

К 95-летию со дня рождения академика РАН И. В. Горынина (1926–2015)..... 5

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

*Китаев Н. И., Пичхидзе С. Я.* Анализ напряженно-деформированного состояния цементованного зубчатого колеса ..... 13

*Сенникова Л. Ф., Волкова Г. К., Ткаченко В. М., Гангало А. Н.* Структура и свойства меди М06 после комбинированной пластической деформации ..... 21

*Савченко А. М., Коновалов Ю. В., Лаушкин А. В.* Изменение характера межатомной связи при образовании твердых и жидких растворов. Взаимосвязь колебательной и конфигурационной энтропии и их физическая интерпретация ..... 28

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Иванов В. Г., Бубликов В. С.* Формирование МДО-покрытий повышенной толщины на титановых сплавах и оценка триботехнических свойств в паре трения с бронзой ..... 41

*Геращенко Е. Ю., Бобкова Т. И., Самоделкин Е. А., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В.* Наноструктурированные композиционные порошки для получения защитных покрытий деталей и узлов машиностроения ..... 52

*Юрков М. А., Быстров Р. Ю., Яковлева Н. В., Фармаковский Б. В.* Изучение процесса микроплазменного напыления объемно-пористых функциональных покрытий на основе  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ..... 60

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Лишевич И. В., Анисимов А. В., Николаев Г. И., Савёлов А. С., Саргсян А. С.* Влияние конструкции подшипников скольжения на эффективность фторопластового макромоодификатора антифрикционных углепластиков ..... 65

*Колпачков Е. Д., Павлов Д. В., Вавилова М. И., Жириков А. А.* Исследование свойств стеклопластика на основе полиэфирэфиркетона..... 76

*Борукаев Т. А., Мартазанова Р. М.* Теплофизические и физико-механические свойства модернизированного промышленного ПВХ-пластиката..... 84

**КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ**

*Тимофеев М. Н., Морозовская И. А., Галяткин С. Н., Затоковенко Н. И., Куценко Е. И., Лозовицкий Н. А.* Исследование коррозионно-стойких наплавов оборудования АЭУ, выполненных ленточным электродом дуговым и электрошлаковым способами ..... 94

*Мовенко Д. А., Лаптев А. Б., Загорских О. А.* Исследование состава и морфологии продуктов горячей солевой коррозии жаропрочных никелевых сплавов ..... 107

**РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

*Марголин Б. З., Швецова В. А., Сорокин А. А., Минкин А. И., Пирогова Н. Е.* Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет. Часть 4. Характеристики прочности и пластичности и механизмы разрушения ..... 116

*Минкин А. И., Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Беляева Л. А., Пирогова Н. Е.* Оценка прочности и прогноз ресурса захватов штанг СУЗ реактора ВВЭР-440. Часть 1. Исследование охрупчивания стали 14X17H2 в условиях нейтронного облучения..... 145

*Минкин А. И., Марголин Б. З., Федосов В. Г.* Оценка прочности и прогноз ресурса захватов штанг СУЗ реактора ВВЭР-440. Часть 2. Оценка прочности и обоснование сроков проведения мониторинга деградации металла захвата ..... 163

*Минкин А. И., Марголин Б. З., Беляева Л. А., Пирогова Н. Е., Шумко А. М., Петров С. Н.* Оценка прочности и прогноз ресурса захватов штанг СУЗ реактора ВВЭР-440. Часть 3. Оптимизация восстановительного режима послерадиационного отжига захватов штанг СУЗ ..... 177

**Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов** ..... 192

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕМЕНТОВАННОГО ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА

Н. И. КИТАЕВ, С. Я. ПИЧХИДЗЕ, д-р техн. наук

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина»,  
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, e-mail: [serg5761@yandex.ru](mailto:serg5761@yandex.ru)

Поступила в редакцию 20.11.2020

После доработки 17.02.2021

Принята к публикации 19.02.2021

Проведен анализ статических характеристик зубьев колеса из конструкционной легированной стали марки 12ХНЗА до и после процесса науглероживания рабочей поверхности (цементации). Приведенные расчеты и результаты анализа показывают, что статические характеристики детали до химико-термической обработки и после примерно равны, однако зубчатое колесо, упрочненное данным методом, имеет более высокую твердость. Исследование напряженно-деформированного состояния при приложенных нагрузках на зубчатое колесо выполнены по 3D-модели в программном комплексе SolidWorks 2018 Simulation.

*Ключевые слова:* зубчатое колесо, цементация, зуб, упрочнение поверхности, напряженно-деформированное состояние

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-105-1-13-20

### ЛИТЕРАТУРА

1. Производство зубчатых колес: Справочник / С. Н. Калашников, А. С. Калашников, Г. И. Коган и др. / Под общ. ред. Б. А. Тайца. Изд. 3-е. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
2. Длоугий В. В., Муха Т. И., Цупиков А. П., Януш Б. В. Приводы машин: Справочник / Под общ. ред. В. В. Длоугого. – Изд. 2-е. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 383 с.
3. Старосельский А. А., Гаркунов Д. Н. Долговечность трущихся деталей машин: производственно-практическое издание. – М.: Машиностроение, 1967. – 396 с.
4. Кобелева К. В., Туктамышев В. Р. Обзор методов повышения долговечности авиационных зубчатых передач // Аэрокосмическая техника. Вестник ПНИПУ. – 2017. – № 50. – 11 с. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.50.12.
5. Татаринев И. В. Механоэлектрохимическая обработка упрочненных зубчатых колес // Авто-реф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2010. – 20 с.
6. Калашников С. Н., Калашников А. С. Зубчатые колеса и их изготовление. – М.: Машиностроение, 1983. – 264 с.
7. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. / Под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
8. Раскатов В. М., Чуенков В. С., Бессонова Н. Ф., Вейс Д. А. Машиностроительные материалы: Краткий справочник. Изд. 3-е. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.
9. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник / Г. В. Борисенко, Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин и др. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
10. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
11. Гафаров Р. Х., Шарафиев Р. Г., Ризванов Р. Г. Краткий справочник инженера-механика. Основные формулы и справочные данные по расчетам на прочность. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1995. – 112 с.

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕДИ М06 ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Л. Ф. СЕННИКОВА, канд. техн. наук, Г. К. ВОЛКОВА, В. М. ТКАЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук,  
А. Н. ГАНГАЛО, канд. техн. наук

*Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина,  
83114 Донецк, ул. Розы Люксембург, 72, E-mail: [sennikova\\_lf@ukr.net](mailto:sennikova_lf@ukr.net)*

Поступила в редакцию 6.10.2020

После доработки 16.12.2020

Принята к публикации 28.01.2021

Представлены результаты исследований структуры и физико-механических свойств меди М06 после комбинированной пластической деформации: равноканальное угловое прессование (РКУП) + осадка и РКУП + мультисадка. Даны сравнительные характеристики структуры, твердости и деформационного разуплотнения меди. Отмечено, что после обработки РКУП + мультисадка наблюдается более глубокая проработка структуры с образованием нано- или ультрамелкого зерна.

