

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

- Князюк Т. В., Новоскольцев Н. С., Хлусова Е. И., Зисман А. А.* Влияние ванадия, ниобия и бора на кинетику рекристаллизации аустенита сталей различного уровня прочности в условиях горячей деформации ..... 5
- Сыч О. В., Коротовская С. В., Новоскольцев Н. С., Хлусова Е. И.* Особенности структурообразующих процессов в экономнолегированной судостроительной стали с бейнитно-мартенситой структурой уровня прочности 890 при микролегировании ванадием ..... 15
- Быстров Р. Ю., Геращенко Д. А., Геращенко Е. Ю., Кузнецов П. А.* Исследование конструкционной стали арктического класса в паре трения со льдом ..... 29
- Адашкин А. М., Бутрим В. Н., Кубаткин В. С.* К вопросу о механизме упрочнения и разрушения двухфазного хромоникелевого сплава ..... 36
- Бердник О. Б., Царева И. Н.* Влияние высокотемпературного старения на структуру и свойства литого никелевого сплава ..... 45

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Гошкодера М. Е., Климов В. Н., Кубанцев В. И., Марголин В. И., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В., Шакиров И. В.* Разработка технологии получения наноструктурированных композиционных порошков методом высокоскоростного механосинтеза ..... 54
- Геращенко Д. А., Удалов Ю. П.* Расчет и исследование фазового состава композиционного интерметаллидного слоя, синтезированного на поверхности титанового сплава ВТ6 из порошков  $\text{Cu-SiC}$  и  $\text{Al-SiC}$  при лазерной обработке ..... 62
- Шадринов Н. В., Федорова А. Ф., Давыдова М. Л., Федоров А. Л.* Исследование стойкости бутадиен-нитрильной резины к термоциклированию в углеводородной среде ..... 72

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Яковлева С. И., Далин М. А., Крупнина О. А., Крупенников В. А.* Исследование причин затухания ультразвуковых колебаний в 3D-тканом композиционном материале ортогонального плетения . 83
- Седакова Е. Б., Ли Сяньшунь, Жаров В. Е., Бреки А. Д., Поздняков А. О., Смирнов А. А.* Способность полимеров к самосмазыванию в металлополимерных парах трения ..... 94

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

- Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Мотовилина Г. Д., Забавичева Е. В., Петров С. Н.* О корреляции статической трещиностойкости высокопрочной среднелегированной стали с параметрами структурного состояния и стандартными механическими свойствами ..... 103
- Болобов В. И., Петкова А. П., Попов Г. Г., Злотин В. А., Латипов И. У., Шерстнева А. О., Жуйков И. В.* Сравнительный анализ потерь компримированного водорода при транспортировке по трубопроводам из различных материалов ..... 124

**РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

- Гурович Б. А., Фролов А. С., Кулешова Е. А., Федотов И. В.* Влияние длительных высокотемпературных выдержек на механические свойства и структуру сплава 42ХНМ после нейтронного облучения в составе ВВЭР-1000. Часть 1. Механические испытания ..... 134
- Гурович Б. А., Фролов А. С., Кулешова Е. А., Мальцев Д. А., Федотов И. В., Сафонов Д. В.* Влияние длительных высокотемпературных выдержек на механические свойства и структуру сплава 42ХНМ после нейтронного облучения в составе ВВЭР-1000. Часть 2. Структурные исследования ..... 150
- Юрченко Е. В., Тимофеев М. Н., Марголин Б. З., Галяткин С. Н.* Исследование сопротивления деформированию и разрушению металла сварных швов корпуса ВВЭР ..... 174

**ХРОНИКА**

- Орыщенко А. С., Фомина О. В., Цуканов В. В., Савичев С. А.* Становление броневоего производства в России. Производство корабельной брони в конце XIX – начале XX в. .... 189

