сварке сверхвысокомолекулярного полиэтилена с применением технологии магнитной индукции // Сварка и диагностика. – 2021. – № 4. – С. 25–28.

17. Медведева Е. В., Чердынцев В. В. Структура содержащих неравноосные неорганические включения полимерных композиционных материалов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 116.

18. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Reinforced with Multi-Walled Carbon Nanotubes: Fabrication Method and Properties / A. V. Maksimkin, S. D. Kaloshkin, M. S. Kaloshkina, et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2012. – V. 536. – P. 538–540.

УДК:621.791.052:621.039.536.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕТАЛЛА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ КОРПУСА АТОМНОГО РЕАКТОРА ИЗ Cr–Mo–V СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

М. Н. ТИМОФЕЕВ, канд. техн. наук, С. Н. ГАЛЯТКИН, 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 2.03.2022

После доработки 22.03.2022

Принята к публикации 30.03.2022

Представлены результаты исследования изменения структуры и механических свойств металла сварного соединения стали 15X2МФА-А мод. А в процессе высоких отпусков при изготовлении корпуса реактора и в результате тепловых выдержек при его эксплуатации. Установлено, что в исходном после сварки состоянии металл шва имеет удовлетворительную пластичность и высокий уровень ударной вязкости, но чрезмерно высокий уровень прочности. Промежуточный отпуск при температуре 655°C снижает уровень прочности, однако не приводит к существенному повышению ударной вязкости. Окончательные свойства формирует высокий отпуск при температуре 670°C. Выявлена низкая чувствительность металла зоны термического влияния и основного металла к отпускам при указанных температурах, а также к тепловым выдержкам при температуре 350°C.

**Ключевые слова:** металл сварного шва, зона термического влияния, структура, термическая обработка, охрупчивание, корпус реактора, ударная вязкость, твердость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-111-123

### ЛИТЕРАТУРА

1. Tokuhisa M., Hirai Y., Nishiyama N., Yamashita I., Nishio K., Nakatsuji K. Development of High-Quality Narrow Gap Submerged Arc Welding Consumables for Cr–Mo Steel // Kawasaki Steel Technical Report. – 1986. – N 15. – P. 74–83.

2. Hucińska J., Haras J. Opracowanie szczegółowego programu i procedur badań nieniszczących reaktorów 0150-R1 i 0150-R2 w Rafinerii Gdańskiej SA pod kątem dopuszczenia ich do eksploatacji na czas dłuższy niż 100 000 godzin oraz badania stanu zerowego reaktorów // Report no. 013448. Gdańsk University of Technology, Mechanical Engineering Faculty, 1999.

3. Vrostkova A., Kroupa A., Janovec J., Svoboda M. Carbide reactions and phase equilibria in low alloy Cr–Mo–V steels tempered at 773–993 K. Part I: experimental measurements // Acta materialia. – 1998. – N 1 (46). – P. 31–38.
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (НП-104-18). – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2018. – 260 с.
5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭГ-7-002–86) / Госатомнадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
6. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
7. Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демянцевич В. П. Технология и оборудование сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
8. Теплухина И. В., Цветков А. С., Зайцева О. Ю. Гарантированный уровень механических свойств металла крупногабаритных поковок из стали марки 15Х2МФА-А мод. А и влияние металлургических технологий на его обеспечение // Технология металлов. – 2006. – № 3. – С. 17–30.
9. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 320 с.
10. Hodgson D. K., Dai T., Lippold J. C. Transformation and Tempering Behavior of the Heat-Affected Zone of 2.25Cr–1Mo Steel // Welding Journal. – 2015. – V. 94. – P. 250-s–256-s.
11. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Фоменко А. В., Шубин О. В. Анализ опыта изготовления корпуса реактора и блока верхнего проекта ВВЭР-ТОИ из сталей 15Х2НМФА кл. 1 и 15Х2МФА-А мод. А // Тяжелое машиностроение. – 2021. – № 9. – С. 9–17.
12. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н. Исследование стойкости против теплового охрупчивания металла сварных швов корпусов атомных реакторов из сталей типа 15Х2МФА // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. – 2020. – Вып. 3 (104). – С. 4–13.
13. Дуб А. В., Юханов В. А. Оценка срока службы действующих реакторных установок ВВЭР-1000 // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 12. – С. 9–12.
14. Грекова И. И., Юханов В. А., Филимонов Г. Н., Зубченко А. С. Термическое старение материалов для корпусов ВВЭР // Сб. докладов 3-й международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», Москва–Санкт-Петербург, 17–22 июня 1994 г. – С. 439–451.
15. Карзов Г. П., Тимофеев Б. Т., Чернаенко Т. А. Старение материалов оборудования АЭС при эксплуатации в течение проектного срока службы // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2(42). – С. 92–110.