*Ключевые слова:* равноканальное угловое прессование, осадка, пластическая деформация, твердость, относительное разуплотнение, тонкая структура

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-105-1-21-27

### ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М: Логос. – 2000. – 272 с
2. Добаткин С. В., Салищев Г. А., Кузнецов А. А., Решетов А. В., Сынков А. С., Конькова Т. Н. Сравнительный анализ структуры и свойств бескислородной меди после различных способов интенсивной пластической деформации // Физика и техника высоких давлений. – 2006. – Т. 16, № 4. – С. 23–36.
3. Сенникова Л. Ф., Давиденко А. А., Ткаченко В. М., Метлов Л. С. Влияние больших пластических деформаций на структуру и свойства меди М06 // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 1 (89). – С. 92–98.
4. Krasilnikov N., Kurzydowski K. J. Получение объемных нанокристаллических материалов с помощью комбинации гидростатического и равноканального углового прессования. // Materials Science. – Poland. – V. 25, № 4. – 2007.
5. Сенникова Л. Ф., Давиденко А. А., Спусканюк В. З., Дмитренко В. Ю., Закорецкая Т. А. Влияние деформационно-термической обработки на механические и функциональные свойства сплава Cu – Cr – Zr // Вопросы материаловедения. – № 4 (76). – 2013. – С. 35–42.
6. Залечивание микропор под действием гидростатического давления и упрочнение металлов / В. И. Бетехтин, А. И. Петров, Н. К. Орманов и др. // ФММ. – 1989. – Т. 67, вып. 2. – С. 318–322.
7. Черемской П. Г., Слезов В. В., Бетехтин В. И. Поры в твердом теле. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.
8. Назмиев Н., Мурашкин М. Ю., Рааб Г. И., Валиев Р. З. Равноканально-угловое прессование в параллельных каналах, совмещенное с винтовой экструзией сплава 6063 // Материалы 12-й Международной конференции «Высокие давления», 2012, 23–27 сентября, Судак. – С. 147.
9. Поляков Н. В., Рааб А. Г., Семенова И. П., Валиев Р. З. Комбинирование РКУП – CoNFoRM и волочения для получения проволоки из наноструктурного титана // Материалы 12-й Международной конференции «Высокие давления», 2012, 23–27 сентября, Судак. – С. 176.
10. Белошенко В. А., Матросов Н. И., Спусканюк В. З., Чижко В. В. Влияние комбинированной деформации на механические и функциональные свойства сплава Nb–Ti // Физика и техника высоких давлений. – 2006. – Т. 16, № 4. – С. 159–163.
11. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. – М.: Металлургия, 1982. – 631 с.

12. Русаков А. А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1997. – 479 с.
13. Васильев Д. М. Дифракционные методы исследования структур. – СПб., 1998. – 502 с.
14. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. – М. Металлургия, 1982. – 583 с.

УДК 536.753

## **ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРА МЕЖАТОМНОЙ СВЯЗИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ РАСТВОРОВ. ВЗАИМОСВЯЗЬ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ И КОНФИГУРАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ И ИХ ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ**

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

АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов  
им. акад. А. А. Бочвара (АО «ВНИИНМ»), 123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а,  
E-mail: [sav-alex111@mail.ru](mailto:sav-alex111@mail.ru)

Поступила в редакцию 6.11.2020

После доработки 10.02.2021

Принята к публикации 14.02.2021

Цель данной работы показать, что при смешении два скрытых (латентных) процесса протекают одновременно и компенсируют друг друга. Первый приводит к увеличению средней теплоемкости, равной по величине энтропии смешения с поглощением энергии для обеспечения постоянной температуры. Второй сопровождается скрытым выделением тепла за счет усиления межатомных связей. При смешении прохождение этих двух процессов показывает идентичность колебательной и конфигурационной (статистической) энтропии.

*Ключевые слова:* колебательная и конфигурационная энтропия, энтропия смешения, второй закон термодинамики, традиционный и классический подходы

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-105-1-28-40

### ЛИТЕРАТУРА

1. Савченко А. М., Коновалов Ю. В. Сопоставление традиционного и классического подходов ко второму закону термодинамики и фазовым равновесиям // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 3 (99). – С. 29–37.
2. Савченко А. М. «Скрытая термодинамика» – трезвый взгляд на известные вещи. Твердые и жидкие растворы // Атомная стратегия. – 2015. – Вып. 109. – С. 17–23.
3. Савченко А. М., Коновалов Ю. В., Лаушкин А. В. Первый и второй законы термодинамики: взаимосвязь, «несогласованность», скрытые эффекты // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 1 (101). – С. 63–73
4. Cahn R. W., Haasen P. Physical Metallurgy. 4th edition. – Elsevier, 1996. – 2740 p.
5. Hume-Rothery W., Haworth C. W., Smallman R. E. The structure of metals and alloys. 5th edition. – London, Institute of Metals, 1969. – 407 p.
6. Делингер У. Теоретическое металловедение. – М.: Металлургия, 1960. – 296 с.
7. Cottrell A. H. Theoretical Structural Metallurgy – London: Arnold, 1948. – 256 p.
8. Савченко А. М. Энтропийные эффекты в многофазных системах // Атомная стратегия. – 2016. – Вып. 111. – С. 28–33.
9. Савченко А. М., Коновалов Ю. В., Лаушкин А. В. Анализ с позиции классической термодинамики экспериментальных данных по изменению температуры и энтальпии плавления эвтектических сплавов при изменении взаимной ориентировки фаз // Письма о материалах. – 2016. – Т. 6, № 3. – С. 195–199.
10. Swalin R. A. Thermodynamics of Solids. – New York, London: John Wiley & Sons, 1967. – P. 156–160.
11. Стишов С. М. Термодинамика плавления простых веществ // Успехи физических наук. – 1974. – Т. 114, вып. 1. – С. 3–40.

12. Лифшиц Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1956. – 352 с.

УДК 669.295:621.794.61:621.891

## ФОРМИРОВАНИЕ МДО-ПОКРЫТИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЛЩИНЫ НА ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ И ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ПАРЕ ТРЕНИЯ С БРОНЗОЙ

В. Г. ИВАНОВ, канд. техн. наук, В. С. БУБЛИКОВ

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

Поступила в редакцию 18.11.2020

После доработки 23.12.2020

Принята к публикации 28.01.2021

Приведены экспериментальные данные о влиянии параметров микродугового оксидирования на толщину и структуру МДО-покрытия и его триботехнические характеристики при трении по бронзе. Разработана технология нанесения антифрикционных покрытий повышенной толщины методом МДО на титановые сплавы. Исследована возможность получения МДО-покрытий повышенной толщины для применения в узлах трения скольжения.

*Ключевые слова:* микродуговое оксидирование (МДО), титановые сплавы, толщина покрытия, трение, износ, коэффициент трения

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-105-1-41-51

### ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В., Ушков С. С., Хатунцев А. Н., Лошакова Н. И. Титановые сплавы в морской технике. – СПб.: Политехника, 2007. – 387 с.

2. Гольдфайн В. Н. Применение титана в судовом машиностроении и решение проблемы повышения ресурса узлов трения // Титан. – 1995. – № 3–4 (7–8). – С. 55–58.

3. Жевтун И. Г., Гордиенко П. С., Ярусова С. Б. Формирование износостойких композиционных покрытий на титановых сплавах при электродуговой обработке в водных электролитах. – М.: РИОР. ИНФА-М, 2018. – 155 с.

4. Гордиенко П. С., Достовалов В. А., Жевтун И. Г., Харченко У. В., Баринов Н. Н., Кайдалова Т. А., Достовалов Д. В. Формирование карбидных фаз на катодно-поляризованной поверхности титана. // Коррозия: материалы, защита. – 2009. – № 7. – С. 1–5.

5. Гордиенко П. С., Гнеденков С. В. Микродуговое оксидирование титана и его сплавов. – Владивосток: Дальнаука, 1997. – 185 с.

6. Иванов В. Г., Коркош С. В., Гордиенко П. С., Жевтун И. Г. Антифрикционные свойства МДО-покрытий на титановом сплаве 3М // Металлообработка. – № 1 (67). – 2012. – С. 24–27.