УДК 669.14.018.295:621.771.016:620.186.5

**ВЛИЯНИЕ ВАНАДИЯ, НИОБИЯ И БОРА НА КИНЕТИКУ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ АУСТЕНИТА  
СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ ПРОЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Т. В. КНЯЗЮК, канд. техн. наук, Н. С. НОВОСКОЛЬЦЕВ, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук,  
А. А. ЗИСМАН, д-р физ.-мат. наук

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

Поступила в редакцию 15.11.2022

После доработки 24.11.2022

Принята к публикации 25.11.2022

Представлены обобщенные результаты исследований кинетики динамической и статической рекристаллизации аустенита низкоуглеродистых низколегированных и легированных сталей классов прочности 420, 620, 690, 750 и 890 и среднеуглеродистых сталей класса прочности 1700, содержащих разное количество ванадия, ниобия и бора. Исследования проводили пластометрическим методом в условиях деформации, приближенных к условиям горячей прокатки. Установлено, что ванадий на рекристаллизацию оказывает слабое влияние, а ниобий во всех исследуемых сталях независимо от общего уровня легирования в температурном диапазоне горячей прокатки существенно ее замедляет. Ускорению рекристаллизации аустенита способствует микролегирование сталей бором.

*Ключевые слова:* высокопрочные стали, микролегирование, рекристаллизация, горячая прокатка

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-05-14

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Зисман А. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. Построение и использование карт структурных изменений при горячей деформации аустенита низкоуглеродистой стали 09ХН2МДФ для оптимизации промышленных технологий // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 1(73). – С. 37–48.

2. Зисман А. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. Влияние микролегирования ниобием на рекристаллизационные процессы в аустените низкоуглеродистых легированных сталей // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 1(73). – С. 31–36.

3. Kniaziuk T. V., Novoskoltsev N. S., Zisman A. A., Khlusova E. I. Influence of niobium microalloying on the kinetics of static and dynamic recrystallization during hot rolling of medium-carbon high-strength steels // Inorganic materials: applied research. – 2020. – № 6(11). – P. 1325–1332. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-101-1-05-15>

4. Kniaziuk T. V., Zisman A. A., Novoskoltsev N. S., Khlusova E. I. Anomalous Refinement of the Austenite Grain upon High-Strain-Rate Hot Deformation of Microalloyed Medium-Carbon Steel // Physics of Metals and Metallography. – 2020. – V. 121. – N 6. – P. 543–547. DOI: 10.1134/s0031918x20060095.

5. Kniaziuk T. V., Zisman A. A. Abnormal effect of strain rate on dynamic recrystallization of austenite in medium carbon steel alloyed by boron // Letters on Materials. – 2022. – N 12(1). – P. 71–75. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-1-71-75>

6. Сыч О. В., Коротовская С. В., Хлусова Е. И., Новоскольников Н. С. Разработка термомодеформационных режимов прокатки низколегированной «Арс»-стали с квазиоднородной ферритно-бейнитной структурой // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 2(106). – С 7–20. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2021-106-2-07-20>

7. Korotovskaya S. V., Sych J. V., Khlusova E. I., Novoskoltsev N. S. Microalloying Effects on Structure-Forming Process During Hot Plastic Deformation. Inorganic Materials: Applied Research. – 2021. – Т.12. – № 6. – С. 1476–1484. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-104-4-05-16>

8. Fernandez A. I., Uranga P., Lopez B., Rodriguez-Ibabe J. M. Dynamic recrystallization behavior covering a wide austenite grain size range in Nb and Nb-Ti microalloyed steels // Materials Science and Engineering. – 2003. – № 361. – P. 367–376.

9. Soshina T. V., Zisman A. A., Khlusova E. I. Study of the austenite recrystallization in steel 09HN2MD using the stress relaxation method under hot rolling conditions // Inorganic Materials: Applied Research. – 2013. – Т.4, № 6. – P. 487–493. DOI: 10.1134/S2075113313060129

10. Karlsson L., Norden H. Grain boundary segregation of boron an experimental and theoretical study // J. Phys. Colloques. – 1986. – № 47. – P. 257–262.