УДК 621.791.053:621.039.2

### **ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНЫХ ШВОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР**

Д. А. МАЛЬЦЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Е. А. КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук,  
С. В. ФЕДОТОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В. В. ВАСИЛЕНКО<sup>1</sup>, С. А. БУБЯКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва,  
Каширское шоссе, д.31

Поступила в редакцию 22.04.2022

После доработки 12.05.2022

Принята к публикации 2.06.2022

Выполнен анализ влияния зеренной структуры и фазового состава сварных швов реакторов типа ВВЭР на их эксплуатационные характеристики в исходном после сварки состоянии. Проведены комплексные исследования сварных швов с различными структурами, сформированными в результате сварки по различным технологиям. Показано, что различия фазового состава и морфоло-



гии зеренной структуры металла сварных швов в исходном после сварки состоянии, для которой характерны повышенная доля столбчатых зерен и более высокая плотность карбидных фаз, приводят к повышению предела текучести и критической температуры хрупкости сварных соединений.

**Ключевые слова:** корпус реактора, металл сварного шва, зеренная структура, фазовый состав, критическая температура хрупкости, предел текучести.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-124-139

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Analysis of embrittlement of WWER-1000 RPV materials / B. Z. Margolin et al. // *Int. J. Press. Vessel. Pip.* – 2012. – V. 89. – P. 178–186.
2. Mechanism of Change In VVER-440, -1000 Vessel Material Properties in Irradiation – Recovery Annealing – Irradiation Cycle / B. A. Gurovich et al. // *At. Energy.* – 2018. – V. 125, N 2. – P. 95–102.
3. Evolution of structure and properties of VVER-1000 RPV steels under accelerated irradiation up to beyond design fluences / B. Gurovich et al. // *J. Nucl. Mater. Elsevier B.V.* – 2015. – V. 456. – P. 23–32.
4. A new approach to description of in-service embrittlement of WWER-1000 reactor pressure vessel materials / B. Z. Margolin et al. // *Strength Mater.* – 2010. – V. 42, N 1. – P. 2–16.
5. Erak D. Y., Zhurko D. A., Papina V. B. Interpretation of Accelerated Irradiation Results for Materials of WWER-1000 Reactor Pressure Vessels // *Strength Mater.* – 2013. – V. 45, N 4. – P. 424–432.