УДК 621.793.7–405.8

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ОБЪЕМНО-ПОРИСТЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ $\gamma$ - $Al_2O_3$

М. А. ЮРКОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ<sup>2</sup>, Н. В. ЯКОВЛЕВА<sup>2</sup>,  
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>ОАО «Вириал», 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27, литер Р, пом. 1-Н

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)

Поступила в редакцию 10.02.2021

После доработки 15.02.2021

Принята к публикации 19.02.2021

Приведены результаты комплексных исследований по изучению процесса получения объемно-пористых каталитически активных покрытий на базе систем на основе  $\gamma$ - $Al_2O_3$  с помощью управляемого процесса микроплазменного напыления.



*Ключевые слова:* катализ, объемно-пористое покрытие, микроплазменное напыление, адгезионная прочность, удельная поверхность, размер пор

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-105-1-60-64

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шолкин С. Е., Юрков М. А. Исследование процесса микроплазменного нанесения наноструктурированных каталитических покрытий системы металл – интерметаллид и металл – неметалл // Новые материалы и технологии в авиационной и ракетно-космической технике. – Королев: ИПК «Машприбор», 2008. – С. 52–60.
2. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Отв. ред. Ж. И. Алферов и др. – СПб.: Изд-во И. П. Пермяков С. А., 2015. – 543 с.
3. Виноградова Т. С. Разработка высокоэффективных пористых носителей на металлической основе // Материалы II симпозиума «Термохимические процессы в плазменной аэродинамике», СПб., 10–12 сентября 2001 г. – С. 38–46.
4. Спектор Ю. Э., Еромасов Р. Г. Технология нанесения и свойства покрытий. Курс лекций. – Красноярск, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный у-нт», 2008. – 271 с.
5. Физико-химические процессы синтеза наноразмерных объектов // В. А. Жабрев и др. – СПб.: Элмор, 2012. – 327 с.
6. Юрков М. А.. Микроплазменное напыление объемно-пористых покрытий для катализаторов паровой конверсии углеводородного сырья в водородсодержащее топливо и водоактивируемых химических источников тока // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2011.
7. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017.
8. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабрев В. А., Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск: Изд-во «Удмуртия», 2014. – 480 с.
9. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Васильва О. В., Васильев А. Ф., Виноградова Т. С., Ешметьева Е. Н., Мухамедзянова Л. В., Самоделкин Е. А., Кузнецов П. А. Биотехнологические исследования, проводимые в Научном нанотехнологическом центре ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3(87). – С. 82–100.

УДК 678.067:621.891

#### **ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФТОРОПЛАСТОВОГО МАКРОМОДИФИКАТОРА АНТИФРИКЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

И. В. ЛИШЕВИЧ, канд. техн. наук, А. В. АНИСИМОВ, д-р техн. наук, Г. И. НИКОЛАЕВ, д-р хим. наук,  
А. С. САВЁЛОВ, канд. техн. наук, А. С. САРГСЯН, 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 29.10.2020

После доработки 24.02.2021

Принята к публикации 10.03.2021

Представлены результаты лабораторных и стендовых испытаний макромодифицированных фторопластом антифрикционных углепластиков марок УГЭТ и ФУТ. Подтверждена эффективность (снижение коэффициента трения) данного способа модификации углепластика. Установлена зависимость эффективности метода от конструктивного исполнения узлов трения скольжения. Ключевым фактором, определяющим эффективность модификатора, является учет при конструировании подшипников скольжения пластической деформации фторопласта. Конструкция узла трения должна исключать градиент давлений во фторопластовых протекторах и препятствовать возможности неконтролируемого выхода фторопласта из зоны трения.

*Ключевые слова:* антифрикционные углепластики, трение и износ, скольжение, фторопласт, модификатор

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-105-1-65-75

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Завалеев И., Куприянова М. Выбросы парниковых газов и их взаимосвязь с выработкой энергии // Журнал С.О.К. – 2019. – № 9. – С. 82–89. <https://www.c-o-k.ru/articles/vybrosy-parnikovyh-gazov-i-ih-vzaimosvyaz-s-vyrabotkoy-energii>. Дата обращения 08.04.2020.
2. Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Лобынцева И. В., Петрова Л. В., Чурикова А. А. Бинарные опоры из модифицированных углепластиков для подшипников судовых валопроводов // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 2(46). – С. 22–26.
3. Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Рыбин В. В. Модификация антифрикционных полимерных композиционных материалов на различных масштабных уровнях. – Вопросы материаловедения. – 2009. – № 1(57). – С. 9–16.
4. Бартенев Г. М., Лаврентьев В. В. Трение и износ полимеров. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.
5. Точильников Д. Г. Гинзбург Б. М. Методика экспрессных триботехнических испытаний антифрикционных полимеров // Вопросы материаловедения. – 2002. – № 3(31). – С. 39–48.
6. Добычин М. Н., Курбаткин И. Н., Морозов А. В., Никулин А. В., Сачек Б. Я., Савелов А. С., Анисимов А. В. Исследование углепластиков, макромодефицированных фторопластом // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 1(57). – 2009. – С. 26–32.
7. Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Черниговский А. А. Стендовые триботехнические испытания антифрикционных модифицированных углепластиков для узлов трения гидротурбин // Вопросы материаловедения. – 2002. – № 3(31). – С. 78–83.
8. Бахарева В. Е., Анисимов А. В., Савелов А. С., Пеклер К. В., Ильин С. Я., Моркин О. В. Создание макромодефицированных фторопластом углепластиков для подшипников скольжения рабочих колес поворотно-лопастных гидротурбин // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 1(57). – С. 17–25.
9. Рубин М. Б., Бахарева В. Е. Подшипники в судовой технике / Справочник. – М.: Судостроение, 1987.
10. Катаев В. М., Попов В. А., Сажин Б. И. Справочник по пластическим массам. Изд. 2-е. Т. 1. – М.: Химия, 1975. – 448 с.
11. Ганз С. Н.; Пархоменко В. Д. Антифрикционные химически стойкие материалы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1965. – 148 с.

УДК 678.067.5

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА

Е. Д. КОЛПАЧКОВ, Д. В. ПАВЛОВ, М. И. ВАВИЛОВА, А. А. ЖИРИКОВ

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 3.03.2021

После доработки 5.03.2021

Принята к публикации 10.03.2021

Представлены результаты исследований свойств стеклопластика на основе полиэфирэфиркетона (РЕЕК). Проведен сравнительный анализ физических, теплофизических, упругопрочностных и диэлектрических свойств стеклопластика на основе РЕЕК и стеклопластика на основе эпоксидного связующего. Представлены результаты исследования огнеизоляционных свойств стеклопластика на основе РЕЕК.

*Ключевые слова:* термопластичное связующее, терморепактивное связующее, ПКМ, стеклопластик, материалы авиационного назначения.

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-105-1-76-83

#### ЛИТЕРАТУРА

© 2021

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»  
<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

1. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № S. – С. 7–17.
2. Каблов Е. Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. – 2012. – № 3. – С. 10–15.
3. Каблов Е. Н. Становление отечественного космического материаловедения // *Вестник РФФИ*. – 2017. – № 3. – С. 97–105.
4. Старостина И. В., Петрова А. П., Шевченко Ю. Н., Шишимиров М. В. Контроль термопластичных связующих для композиционных термопластичных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2019. – № 4 (76). URL: <https://viam-works.ru> (дата обращения: 05.01.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-99-107.
5. Бейдер Э. Я., Петрова Г. Н. Термопластичные связующие для полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2015. – № 11. Ст. 05. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 05.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-5-5.
6. Петрова Г. Н., Ларионов С. А., Платонов М. М., Перфилова Д. Н. Термопластичные материалы нового поколения для авиации // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № S. – С. 420–436. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-S-420-436.
7. Кондрашов С. В., Шашкеев К. А., Петрова Г. Н., Мекалина И. В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № S. – С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
8. Сорокин А. Е., Петрова Г. Н., Бейдер Э. Я., Перфилова Д. Н. Слоистые углепластики на термопластичной матрице нового поколения // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. – 2017. – № 9. – С. 10–17.
9. Петрова Г. Н., Бейдер Э. Я., Старостина И. В. Литые термопласты для изделий авиакосмической техники // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. – 2016. – № 7. – С. 21–28.
10. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – С. 100–570.
11. Михайлин Ю. А. Термопластичные композиционные материалы // *Полимерные материалы*. – 2007. – № 7. – С. 8.
12. Устинов В. А., Бейдер Э. Я. Применение композиционных материалов с термопластичной матрицей // *Конструкции из композиционных материалов*. – 1991. – № 1. – С. 21–28.
13. Платонов М. М., Петрова Г. Н., Ларионов С. А., Барботько С. Л. Полимерная композиция на основе полидодекалактама для технологии 3D-печати расплавленной полимерной нитью // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. – 2015. – № 11. Ст. 05. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 05.01.2020). DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-10-9-9.
14. Петрова Н. А. Стеклопластики и их сырьевое обеспечение в России // *Полимерные материалы*. – 2008. – № 11. – С. 33–36.
15. Технические условия ТУ ВУ 300059047.111-2020. Ткани стеклянные конструкционные 7781-14, 7781, 7581. – Беларусь, 2020. – 19 с.
16. ГОСТ 19170–2001. Стекловолокно. Ткань конструкционного назначения. – М.: ИПК «Изд-во стандартов». – 2001. – 24 с.



## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ПВХ-ПЛАСТИКАТА

Т. А. БОРУКАЕВ<sup>1</sup>, д-р хим. наук, Р. М. МАРТАЗАНОВА<sup>2</sup>, канд. техн. наук

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

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

Поступила в редакцию 9.12.2020

После доработки 25.01.2021

Принята к публикации 28.01.2021

Получены изоляционные полимерные материалы с пониженными горючестью и дымообразованием при их горении на основе ПВХ-пластиката марки И40-13А рец.8/2, оксида сурьмы, бората цинка и мела. По термостабильности, физико-механическим свойствам полученные пластикаты превосходят исходный стандартный пластикат. Введение смеси оксид сурьмы/борат цинка, а также мела в ПВХ-пластикат марки И40-13А значительно снижает тепловыделение, дымообразование при горении и тлении ПВХ-пластиката. Оптимальной концентрацией смеси является 2 мас. ч. оксида сурьмы + 2 мас. ч. бората цинка, а также мела – до 25 мас. ч.

**Ключевые слова:** поливинилхлорид, пластикат, состав, модернизация, термостабильность, теплофизические и физико-механические свойства

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-105-1-84-93

### ЛИТЕРАТУРА

1. Аблеев Р. И. Актуальные проблемы в разработке и производстве негорючих полимерных компаундов для кабельной индустрии // КАБЕЛЬ-news. – 2009. – № 6–7. – С. 64–69.
2. Миткевич А. С., Паверман Н. Г., Елагина А. Н., Кабельные композиции на основе полиэтилена и поливинилхлорида // Кабели и провода. – 2007. – Т. 302, № 1. – С. 3–7.
3. Крыштоб Б. И., Власов Д. В., Миронов В. Ф., Апресян Л. А., Власова Т. В., Расмагин С. И., Кураташвили З. А., Саловский А. А. Исследование температурной зависимости электроизоляционных свойств пленок из ПВХ, подвергнутого моделирующему тепловому старению термолизу в растворе // Электротехника. – 2015. – № 8. – С. 39–42.
4. Уилки Ч., Саммерс Дж., Даниелс Ч. Поливинилхлорид: Справочник / Пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2007. – 728 с.
5. Руководство по разработке композиций на основе ПВХ / Под ред. Ф. Гроссмана. 2-е изд. / Пер. с англ. под ред. В. В. Гузеева. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 608 с.
6. Николаев В. Г. Сравнительная оценка современных поливинилхлоридных пластикатов и безгалогенных композиций на основе полиолефинов // Кабели и провода. – 2010. – Т. 324, № 5. – С. 19–26.
7. Мазитова А. К., Маскова А. Р., Нафикова Р. Ф., Аминова Г. К. Использование добавок при получении кабельных пластикатов // Башкирский химический журнал. – 2017. – № 3. – С. 50–53.
8. Васильев Е. Б., Каменский М. К., Пронин А. С. О качестве поливинилхлоридных пластикатов повышенной пожаробезопасности, применяемых в отечественной кабельной промышленности // Кабели и провода. – 2020. – Т. 383. – № 3. – С. 27–33.
9. Ушков В. А., Лалаян В. М., Невзоров Д. И., Ломакин С. М. О влиянии фталатных и фосфатных пластификаторов на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // Пожаровзрывоопасность. – 2013. – Т. 22, № 10. – С. 25–33.
10. Мазина Л. А., Нафикова Р. Ф., Ахметханов Р. М. Поливинилхлоридные пластикаты пониженной пожароопасности, модифицированные бром- и фосфорсодержащими пластификаторами // Вестник Башкирского университета. – 2020. – Т. 25. – № 4. – С. 776–780.
11. Мартынов А. В., Мазина Л. А., Ключников О. Р. Модификация кабельных поливинилхлоридных пластикатов пониженной горючести // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 15. – С. 73–75.

12. Baggaley R. G., Hornsby P. R., Yahya R., Cusack P. A., Monk A. W. The influence of novel zinc hydroxystannate coated fillers on the fireproperties of flexible PVC // Fire & Mater. – 1997. – V. 21. – P. 179.
13. Гузеев В. В. Структура и свойства наполненного поливинилхлорида. – СПб.: Научные основы и технологии, 2012. – 284 с.
14. Borukaev T. A., Uzhakhova L. Ya., Sultigova Z. Kh. Modification of the Recipe of Industrial PVC plastic for Increasing Its Fire Resistance // Key Engineering Materials. – 2020. – V. 869. – P. 224–229.
15. Дедов А. В., Назаров В. Г. Испарение пластификатора из наполненного поливинилхлорида // Материаловедение. – 2013. – № 9. – С. 10–12.
16. Шарипов Б. Ф., Абдрахманов Л. А., Артамонов А. В., Гаркави М. С., Нефедьев А. П., Немых Г. А. Влияние гидроксидов металлов на свойства ПВХ композиции // Известия КГАСУ. – 2016. – Т. 38, № 4. – С. 402–408.
17. Гузеев В. В. Рациональный выбор добавок для композиций ПВХ // Полимерные материалы. – 2010. – № 7–8. – С. 38–48.

УДК 621.791.92: 620.196.2:621.039.536.2

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ НАПЛАВОК ОБОРУДОВАНИЯ АЭУ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ДУГОВЫМ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ СПОСОБАМИ

М. Н. ТИМОФЕЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, И. А. МОРОЗОВСКАЯ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, С. Н. ГАЛЯТКИН<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук, Н. И. ЗАТОВОВЕНКО<sup>2</sup>, Е. И. КУЦЕНКО<sup>2</sup>, Н. А. ЛОЗОВИЦКИЙ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ПАО «Уралхиммаш», 620010, Екатеринбург, Хибиногорский пер., 33, E-mail: [general@ekb.ru](mailto:general@ekb.ru)

Поступила в редакцию 14.12.2020

После доработки 19.01.2021

Принята к публикации 28.01.2021

Приведены результаты исследований коррозионно-стойких наплавов ленточным электродом под слоем флюса на углеродистую сталь, выполненных автоматическим дуговым и электрошлаковым способами. Показано сходство химического состава, структуры, механических и коррозионных свойств наплавленного металла при разных способах наплавки. Установлено, что электрошлаковая наплавка обеспечивает большую чистоту по неметаллическим включениям.