11. Архаров В. И. Теория микролегирования сплавов. – М: Машиностроение, 1975. – 61 с.

12. Ланская К. А., Куликова Л. В., Яровой В. В. Микролегирующие и примесные элементы в низколегированной хромомолибденованадиевой стали. – М.: Металлургия, 1989. – 175 с.

УДК 669.14.018.295:669.017.16:621.771.016

### **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ С БЕЙНИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТРУКТУРОЙ УРОВНЯ ПРОЧНОСТИ 890 ПРИ МИКРОЛЕГИРОВАНИИ ВАНАДИЕМ**

О. В. СЫЧ, канд. техн. наук, С. В. КОРОТОВСКАЯ, канд. техн. наук,  
Н. С. НОВОСКОЛЬЦЕВ, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, г. Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49. E-mail: [npk3@crism.ru](mailto:npk3@crism.ru)*

Поступила в редакцию 8.02.2023

После доработки 2.03.2023

Принята к публикации 3.03.2023

Исследованы кинетика роста аустенитного зерна при нагреве экономнолегированной судостроительной стали уровня прочности 890 с бейнитно-мартенситной структурой, особенности процессов динамической и статической рекристаллизации, протекающих при различных температурно-деформационных режимах горячей пластической деформации. Изучены фазовые превращения при непрерывном охлаждении горячедеформированного аустенита. В результате установлены граничные температурно-деформационные условия для формирования мелкодисперсной бейнитно-мартенситной структуры, на основании которых разработаны технологические режимы производства толстолистового проката в промышленных условиях. Представлены структура и свойства полученного листового проката толщиной 35 мм из стали уровня прочности 890.

**Ключевые слова:** экономнолегированная высокопрочная сталь, закалка с прокатного нагрева, вакуумное травление, размер аустенитного зерна, Gleeble 3800, динамическая рекристаллизация, статическая рекристаллизация, фазовые превращения, листовой прокат, структура, свойства

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-15-28

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хлусова Е. И., Сыч О. В., Орлов В. В. Хладостойкие стали. Структура, свойства, технологии // Физика металлов и материаловедение. – 2021. – Т. 122, № 6. – С. 621–657.