6. Chernobaeva A. A., Shulgan N. A., Shtrombakh Ya. I., Titova T. I., Nikolaev Yu. A., Blinova, M.G., Mechanical properties distribution in welds and forging of VVER-1000 // *Proc. ASME Press. Vessel. Pip. Conf. V. 6, Parts A, B, 2010.* – P. 759–765. [Doi.org/10.1115/PVP2009-77236](https://doi.org/10.1115/PVP2009-77236).
7. Chemical composition effect on VVER-1000 RPV weld metal thermal aging / B. A. Gurovich et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – V. 465. – P. 540–549.
8. Thermal ageing mechanisms of VVER-1000 reactor pressure vessel steels / Y. I. Shtrombakh et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2014. – V. 452, N 1–3. – P. 348–358.
9. McMahon C. J., Gentner D. H., Ucisik A. H. An Investigation of the Effects of Grain Size and Hardness in Temper-Embrittled 2 1/4 Cr-1 Mo Steel // *Journal of Engineering Materials and Technology: Transactions of the ASME.* – 1984. – V. 106(1). – P. 66–70. DOI:10.1115/1.3225678.
10. Николаева А. В., Николаев Ю. А., Шур Д. М., Чернобаева А. А. Прогнозирование склонности Cr–Ni–Mo стали к отпускной хрупкости // *Физика металлов и материаловедение.* – 1993. – Т. 76. – С. 163–170.
11. Petch N. J. The cleavage strength of polycrystalline // *J. Iron and Steel Inst.* – 1953. – V. 173. – P. 25–28.
12. ГОСТ 18895–97. Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа.
13. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
14. Gurovich B., Kuleshova E., Zabusov O., Fedotova S., Frolov A., Saltykov M., Maltsev D. Influence of structural parameters on the tendency of VVER-1000 reactor pressure vessel steel to temper embrittlement // *J. Nucl. Mater.* – 2013. – V. 435, N 1–3. – P. 25–31.
15. *Encyclopaedia of Mathematics: V. 9: Stochastic Approximation* / M. Hazewinkel (Ed.). – Zygmund Class of Functions, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1993.
16. Bell D. C., Garratt-Reed A. J. *Energy Dispersive X-ray Analysis in the Electron Microscope.* – Oxford: Taylor & Francis. 2003. – 160 p.
17. Williams D. B., Carter C. B. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science.* – New York: Springer, 2009. – 760 p.
18. Development of the DIFFRACALC program for analyzing the phase composition of alloys / A. S. Frolov et al. // *Crystallogr. Reports.* – 2017. – V. 62, N 5. – P. 809–815.
19. Naudin C., Frund J., Pineau A. Intergranular fracture stress and phosphorus grain boundary segregation of a Mn–Ni–Mo steel // *Scr. Mater.* – 1999. – V. 40, N 9. – P. 1013–1019.
20. ГОСТ 1497–84 Металлы. Методы испытаний на растяжение.