*Ключевые слова:* коррозионно-стойкое покрытие, электрошлаковая наплавка лентой, зона сплавления, межкристаллитная коррозия, питтинговая коррозия, микроструктура

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-105-1-94-106

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Туфанов Д. Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей и чистых металлов. – М.: Металлургия, 1973. – 351 с.
2. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения (ПН АЭ Г-7-009–89). Сварные соединения. Правила контроля (ПН АЭ Г-7-010–89) / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 320 с.
3. Каленский В. К. Особенности и некоторые технологические характеристики процесса электрошлаковой наплавки одной электродной лентой (Обзор) // Автоматическая сварка. – 1999. – № 3. – С. 16–21.
4. Devletian J. H., Gas Y. P., Zhao Q. H., Wood W. E. // NSRP Ship Production Symposium, Society of Naval Architects and Marine Engineers. – New Orleans, USA, 1997. – 7C2-1 to 7C2-2.
5. Paschold R., Karlsson L., Gittos M. F. Disbonding of austenitic weld overlays in hidroprocessing applications // Svetsaren. – 2007. – V. 1. – P. 10–15.

6. EN ISO 14343-A. Welding consumables – Wire electrodes. Wires and rods for arc welding of stainless and heat resisting steels – Classification.
7. Мастенко В. Ю., Старченко Ю. Г., Волобуев Ю. С., Ходаков В. Д. Исследование процесса и разработка материалов и технологии электрошлаковой наплавки под флюсом коррозионного покрытия поверхностей атомно-энергетического и химического оборудования // Тяжелое машиностроение. – 2011. – № 5. – С. 6–10.
8. Электрошлаковая наплавка лентой под керамическим флюсом однородного однослойного антикоррозионного покрытия внутренней поверхности труб диаметром 850 и 990 мм для АЭС / В. Ю. Мастенко, Ю. С. Волобуев, Н. А. Волосов и др. // Сварочное производство. – 2019. – № 11. – С. 29–37.
9. Сварочные материалы для дуговой сварки: Справочное пособие: Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы / Б. П. Конищев, С. А. Курланов, Н. Н. Потапов и др. / Под общ. ред. Н. Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
10. Паршин А. М. Структура, прочность и пластичность нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, применяемых в судостроении. – Л.: Судостроение, 1972. – 288 с.
11. Иванов К. М. Влияние легирующих элементов на механические свойства аустенитно-ферритного металла швов при старении // Судостроительная промышленность, Серия Сварка. – 1968. – вып. 12.
12. Schaffler A. I. Constitution diagram for stainless steel weld metal // Metal Progress. – 1949. – Nov. – P. 680–680-B.
13. Земзин В. Н. Сварные соединения разнородных сталей. – М.: Машиностроение, 1966. – 232 с.
14. Сопrotивление разрушению металла первого слоя аустенитной наплавки корпусов реакторов ВВЭР / Прокошев О. Ю., Марголин Б. З., Курсевич И. П. и др. // Труды VII Международной конференции «Проблемы материаловедения при изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», СПб., 2002.
15. Бельчук Г. А., Земзин В. Н. Сварка разнородных сварных соединений. Сварка в машиностроении: Справочник: Т. 2 / Под ред. А. И. Акулова. – М.: Машиностроение, 1978. – 462 с.
16. Гатальский Ю. Н. Сварка разнородных сварных соединений. – Киев: Техника, 1981. – 184 с.
17. Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Морозовская И. А. Проблемы создания сварочных материалов для наплавки антикоррозионного покрытия корпусов реакторов атомных энергетических установок с водным теплоносителем // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 2 (42). – С. 129–143.
18. Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Морозовская И. А. Влияние режимов термической обработки на стойкость к МКК антикоррозионной наплавки с различным соотношением Nb/C // Труды X Международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», СПб., октябрь 2008.

УДК 669.245.018.44:620.193.43

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И МОРФОЛОГИИ ПРОДУКТОВ ГОРЯЧЕЙ СОЛЕВОЙ КОРРОЗИИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Д. А. МОВЕНКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А. Б. ЛАПТЕВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, О. А. ЗАГОРСКИХ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>АО «ОДК-Пермские моторы», 614010, Пермь, Комсомольский пр., 93

Поступила в редакцию 2.12.2020

После доработки 27.01.2021

Принята к публикации 28.01.2021

Исследовано изменение структуры жаропрочных никелевых сплавов, легированных Co, Cr, Mo, Al, Nb, W, Ti и Al, Co, Re, Ta, Ru, Mo, W, Cr, под воздействием раствора 75%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 25%NaCl

в интервале температур 600–750°C. Как показали результаты исследования, на поверхности металла образуется коррозионная пленка пластовой структуры на основе оксидов хрома, алюминия, никеля и сульфидов никеля. Установлено, что характер коррозионного разрушения металла зависит от состава и содержания в нем легирующих элементов.

*Ключевые слова:* никелевые жаропрочные сплавы, горячая солевая коррозия, раствор соли 75%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 25%NaCl

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-107-115

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Сидоров В. В., Каблов Д. Е., Мин П. Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № S. – С. 55–71. DOI:10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
2. Петрушин Н. В., Оспенникова О. Г., Светлов И. Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № S. – С. 72–103. DOI:10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.
3. Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Луцкая С. А. Методы повышения коррозионной стойкости жаропрочных никелевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2018. – № 4. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2020). DOI:10.18577/2307-6046-2018-0-4-3-8.
4. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Медведев И. М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 2. – С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
5. 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.
6. Гецов Л. Б., Лаптев А. Б., Пузанов А. И., Шеляпина Н. М. Сульфидно-оксидная коррозия современных жаропрочных сплавов // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2019. – № 4. – С. 150–155.
7. Pradhan D., Mahobia G. S., Chattopadhyay K., Singh V. Salt induced corrosion behaviour of superalloy IN718 // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – V. 5. – P. 7047–7054.
8. Медведев И. М., Никитин Я. Ю., Пузанов А. И., Лаптев А. Б. Методы испытаний жаропрочных сплавов на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии (обзор) // *Труды ВИАМ*. – 2018. – № 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-93-100.
9. Hot corrosion characteristics of Ni–20Cr–18W superalloy in molten salt / T.-B. Zhang, R.-F. Dong, R. Hu e. a. // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2015. – V. 25. – P. 3840–3846.
10. Косьмин А. А., Будиновский С. А., Матвеев П. В., Смирнов А. А. Исследование жаропрочного сплава ЖС36 с различными типами ионно-плазменных защитных покрытий на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии в области температур 850–900°C // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2015. – № 12. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-5-5.
11. Hot corrosion behavior of Ni-base alloys in a molten salt under an oxidizing atmosphere / S.-H. Cho, J.-M. Hur, C.-S. Seo e. a. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – V. 468, Is. 1–2. – P. 263–269.
12. Ломберг Б. С., Белоус В. Я., Варламова В. Е., Филонова Е. В. Стойкость жаропрочных гранулированных дисковых сплавов ВВ750ПД, ВВ750П и ВВ751П к сульфидно-оксидной коррозии при рабочих температурах (650...800 °С) // *Коррозия: материалы, защита*. – 2014. – № 3. – С. 14–20.
13. Eliaz N., Shemesh G., Latanision R. M. Hot corrosion in gas turbine components // *Engineering Failure Analysis*. – 2002. – V. 9, Is. 1. – P. 31–43.