---

© 2023

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

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

2. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Часть 2. Технология производства, структура и характеристики работоспособности листового проката // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 4 (96). – С. 14–41.
3. Урцев В. Н., Корнилов В. Л., Шмаков А. В., Краснов М. Л., Стеканов П. А., Платов С. И., Мокшин Е. Д., Урцев Н. В., Счастливец В. М., Разумов И. К., Горностырев Ю. Н. Формирование структурного состояния высокопрочной низколегированной стали при горячей прокатке и контролируемом охлаждении // Физика металлов и металлургия. – 2019. – Т. 120, № 12. – С. 1335–1344.
4. Opiela M., Ozgowicz W. Effects of Nb, Ti and V on recrystallization kinetics of austenite in microalloyed steels // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2012. – V. 55/2. – P. 759–771.
5. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.
6. Fernandez A. I., Uranga P., Lopez B., Rodriguez-Ibabe J. M. Dynamic recrystallization behavior covering a wide austenite grain size range in Nb and Nb–Ti Microalloyed steels // Materials Science and Engineering A. – 2003. – V. A361. – P. 367–376.
7. Sakai T., Belyakov A., Kaibyshev R., Miura H., Jonas J. J. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions // Progress in Materials Science. – 2014. – V. 60. – P. 130–207.
8. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
9. Конева Н. А., Тришкина Л. И., Козлов Э. В. Физика субструктурного и зернограницного упрочнения // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 40–49.
10. Козлов Э. В., Конева Н. А., Попова Н. А. Фрагментированная субструктура, формирующаяся в ОЦК-сталях при деформации // Известия РАН. Серия физическая. – 2004. – № 10. – С. 1419–1427.
11. Isasti N., Jorge-Badiola D., Taheri M.L., Uranga P. Phase Transformation Study in Nb–Mo Microalloyed Steels Using Dilatometry and EBSD Quantification // Metallurgical and materials transactions A. – 2013. – V. 44A. – P. 3552–3563.
12. Патент РФ № 2726056. Листовой прокат, изготовленный из высокопрочной стали // Орыщенко А. С., Голосиенко С. А., Хлусова Е. И., Сыч О. В., Коротовская С. В., Рябов В. В., Шумилов Е. А., Яшина Е. А., Владимиров А. Д., Попков А. Г., Хадеев Г. Е., Гелевер Д. Г // Бюллетень изобретений. – № 19 от 08.07.2020.
13. Сошина Т. В., Зисман А. А., Хлусова Е. И. Выявление бывших зерен аустенита методом термического травления в вакууме при имитации ТМО низкоуглеродистых сталей // Металлург. – 2013. – № 2. – С. 63–70.
14. Garcia de Andres C., Bartolome M. J., Capdevila C., San Martin D., Caballero F. G., Lopez V. Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels // Materials Characterization. – 2001. – № 46. – P. 389–398.
15. Коротовская С. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И., Новоскольцев Н. С. Влияние микрولةгирования на особенности структурообразующих процессов при горячей пластической деформации // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 4 (104). – С. 5–16.
16. Золоторевский Н. Ю., Зисман А. А., Панпурин С. Н., Титовец Ю. Ф., Голосиенко С. А., Хлусова Е. И. Влияние размера зерна и деформационной субструктуры аустенита на кристаллографические особенности бейнита и мартенсита низкоуглеродистых сталей // МитОМ. – 2013. – № 10. – С. 39–48.
17. Сыч О. В., Коротовская С. В., Хлусова Е. И., Голубева М. В., Попков А. Г., Яшина Е. А. Структура и свойства новых сталей производства ПАО «Северсталь» для Арктических конструкций // Металлург. – 2022. – № 11. – С. 12–24.

УДК 669.14.018.41:531.44:620.178.16

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ АРКТИЧЕСКОГО КЛАССА В ПАРЕ ТРЕНИЯ СО ЛЬДОМ

Р. Ю. БЫСТРОВ, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА,  
П. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 22.11.2022

После доработки 12.12.2022

Принята к публикации 14.12.2022

Проведены испытания пар трения сталь – лед для двух марок конструкционной стали – с пределом текучести 540 и 760 МПа. Исследованы зависимости коэффициентов трения от приложенной нагрузки и изменения температуры окружающей среды. Показано, что коэффициент статического трения образцов заметно выше кинетического, что свидетельствует об адгезии льда к стали.

*Ключевые слова:* коэффициент трения, конструкционные стали, арктические стали, износ

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-29-35

### ЛИТЕРАТУРА

1. Истирающее воздействие ледяного покрова на опоры гидротехнических сооружений в условиях шельфа о. Сахалин / Т. Э. Уварова, С. Д. Ким, П. С. Жаров и др. // Материалы региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс». – Владивосток: ДВГТУ, 2002. – Ч. 2. – С. 198–201.

2. Беккер А. Т., Гомольский С. Г., Сабодаш О. А., Коваленко Р. Г., Уварова Т. Э., Помников Е. Е. Физические и механические свойства модельного льда для исследования абразии морских нефтегазовых платформ // Матер. науч. конф. «Вологдинские чтения» «Архитектура и строительство». – Владивосток: ДВГТУ, 2010. – С. 177–189.

3. Saeki H., Onodera T., Tatsuta M., Ono T. Experimental Study on Coefficient of Friction of Sea Ice // The Annual Meeting of Japan Society of Civil Engineers. – Hokkaido Branch, Sapporo, Japan, 1981.

4. Фадин Ю. А., Киреенко О. Ф., Кузнецова О. С., Сычев С. В. Начальная стадия контакта хрупких тел при трении // Трение и износ. – 2011. – Т. 32, № 3. – С. 30–33.