21. ГОСТ Р 50.05.1 2–2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Контроль герметичности газовыми и жидкостными методами. Приложение Д.
22. Ghosh C. K. *Advanced Characterization Techniques*. – 2015. – P. 113–144.
23. Material science aspects of new principles of operational characteristic improvement for heat-resistant steels for pressure vessels of NPP and their practical realization / G. P. Karzov et al. // *Probl. At. Sci. Technol.* – 2011. – N 2. – P. 46–53.
24. Чернобаева А. А., Кулешова Е. А., Мальцев Д. А., Медведев К. И., Красиков Е. А., Папина В. Б., Титова Т. И. Шульган Н. А., Корбатова Е. В., Батов Ю. М. Сравнительный анализ металла обечаек из стали 15Х2НМФАА современного производства и производства 70–80-х гг. // *История науки и техники*. – 2013. – № 8. – С. 106–118.
25. Evaluating the fracture toughness of reactor pressure vessel (RPV) materials subject to embrittlement. Some portions of this chapter have been gleaned from Chapter 3 of: *International Atomic Energy Agency, Integrity of Reactor Pressure Vessels in Nuclear* / R.K. Nanstad et al. // *Irradiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessels (RPVs) in Nuclear Power Plants*. – Elsevier, 2015. – P. 295–332.
26. Fractographic changes caused by phosphorus grain boundary segregation for a low alloy structural steel / S.-H. Song et al. // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2008. – V. 497, N 1–2. – P. 524–527.
27. Kuleshova E.A. et al. Comparison of microstructural features of radiation embrittlement of VVER-440 and VVER-1000 reactor pressure vessel steels // *J. Nucl. Mater.* – 2002. – V. 300, N 2–3. – P. 127–140.
28. Ductile-to-brittle transition temperature of thermally segregated WWER-1000 base metal / L. Debarberis, B. Acosta, A. Zeman, S. Pirfo, P. Moretto et al. // *Int. J. Microstruct. Mater. Prop.* – 2007. – V. 2. – P. 326–338.
29. Grain Boundary Phosphorus Segregation in Thermally Aged Low Alloy Steels / H. Nakata et al. // *J. Nucl. Sci. Technol.* – 2006. – V. 43, N 7. – P. 785–793.
30. Smith G., Crocker A. G., Flewitt P. E. J., Moskovic R. *Damage and Failure of Interface* / Ed. H. K. Rossmannith. – Balkema, 1997. – P. 229.
31. Islam M. A., Knott J. F., Bowen P. Critical Level of Intergranular Fracture to Affect the Toughness of Embrittled 2.25Cr–1Mo Steels // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2004. – V. 13, N 5. – P. 600–606.
32. Assessment of segregation kinetics in water-moderated reactors pressure vessel steels under long-term operation / E.A. Kuleshova et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2016. – V. 477. – P. 110–122.
33. Effect of subgrain structure on the kinetics of phosphorus segregation in grain boundaries / M. V. Sorokin et al. // *Mater. Lett.* – 2015. – V. 158. – P. 151–154.
34. Kinetics of phosphorus segregation at grain boundaries of low-alloy low-carbon steel / B.S. Bokshstein et al. // *Phys. Met. Metallogr.* – 2014. – V. 115, N 2. – P. 146–156.
35. Irradiation stimulated intergranular segregation in VVER-1000 reactor pressure vessel materials // O.O. Zabusov et al. // *Probl. At. Sci. Technol.* – 2013. – N 2.
36. Precipitation kinetics of radiation-induced Ni–Mn–Si phases in VVER-1000 reactor pressure vessel steels under low and high flux irradiation / E.A. Kuleshova et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2021. – N 553. – P. 153091.

УДК 621.791.019:539.431:669.14.018.295:620.178.3

**К РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ.  
Часть 2. Разработка расчетной методики**

А. В. ИЛЬИН, д-р техн. наук, К. Е. САДКИН, канд. техн. наук, Н. С. ЗАБАВИЧЕВ

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

Поступила в редакцию 17.05.2022

В первой части настоящей работы [1] обоснована процедура оценки числа циклов до появления «технически обнаруживаемой» усталостной трещины в концентраторах формы шва сварных соединений – обычных местах их возникновения при отсутствии крупных технологических дефектов. Она основана на использовании физической модели начальной стадии усталостного разрушения, обобщенных данных по сопротивлению усталостному разрушению высокопрочных сталей и металла их сварных соединений и расчетов МКЭ и сводится к применению интерполяционных формул, обобщающих результаты численного моделирования. В данной (второй) части настоящей работы представлен необходимый объем информации для выполнения практических оценок усталостной прочности в области малоциклового нагружения, включая выбор коэффициентов запаса при проведении расчетов ресурса сварных конструкций. Результаты оценок сопоставляются с данными, полученными при усталостных испытаниях сварных соединений больших толщин, выполненных многопроходной сваркой.

*Ключевые слова:* высокопрочные стали, сварные оболочечные конструкции, малоцикловое нагружение, усталостная прочность, методика расчета