14. Hot corrosion behavior of Ni-base alloys coated with salt film of 75%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 25%NaCl at 900°C / F. Guangyan, Q. Zeyan, C. Jingyu S.-H. e. a. // Rare Metal Materials and Engineering. – 2015. – V. 44, Is. 5. – P. 1112–1115.
15. Hot corrosion behavior of Ni–16Cr–xAl based alloys in mixture of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–NaCl at 600°C / W. Li, Y. Liu, Y. Wang e. a. // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2011. – V. 21, Is. 12. – P. 2617–2625.
16. Influence of Pre-oxidation on the Hot Corrosion of DZ68 Superalloy in the Mixture of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–NaCl / E. Liu, Z. Zheng, X. Guan e. a. // Journal of Materials Science & Technology. – 2010. – V. 26, Is. 10. – P. 895–899.
17. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Изд-во «Недра», 1996. – 591 с.
18. Saunders S. R. J., Nicholls J. R. Hot salt corrosion test procedures and coating evaluation // Metallurgical and Protective coatings. Thin solid films. – 1984. – V. 119. – P. 247–269.

УДК 621.039.531:539.37

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРА ВВЭР ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ТЕЧЕНИЕ 45 ЛЕТ.

### Часть 4. Характеристики прочности и пластичности и механизмы разрушения<sup>1</sup>

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

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

Поступила в редакцию 16.02.2021

После доработки 3.03.2021

Принята к публикации 11.03.2021

Представлены результаты испытаний на растяжение в широком диапазоне температур стандартных образцов из аустенитной стали марки 08X18H10T, облученной в течение 45 лет в ВВЭР-440 с разными повреждающими дозами. Определены стандартные механические характеристики, включая критическую деформацию и разрушающее напряжение, исследованы механизмы разрушения. Обнаружено, что с понижением температуры наблюдается падение критической деформации, обусловленное переходом к хрупкому межзеренному разрушению, которое названо низкотемпературным гелиевым охрупчиванием (НТГО). На основе анализа других опубликованных работ сделан вывод, что НТГО – достаточно общее явление, которое проявляется для различных аустенитных сталей, облученных смешанным спектром нейтронов (в реакторах типа ВВЭР и PWR).

Показано, что низкотемпературное охрупчивание аустенитных сталей обусловлено двумя факторами: деформационным мартенситом и низкой когезивной прочностью границ зерен, вызванной сегрегацией гелия. Предложен механизм зарождения микротрещин на ослабленных границах зерен с учетом морфологии деформационного мартенсита около границ зерен. В температурном диапазоне НТГО обнаружен ряд особенностей пластического деформирования исследуемой аустенитной стали: «бегущая» шейка; резкий рост напряжений перед разрывом образца; различия в кривых деформирования для разных сечений при растяжении стандартного цилиндрического образца.

**Ключевые слова:** облученная аустенитная сталь, механические свойства, механизм разрушения, низкотемпературное гелиевое охрупчивание

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-105-1-116-144

### ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин Б. З., Варовин А. Я., Минкин А. И., Гурин Д. А., Глухов В. А. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после 45 лет эксплуатации. Сообщение

---

<sup>1</sup> Первые три части работы «Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет» опубликованы в журнале «Вопросы материаловедения», 2020, № 3(103).



1. Программа исследований, оборудование и вырезка трепанов из ВКУ // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3(103). – С. 135–143.
2. Lucas G. E. The evolution of mechanical property change in irradiated austenitic stainless steels // Journal of Nuclear Materials. – 1993. – V. 206. – P. 287–305.
3. Garner F. A. Radiation Damage in Austenitic Steels / Ed. R.J.M. Konings // Comprehensive Nuclear Materials. – 2012. – V. 4. – P. 33–95.
4. Little E. A. Fracture mechanics evaluations of neutron irradiated type 321 austenitic steel // J. Nucl. Mater. – 1986. – V. 139. – P. 261–276.
5. 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.
6. Effect of Irradiation on Water Reactors Internals. V. 3: Irradiation Embrittlement of Reactor Internals Materials // AMES Report №11. CEA TechAtom VTT. ECSC-EECC-EAEC, Brussels–Luxemburg, 1997.
7. Chopra O. K. Degradation of LWR Core Internal Materials due to Neutron Irradiation // N45NUREG CR-7027, ANL-10/11, 2010.
8. Chopra O. K., Rao A. S. A Review of irradiation effects on LWR core internal materials – Neutron embrittlement // J. Nucl. Mater. – 2011. – V. 412. – P. 195–208.
9. Fukuya K. Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials // J. Nuclear Science and Technology. – 2013. – V. 50, N 3. – P. 213–254.
10. Margolin B. Z., Kursevich I. P., Sorokin A. A., Vasina N. K., Neustroev V. S. Embrittlement and fracture toughness of highly irradiated austenitic steels for vessel internals of WWER type reactors. Part 2. Relation between irradiation swelling and irradiation embrittlement // Physical and mechanical behavior. Strength of Materials. – 2010. – V. 42. – P. 144–153.
11. Effect of neutron irradiation on microstructure and properties of austenitic AISI 321 steel, subjected to equal-channel angular pressing / V. K. Shamardin, Yu. D. Goncharenko, T. M. Bulanova, et al. // Adv. Mater. – 2012. – V. 31. – P. 167–173.
12. РД ЭО 1.1.2.99.0944–2013. Методика расчета прочности и остаточного ресурса внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет.
13. Карзов Г. П., Марголин Б. З. Основные механизмы радиационного повреждения материалов ВКУ и материаловедческие проблемы длительной эксплуатации // РЭА. – 2015. – V. 2. – P. 8–15.
14. Hure J., Tanguy B., Ritter C., Bourganet S., Sefta F. Extensive investigation of the mechanical properties of a Chooz A internal component // Proceedings of the 7th International Symposium on Contributions of Materials Investigation to Improve the Safety and Performance of PWRs (Fontevraud 9), Avignon, France, 17–20 September 2018.
15. Renault-Laborne A., Malaplate J., Gavaille P., Sefta F., Brimbal D. Characterization of a CHOOZ A corner specimen by transmission electron microscopy, immersion density and thermoelectric power measurements // Proceedings of the 7th International Symposium on Contributions of Materials Investigation to Improve the Safety and Performance of PWRs (Fontevraud 9), Avignon, France, 17–20 September 2018.
16. . Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после 45 лет эксплуатации. Часть 3: Микроструктура и фазовый состав / Е. А. Кулешова, С. В. Федотова, Б. А. Гурович и др. // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3(103). – P. 157–180.
17. Влияние радиационного набухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть 1. Пластичность и трещиностойкость / Б. З. Марголин, А. А. Сорокин, В. А. Швецова и др. // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3 (87). – С. 159–191.
18. Пирогова Н. Е., Джаландинов А. Д., Марголин Б. З., Дергач Р. В., Минкин А. И. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после 45 лет эксплуатации. Часть 2. Расчетно-экспериментальное определение флюенса быстрых нейтронов и повреждающей дозы // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3(103). – P. 144–157