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-140-170

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин А. В., Садкин К. Е., Забавичев Н. С. К расчетной оценке усталостной прочности сварных оболочечных конструкций из высокопрочных сталей при малоцикловом нагружении. Часть 1. Оценки на начальной стадии усталостного разрушения // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 3 (107). – С. 184–208.
2. RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures. Det Norske Veritas, April, 2015. – 129 p.
3. BS 7910: 2015. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
4. Hobbacher A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. – IIW-Doc. XIII-2151r1-07/XV-1254r1-07, May, 2007.
5. Карзов Г. П., Леонов В. П., Марголин Б. З. Расчетное определение полей остаточных сварочных напряжений в конструкциях оболочечного типа. Сообщение 1 // Автоматическая сварка. – 1992. – № 3. – С. 3–9; Сообщение 2 // Там же. – 1992. – № 4. – С. 7–13.
6. Материалы для судостроения и морской техники: Справочник. Т. 1 / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2009. – 776 с.
7. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справочник. Ч. 2 / Под ред. В. Т. Троценко. – Киев: Наукова Думка, 1994. – 701 с.
8. Гальчун И. А., Садкин К. Е., Назарова Е. Д. Циклическая трещиностойкость высокопрочных сталей, склонных к водородному охрупчиванию в коррозионной среде // Труды Крыловского государственного научного центра. Спец. вып. – 2021. – № 2. – С. 126–131.
9. Ильин А. В., Садкин К. Е. Определение конструктивной и технологической концентрации напряжений в сварных узлах при оценках усталостной прочности оболочечных конструкций // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2 (70). – С. 161–176.
10. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Шевцова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
11. Ильин А. В. Прочность и ресурс сварных конструктивных элементов морских технических сооружений // Дис. ... д-ра техн. наук. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2002.
12. Nykanen T., Bjork T. A new proposal for assessment of the fatigue strength of steel butt-welded joints improved by peening (HFMI) under constant amplitude tensile loading // Fatigue & Fracture of Eng. Material & Structures. – 2016. – N 39. – P. 566–582.
13. Леонов В. П., Маннинен Т. П., Мизецкий А. В. Особенности локальных остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях сталей, претерпевающих структурные превращения в зоне термического влияния // Вопросы материаловедения. – 2004. – № 4 (40). – С. 61–81.
14. RSE R&D Report № 2004/01, revision 4-1. Det Norske Veritas / Объединенная детерминистическая и вероятностная процедура для оценки безопасности конструкций с трещинами: Handbook, 2008.

15. Карзов Г. П., Кархин В. А., Леонов В. П., Марголин Б. З. Влияние остаточных напряжений на траекторию и скорость распространения трещины при циклическом нагружении сварных соединений // Автоматическая сварка. – 1986. – № 3. – С. 5–10.

16. Ильин А. В., Леонов В. П., Семенова В. Т. Особенности использования деформационного критерия разрушения при оценке долговечности сварных соединений // Вопросы судостроения. Сер. Сварка. – 1983. – Вып. 36. – С. 47–58.

17. Ahola A., Skriko T., Bjork T. Fatigue strength assessment of ultra-high-strength steel fillet weld joints using 4R method // Journal of Constructional Steel Research. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105861>. – 12 p.

18. РД5.90.2393–86 Поверхностно-пластическая обработка сварных соединений из высокопрочных сталей. ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».

19. Ильин А. В., Леонов В. П., Маннинен Т. П. Влияние геометрии сварных соединений на концентрацию упругих напряжений // Вопросы судостроения. Сер. Сварка. – 1981. – Вып. 32. – 9 с.

20. Васильев А. К., Ильин А. В., Карзов Г. П., Леонов В. П. Конструктивно-технологическая прочность сварных соединений из высокопрочных сталей // Вопросы материаловедения. – 1999. – № 3 (20). – С. 307–326.

21. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Пер. с англ./ Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990.

УДК 621.039.531:620.186

## ОЦЕНКА ПРОФИЛЯ РАСПУХАНИЯ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Е. А. КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, Д. А. МАЛЬЦЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
А. С. ФРОЛОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Н. В. СТЕПАНОВ<sup>1</sup>, Б. З. МАРГОЛИН<sup>3</sup>, д-р техн. наук,  
А. А. СОРОКИН<sup>3</sup>, канд. техн. наук, В. А. ПЕЧЕНКИН<sup>4</sup>, канд. техн. наук, М. В. БОХОВКО<sup>4</sup>,  
У. А. КОБЕЦ<sup>4</sup>.