19. Бриджмен П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955. – 444 с.
20. Gusev M. N., Maksimkin O. P., Osipov L. S., Garner F. A. Anomalous large deformation of 12Cr18Ni10Ti austenitic steel irradiated to 55 dpa at 310°C in the BN-350 reactor // *J. Nucl. Mater.* – 2009. – V. 386–388. – P. 273–276.
21. 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.
22. Margolin B. Z., Sorokin A. A. A physical-mechanical model of ductile fracture in irradiated austenitic steels // *Strength of Materials.* – 2013. – V. 45, N 2. – P. 125–143.
23. Belozerov S. V., Neustroev V. S., Shamardin V. K. Studying helium accumulation in austenitic steels for evaluating radiation damage in internals of water-moderated water-cooled power reactors // *The Physics of Metals and Metallography.* – 2008. – V. 106. – P. 503–509.
24. Barnes R. S. Embrittlement of stainless steels and nickel based alloys at high temperature induced by neutron radiation // *Nature.* – 1965. – V. 206. – P. 1307.
25. Ward A. L., Holmes J. J. Ductility Loss in Fast Reactor irradiated stainless steel // *Nuclear Applications & Technology.* – 1970. – V. 9.
26. Вотинов С. Н., Прохоров В. И., Островский З. Е. Облученные аустенитные стали. – М.: Наука, 1987.
27. Rawl Jr. D. E., Caskey Jr., G. R., Donovan J. A. Low-temperature helium embrittlement of tritium-charged stainless steel // 109th Annual AIME Meeting, Las Vegas, Nevada, February 24–28, 1980.
28. Caskey Jr. G. R., Mezzanotte Jr. D. A., Rawl Jr. D. E. Helium damage in austenitic stainless steels, TMS-AIME Annual Meeting, Atlanta, Georgia, March 6–10, 1983.
29. Jenssen A., Efsing P., Forssgren B., Bengtsson B., Molin M. Examination of highly irradiated stainless steels from BWR and PWR reactor pressure vessel internals // *Proceedings of the 7th International Symposium on Contributions of Materials Investigation to Improve the Safety and Performance of PWRs (Fontevraud 7)*, Avignon, France, 26–30 September 2010.
30. Hojna A. Overview of Intergranular Fracture of Neutron Irradiated Austenitic Stainless Steels, *Metals.* – 2017. – V. 7. – P. 392; doi: 10.3390/met7100392.
31. Grossbeck M. L., Ehrlich K., Wassilew C. An assessment of tensile, irradiation creep, creep rupture and fatigue behavior in austenitic stainless steels with emphasis on spectral effects // *J. Nucl. Mater.* – 1990. – V. 174. – P. 264–281.
32. Ullmaier H., Camus E. Low temperature mechanical properties of steels containing high concentrations of helium // *J. Nucl. Mater.* – 1997. – V. 251. – P. 262–268.
33. 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.*
34. Influence of the Neutron Spectrum on the Sensitivity to IASCC and Microstructure of CW 316 Material / M. Ernestova, J. Burda, J. Kocik et al // *Proceedings of the 8th International Symposium on Contributions of Materials Investigation to Improve the Safety and Performance of PWRs (Fontevraud 8)*, Avignon, France, September 2014.
35. 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.
36. Yamagushi M., Shiga M, Kaburaki H. Energetics of segregation and embrittling potency for non-transition elements in the Ni  $\Sigma 5$  (012) tilt grain boundary: a first-principal study // *J. Phys. Cond. Matter.* – 2004. – V. 16. – P. 3933–3956.
37. The effect of Li, He and Ca on grain boundary cohesive strength in Ni // R.W. Smith et al. // *Scripta Materialia.* – 2000. – V. 43(10). – P. 957–961.
38. Yamagushi M., Kaburaki H. First-principal calculations on the grain boundary decohesion of iron and nickel by oxygen // *Proceedings of the Joint International Topical Meeting on Mathematics & Computation and Supercomputing in Nuclear Applications; ANS; 2007.*

39. Jung P., Henry J., Chen J., Brachet J. C. Effect of implanted helium on tensile properties and hardness of 9% Cr martensitic stainless steels // J. Nucl. Mater. – 2003. – V. 318. – P. 241–248.
40. Henry J., Jung P., Chen J., Brachet J.-C. Tensile properties and microstructure of 9Cr1Mo martensitic steels containing a high helium concentration // Journal De Physique IV. – 2002. – N 12 (8). – P. 103–120. DOI: 10.1051/jp4:20020327
41. Schaublin R., Henry J., Dai Y. Helium and point defect accumulation: Microstructure and mechanical behavior // C.R. Physique 2008. – V. 9. – P. 389–400.
42. Henry J., Mathon M.-H., Jung P. Microstructural analysis of 9% Cr martensitic steels containing 0.5 at.% helium // J. Nucl. Mater. – 2003. – V. 318. – P. 249–259.
43. Malaplate J., Vincent L., Averty X., Henry J., Marini B. Characterization of He embrittlement of a 9Cr–1Mo steel using local approach of brittle fracture // Eng. Fracture Mechanics. – 2008. – V. 75. – P. 3570–3580.
44. Lejcek P. Grain boundary segregation in metals. – Springer Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2010.
45. Влияние длительного термического старения на механические свойства и микроструктуру аустенитной стали X18H9 и ее сварных швов / И. П. Курсевич, Б. З. Марголин, О. Ю. Прокошев и др. // Вопросы материаловедения. – 2012. – N 3(71). – P. 109–125.
46. Fukuya K., Nishioka H., Fujii K., Kamaya M., Miura T., Torimaru T. Fracture behavior of austenitic stainless steels irradiated in PWR // J. Nucl. Mater. – 2008. – V. 378. – P. 211–219.
47. Deformation mechanism in 316 stainless steel irradiated at 60 and 330°C // N. Hasimoto, S. J. Zinkle, A. F. Rowcliffe et al // J. Nucl. Mater. – 2000. – V. 283–287. – P. 528–534.
48. Nagy E., Mertinger V., Tranta F., Solyom J. Deformation induced martensitic transformation in stainless steels, Mat. Science and Eng. A. – 2004. – V. 378. – P. 308–313.
49. Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel / Y. E. Shen, X. X. Li, X. Sun et al. // Mat. Science and Eng. A. – 2012. – V. 552. – P. 514–555.
50. Gusev M. N., Field K. G., Busby J. T. Strain-induced phase transformation at the surface of an AISI-304 stainless steel irradiated to 4.4dpa and deformed to 0.8% strain // J. Nucl. Mater. – 2014. – V. 446. – P. 187–192.
51. Бернштейн М. Л., Рахштадт А. Г.. Металловедение и термическая обработка металлов. Т. 1. – М.: Металлургия, 1983.
52. Hashimoto N., Byun T. S., Farrell K. Microstructural analysis of deformation in neutron-irradiated fcc materials // J. Nucl. Mater. – 2006. – V. 351. – P. 295–302.
53. Karlsen W., Diego G., Devrient B. Localized deformation as a key precursor to initiation of intergranular stress corrosion cracking of austenitic stainless steels in nuclear power plants // J. Nucl. Mater. – 2010. – V. 406. – P. 138–151.
54. Stress Intensity Factor Handbook / Ed. Y. Murakami. – Pergamon Press, 1986.
55. Was G. S., Farkas D., Robertson I. M. Micromechanics of dislocation channelling in intergranular stress corrosion crack nucleation // Current opinion in Solid State and Materials Science. – 2012. – V. 16. – P. 134–142.
56. Физическое материаловедение. Т. 4 / Под ред. Б. А. Калина. – М.: МИФИ, 2008.

УДК 621.039.531:539.4

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ПРОГНОЗ РЕСУРСА ЗАХВАТОВ ШТАНГ СУЗ РЕАКТОРА ВВЭР-440.  
Часть 1. Исследование охрупчивания стали 14X17H2 в условиях нейтронного облучения**

А. И. МИНКИН, Б. З. МАРГОЛИН, д-р. техн. наук, В. Н. ФОМЕНКО, канд. техн. наук,  
Л. А. БЕЛЯЕВА, канд. техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА

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

Поступила в редакцию 16.02.2021

После доработки 3.03.2021

Принята к публикации 10.03.2021

Исследовано влияние облучения на механические свойства, трещиностойкость и твердость стали марки 14X17H2 – металла захватов аварийно-регулирующих и компенсирующих кассет системы управления и защиты (СУЗ) реактора ВВЭР. Исследования проведены на металле захватов, облучавшихся в составе энергоблока № 3 Нововоронежской АЭС до флюенса нейтронов  $8 \cdot 10^{20}$  нейтр./см<sup>2</sup>. Построена температурно-дозовая зависимость предела текучести стали марки 14X17H2, установлены корреляционные зависимости между характеристиками ее трещиностойкости, прочности и твердости.