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

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

<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>4</sup>АО ГНЦ РФ «Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского»,  
249033, Обнинск, Калужской обл., пл. Бондаренко, 1

Поступила в редакцию 31.01.2022

После доработки 25.03.2022

Принята к публикации 30.03.2022

Проведены сравнительные исследования пористости и расчет профиля набухания в образцах из аустенитной нержавеющей стали с содержанием никеля 10 и 20 мас. %, облученных на ускорителе «Тандем-3М» до одинаковых доз 300 сна ионами Ni с энергией ионов 11,5 МэВ при температуре 550°C с предварительной имплантацией He. Для расчета профиля набухания проводили цифровую обработку изображений образцов, полученных с помощью просвечивающей электронной микроскопии в сканирующем режиме (STEM). Кроме того, на облученных образцах с разным содержанием никеля были проведены сравнительные исследования фазового состава и радиационно-индуцированных сегрегаций на границах зерен, межфазных границах пора/матрица и на поверхности фазовых выделений.

**Ключевые слова:** аустенитная нержавеющая сталь, ионное облучение, пористость, набухание, фазовый состав, радиационно-индуцированные сегрегации, растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-171-184

## ЛИТЕРАТУРА

1. Voyevodin V. N., Neklyudov I. M. Evolution of the structure phase state and radiation resistance of structural materials. – Kiev: Naukova Dumka, 2006. – 375 p.
2. Kuleshova E. A., Frolov A. S., Prikhod'ko K. E., Krikun E. V. Software for indexing of electron diffraction patterns using X-ray Database // MCM, Budapest, august 2015.
3. Фролов А. С., Алексеева Е. В., Кулешова Е. А. Разработка программного обеспечения для определения параметров распределения пор и сегрегаций легирующих элементов в сталях аустенитного класса после ионного облучения // Кристаллография. – 2021. – V. 66, № 6. – P. 993–999.
4. Kurata H., Isoda S., Kobayashi T. Chemical Mapping by Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy // J. Electron Microsc. – 1996. – V. 45, N 4. – P. 317–320.
5. Lavergne J.-L., Martin J.-M., Belin M. Interactive electron energy-loss elemental mapping by the "Imaging-Spectrum" method // Microsc. Microanal. Microstruct. – 1992. – V. 3. – P. 517–528.
6. Williams D. B., Carter C. B. Transmission Electron Microscopy. A Textbook for Materials Science. 2<sup>nd</sup> red. – Springer, 2009. – 832 с.
7. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. – М.: Техносфера, 2006. – 256 с.
8. Frolov A. S., Krikun E. V., Prikhodko K. E., Kuleshova E. A. Development of the DIFFRACALC program for analyzing the phase composition of alloys // Crystallogr. Reports. – 2017. – V. 62, N 5. – P. 809–815.
9. Malis T., Cheng S. C., Egerton R. F. EELS log-ratio technique for specimen-thickness measurement in the TEM // J. Electron. Microsc. Tech. – 1988. – V. 8. – P. 193–200.
10. Yang Y. Y., Egerton R. F. Tests of two alternative methods for measuring specimen thickness in a transmission electron microscope // Micron. – 1995. – V. 26, N 1. – P. 1–5.
11. Zhang H.-R., Egerton R. F., Malac M. Local thickness measurement through scattering contrast and electron energy-loss spectroscopy // Micron. – 2012. – V. 43. – P. 8–15.
12. Egerton R. F., Cheng S. C. Measurement of local thickness by electron energy-loss spectroscopy // Ultramicroscopy. – 1987. – V. 21. – P. 231–244.
13. Iakoubovskii K., Mitsuishi K., Nakayama Y., Furuya K. Thickness measurements with electron energy loss spectroscopy // Microsc Res Tech. – 2008. – V. 71. – P. 626–631.
14. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.
15. Allen T. R., Cole J. I., Kenik E. A., Was G. S. Analyzing the effect of displacement rate on radiation-induced segregation in 304 and 316 stainless steels by examining irradiated EBR-II components and samples irradiated with protons // J. Nucl. Ma. – 2008. – V. 376. – P. 169–173.
16. Gurovich B. A., Kuleshova E. A., Frolov A. S., Maltsev D. A., Prikhodko K. E., Fedotova S. V., Margolin B. Z., Sorokin A. A. Investigation of high temperature annealing effectiveness for recovery of radiation-induced structural changes and properties of 18Cr–10Ni–Ti austenitic stainless steels // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 465. – P. 565–581.

УДК 621.039.531:539.422

### **ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР И ФОРМУЛИРОВКА КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ.**

#### **Часть 1. Экспериментальные исследования**

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук,  
А. А. БУЧАТСКИЙ, канд. техн. наук, В. А. ШВЕЦОВА, канд. физ.-мат. наук,  
О. Ю. ПРОКОШЕВ, канд. техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 27.01.2022

После доработки 25.03.2022

Принята к публикации 30.03.2022

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик и механизмов разрушения в диапазоне температур от 200 до 600°C для аустенитной стали 10X18H9 в двух состояниях: после нейтронного облучения при температуре 400°C до повреждающей дозы 30 сна и после облучения и последующего старения при температуре 550°C в течение 3000 ч. Характеристики и механизмы разрушения определяли при растяжении гладких цилиндрических образцов и цилиндрических образцов с кольцевым надрезом, т. е. в условиях различной трехосности напряженного состояния. Обнаружено резкое снижение критической деформации (пластичности) для стандартных цилиндрических образцов в области повышенных температур, которое сопровождается переходом к межзеренному разрушению. В этой же области температур критическая деформация для цилиндрических образцов с надрезом оказалась выше, чем для гладких цилиндрических образцов, при этом и доля межзеренного разрушения выше. Данный результат является достаточно аномальным, так как обычно с ростом трехосности напряженного состояния и доли межзеренного разрушения пластичность материала снижается. Полученные результаты использованы для разработки критерия и модели разрушения при высокотемпературном радиационном охрупчивании, которые представлены во второй части настоящей работы.

**Ключевые слова:** механизмы разрушения, критическая деформация (пластичность), нейтронное облучение, высокотемпературное радиационное охрупчивание, аустенитная хромоникелевая сталь.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-185-202

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Barnes R. S. Embrittlement of stainless steels nickel based alloys at high temperature induced by neutron radiation // *Nature*. – 1965. – V. 206. – P. 1307.
2. Ward A. L., Holmes J. J. Ductility Loss in Fast Reactor irradiated stainless steel // *Nuclear Applications & Technology*. – 1970. – V. 9.
3. Claudson T. T., Barker R. W. The effects of fast flux irradiation on the mechanical properties and dimensional stability of stainless steel // *Nuclear application and technology*. – 1970. – V. 9. – P. 10–23.
4. Swelling and Tensile Property Evaluations of High-Fluence EBR-II Thimbles / R. L. Fish, J. L. Straalsund et al. // *ASTM STP*. – 1973. – N 529. – P. 149–164.
5. Fish R. L., Hunter C. W. Tensile Properties of Fast Reactor Irradiated Type 304 Stainless Steel // *Irradiation Effects on the Microstructure and Properties of Metals*, ASTM STP 611, American Society for Testing and Materials, 1976. – P. 119–138.
6. Высокотемпературное радиационное охрупчивание материалов. Аналитический обзор // В. Ф. Зеленский, Н. М. Кирюхин, И. М. Неклюдов и др. – Харьков: ХФТИ, 1983.
7. Huang F. H. The fracture characterization of highly irradiated Type 316 stainless steel // *Int. J. Fracture*. – 1984. – N 25. – P. 181–193.
8. Вотинов С. Н., Прохоров В. И., Островский З. Е. Облученные нержавеющие стали. – М.: Наука, 1987.
9. Tavassoli A. A., Picker C. and Wareign J. Data collection on the effect of irradiation on the mechanical properties of austenitic stainless steels and weld metals // *ASTM STP*. – 1996. – V. 1270. – P. 995–1010.
10. Швецова В. А., Прокошев О. Ю., Марголин Б. З., Сорокин А. А., Потапова В. А. Синергетический механизм радиационного охрупчивания аустенитных нержавеющих сталей при высокотемпературном длительном облучении // *Вопросы материаловедения*. – 2017. – № 1 (89). – С. 182–193.
11. Hunter C. W., Fish R. L., Holmes J. J. Channel Fracture in Irradiated EBR-II Type 304 Stainless Steel // *American Nuclear Society Transactions*. – 1972. – V. 15, N 1. – P. 254–255
12. Huang, F.H. Comparison of fracture behavior for low-swelling ferritic and austenitic alloys irradiated in the fast flux test facility (FFTF) to 180 dpa // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1992. – V. 43, N 5. – P. 733–748
13. Марголин Б. З., Сорокин А. А., Швецова В. А., Минкин А. И., Потапова В. А., Смирнов В. И. Влияние радиационного набухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть I. Пластичность и трещиностойкость // *Вопросы материаловедения*. – 2016. – № 3. – С. 159–191.