*Ключевые слова:* сталь 14X17H2, свойства, нейтронное облучение, захват АРК.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-105-1-145-162

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование служебных свойств материала захватов промштанг реакторов типа ВВЭР-440 / В. Ф. Винокуров, А. Н. Лапин, Н. Е. Одинцов и др. // Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Проблемы материаловедения при изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». Т. 2, Санкт-Петербург, 1992.
2. ТУ 108.11.853–87. Прутки горячекатаные и кованые.
3. ГОСТ 5632–2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаро-стойкие и жаропрочные. Марки.
4. Межгосударственный стандарт ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» – М.: Стандартиформ, 2005.
5. ASTM E 1820–13. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
6. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. Т. 1 / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 448 с.
7. ASTM E 1921-17a. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range.
8. Wallin K. The size effect in  $K_{Ic}$  results // Eng. Fract. Mech. – 1985. – V. 22. – P. 149–163.
9. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Фоменко В. Н., Костылев В. И. Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 2. Развитие метода Unified Curve // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4(88). – С. 151–178.
10. Зегер А. Механизм скольжения и упрочнения в кубических гранецентрированных и гексагональных плотноупакованных металлах. Дислокации и механические свойства кристаллов / Под ред. М. В. Классен-Неклюдовой и В. Л. Инденбома. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1960. – С. 179–268.
11. Бернер Р., Кронмюллер Г. Пластическая деформация монокристаллов. – М.: Мир, 1969.
12. Ярошевич В. Д., Рывкина Д. Г. Влияние структуры на термоактивационные параметры пластической деформации армо-железа при низких температурах // Физика металлов и металловедение. – 1971. – Т. 31, № 6. – С. 1293–1298.
13. 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.
14. Busby J.T., Hash M.C., Was G.S.. The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels // J. of Nuc. Mat. – 2005. – № 336. – P. 267–278.
15. Kirk M. Assessment of flux effect exhibited by IVAR database // Proc. of the IAEA Tech. Meeting on Radiation Embrittlement and Life Management of Reactor Pressure Vessels. Znojmo, Czech Republic, 18–22 October 2010.
16. Eason E. D., Odette G. R., Nanstad R. K., Yamamoto T. A. A physically based correlation of irradiation induced transition temperature shifts for RPV steels. ORNL/TM-2006/530, Nov., 2007.

УДК 621.039.531:539.4:621.039.56

#### ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ПРОГНОЗ РЕСУРСА ЗАХВАТОВ ШТАНГ СУЗ РЕАКТОРА ВВЭР-440

## Часть 2. Оценка прочности и обоснование сроков проведения мониторинга деградации металла захвата

А. И. МИНКИН<sup>1</sup>, Б. З. МАРГОЛИН<sup>1</sup>, д-р. техн. наук, В. Г. ФЕДОСОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<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>ПАО «Ижорские заводы», 196650, Санкт-Петербург, Колпино

Поступила в редакцию 16.02.2021

После доработки 3.03.2021

Принята к публикации 11.03.2021

Проведен анализ прочности и сопротивления хрупкому разрушению захватов аварийно-регулирующих и компенсирующих кассет системы управления и защиты (СУЗ) реактора ВВЭР-440. На основе исследований металла захватов, облучавшихся в составе энергоблока № 3 Нововоронежской АЭС, показано, что прочность захватов по критерию хрупкого разрушения обеспечивается при условии, что радиационно-индуцированное упрочнение металла, измеряемое в терминах твердости, не превысит 423 единицы по шкале Виккерса.

**Ключевые слова:** прочность, захват СУЗ, сталь 14X17H2, облучение

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-105-1-163-176

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зверков В. В., Игнатенко, Е. И. Ядерная паропроизводящая установка с ВВЭР-440. – М.: Энергоатомиздат, 1987, – 200 с.

2. Шмелев В. Д., Драгунов Ю. Г., Денисов В. П., Васильченко И. Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 220 с.

3. Анализ условий работы штанги промежуточной в реакторе В-213 и их влияние на срок службы. – Подольск, ОКБ «Гидропресс», 1982.

4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

5. ТУ 108.11.853–87. Прутки горячекатаные и кованые.

6. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Фоменко В. Н., Костылев В. И. Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 2. Развитие метода Unified Curve // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4(88). – С. 151–178.

7. ASTM E 1921–17a. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range.

8. Исследование служебных свойств материала захватов промштанг реакторов типа ВВЭР-440. Винокуров В. Ф., Лапин А. Н., Одинцов Н. Е. и др. // Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Проблемы материаловедения при изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». Т. 2., Санкт-Петербург, 1992.

УДК 621.039.531:539.4: 621.785.3

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ПРОГНОЗ РЕСУРСА ЗАХВАТОВ ШТАНГ СУЗ РЕАКТОРА ВВЭР-440

### Часть 3. Оптимизация восстановительного режима послерадиационного отжига захватов штанг СУЗ

А. И. МИНКИН, Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Л. А. БЕЛЯЕВА, канд. техн. наук,  
Н. Е. ПИРОГОВА, А. М. ШУМКО, С. Н. ПЕТРОВ, канд. хим. 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 16.02.2021

После доработки 3.03.2021

Принята к публикации 10.03.2021



Проведена оптимизация режима восстановительного послерадиационного отжига стали марки 14X17H2 – металла захватов аварийно-регулирующих и компенсирующих кассет реактора ВВЭР. Показано, что предложенный режим приводит к полному восстановлению свойств металла захватов, охрупченного под воздействием нейтронного облучения. При этом выбранный режим не снижает коррозионной стойкости металла трубы штанги, изготовленной из аустенитной стали марки 08X18H10T.

*Ключевые слова:* сталь 14X17H2, сталь 08X18H10T, облучение, восстановительный отжиг

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-105-1-177-191

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеенко Н. Н., Амаев А. Д., Горынин И. В., Николаев В. А. Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов. – М.: Энергоиздат, – 1981. – 191 с.
2. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A.G. Radiation embrittlement modeling in multiscale approach to brittle fracture of RPV steel // *Int. J. of Fracture*. – 2013. – V. 179, Is. 1–2. – P. 87–108.
3. Analysis of a link of embrittlement mechanisms and neutron flux effect as applied to reactor pressure vessel materials of WWER / E. V. Yurchenko, B. Z. Margolin, A. M. Morozov et al. // *Int. J. Nucl. Mater.* 2013. – V. 434. – P. 347–356.
4. Утевский Л. М., Гликман Е. Э., Карк Г. С. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. – М.: Металлургия, 1987. – 224 с.
5. Lejcek P. Grain boundary segregation in metals. – Springer Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2010.
6. Margolin B., Yurchenko E., Potapova V., Pechenkin V. On the modelling of thermal aging through neutron irradiation and annealing // *Advances in Materials Science and Engineering (Hindawi)*. – 2018. – V. 2018, Article ID 7175083, <https://doi.org/10.1155/2018/7175083>.
7. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюрев В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970. – 422 с.
8. Fujii T., Tohgo K., Kenmochi A., Shimamura Yo. Experimental and numerical investigation of stress corrosion cracking of sensitized type 304 stainless steel under high-temperature and high-purity water // *Corrosion Science*. – 2015. – V. 97. – P. 139–149.
9. The importance of steel chemistry and thermal history on the sensitization behavior in austenitic stainless steels: Experimental and modeling assessment / S. Kolli, V. Javaheri, T. Ohligschläger et al. // *Materials Today Communications*. – 2020. – V. 24 (101088).
10. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М., Металлургия. – 1986. – 224 с.
11. ТУ 108.11.853–87. Прутки горячекатаные и кованные.
12. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Fomenko V. N., Kostylev V. I. Further improvement of the Prometey model and unified curve method. Part 2. Improvement of the unified curve method // *Int. J. Eng. Fract. Mech.* – 2018. – V. 191. – P. 383–402.