14. Воеводин В. Н., Неклюдов И. М. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов. – Киев: Наукова Думка, 2006.

15. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.

16. Марголин Б. З., Сорокин А. А. Прогнозирование влияния нейтронного облучения на характеристики вязкого разрушения аустенитных сталей // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 1(69). – С. 126–147.

УДК 621.039.531:539.422

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР И ФОРМУЛИРОВКА КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ.**

### **Часть 2. Критерий и модель разрушения**

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук,  
А. А. БУЧАТСКИЙ, канд. техн. наук, В. А. ШВЕЦОВА, канд. физ.-мат. наук,  
В. Н. ФОМЕНКО, канд. техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 27.01.2022

После доработки 30.03.2022

Принята к публикации 31.03.2022

На основе экспериментальных результатов, представленных в первой части настоящей работы, сформулирован критерий разрушения и разработана модель разрушения при высокотемпературном радиационном охрупчивании облученных аустенитных сталей. Модель позволяет объяснить получение более высокой пластичности для цилиндрических образцов с надрезом по сравнению с гладкими цилиндрическими образцами, как показали экспериментальные результаты, представленные в первой части настоящей работы, а также прогнозировать трещиностойкость в области высокотемпературного радиационного охрупчивания. Выполнена верификация критерия путем расчета трещиностойкости и сопоставления с результатами испытаний образцов с трещиной. Получены экспериментальные данные по трещиностойкости при температурах 200 и 600°C для компактных образцов СТ-0.5 из стали 10X18H9, облученной до повреждающей дозы 24–30 сна. Представлены также данные по трещиностойкости для облученной стали в диапазоне температур от 20 до 600°C.

*Ключевые слова:* критерий разрушения, высокотемпературное радиационное охрупчивание, трещиностойкость, аустенитная хромоникелевая сталь

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2022-110-2-203-217

### ЛИТЕРАТУРА

1. Курсевич 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.

2. 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. // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – V.444. – P. 373–384.

3. Марголин Б. З., Сорокин А. А. Прогнозирование влияния нейтронного облучения на характеристики вязкого разрушения аустенитных сталей // Вопросы материаловедения. – 2012. – №1(69). – С. 126–147.

4. ASTM E 1921–02. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range, in: Annual Book of ASTM Standards. V. 03.01. – Philadelphia, 2002. – P. 1068–1084.

5. ГОСТ Р 59115.6–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. – М.: Российский институт стандартизации, 2021.

6. ASTM E1820–01. Standard test method for measurement of fracture toughness. Annual book of ASTM standards. V. 03.01. – P. 809–839.

7. Исследование влияния нейтронного облучения на статическую и циклическую трещиностойкость хромоникелевой аустенитной стали / Б. З. Марголин, А. И. Минкин, В. И. Смирнов, В. А. Федорова, В. И. Кохонов, А. В. Козлов и др. // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 1. – С. 111–122.