5. Технология конструкционных материалов / Под ред. О. С. Комарова. – Минск: Новое знание, 2005. – 560 с.

6. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение. Смазка. Износ. Физические основы и технические приложения трибологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – С. 50–53.

УДК 669.24'26:539.42

## К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ УПРОЧНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ХРОМОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

А. М. АДАСКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В. Н. БУТРИМ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, В. С. КУБАТКИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
127055, Москва, Вадковский переулок, 3А, стр. 1

<sup>2</sup>АО «Композит», 141070, Московская обл., г. Королев, Пионерская ул., 4.  
E-mail: [vbutrim@kompozit-mv.ru](mailto:vbutrim@kompozit-mv.ru)

Поступила в редакцию 21.09.2022

После доработки 21.11.2022

Принята к публикации 25.11.2022

© 2023

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

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

Исследованы механизмы упрочнения двухфазного хромоникелевого сплава X65HВФТ. Установлено, что механизм упрочнения зависит от режима термической обработки: периоды решетки  $\alpha$ -фазы (матрица сплава – твердый раствор Ni в Cr) в закаленном и равновесном состояниях практически одинаковы; уровень прочностных и пластических свойств сплава определяет дисперсность и количество выделяющейся при термической обработке «мягкой»  $\gamma$ -фазы (твердый раствор Cr в Ni), твердость которой меньше, чем  $\alpha$ -фазы. При закалке из однофазной области от температуры 1250°C и отпуске при 800–900°C обеспечивается более высокий уровень прочности по сравнению с прочностью отожженного сплава и повышается температура начала высокотемпературного разрушения. Характер разрушения зависит от температуры испытаний. Влияние  $\gamma$ -фазы проявляется более значительно при температурах ниже эквикогезивной.

*Ключевые слова:* сплав на основе хрома, упрочнение, эквикогезивная температура, твердые растворы замещения Ni в Cr и Cr в Ni, механизм разрушения

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-36-44

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Панасюк И. О. Хром и его сплавы: обзор зарубежной и некоторой отечественной литературы за 1950–1960 гг. – М.: ОНТИ, 1961. – 40 с.
2. Исследование структурного состояния и механических свойств двухфазного хромоникелевого сплава // Г. В. Карсанов, Г. Г. Курдюмова, Ю. В. Мильман и др. // Физика и химия материалов. – 1971. – № 3. – С. 67–74.
3. Перепелкин А. В., Саржан Г. Ф., Фирстов С. А., Курдюмова Г. Г. Исследование особенностей механизма деформации и разрушения двухфазного хромоникелевого сплава ВХ4 // Физика металлов и металловедение. – 1979. – Т. 48, вып. 3. – С. 588–593.
4. Саржан Г. Ф., Трефилов В. И., Фирстов С. А. Изучение распада пересыщенного твердого раствора на основе хрома в системе Cr–Ni // Физика металлов и металловедение. – 1971. – Т. 31, вып. 2. – С. 294–298.
5. Adaskin A. M., Butrim V. N., Kubatkin V. S., Sapronov I. Yu. Strain Hardening Curves and Mechanical Properties of a Chromium-Base Refractory Alloy as a Function of Heat Treatment and Test Temperature // Metal Science and Heat Treatment. – 2016. – V. 57, Issue 9. – P. 625–631.
6. Adaskin A. M., Butrim V. N., Kashirtsev V. V., Sapronov I. Y. Behavior of Refractory Chromium-Base Alloy Kh65NVFT // Metal Science and Heat Treatment. – 2013. – V. 55, Issue 7–8. – P. 409–414.
7. Бутрим В. Н., Адашкин А. М. Особенности жаропрочного сплава на основе хрома и область его применения // Технология легких сплавов. – № 4. – 2021. – С. 60–71.
8. Масленков С. Б. Жаропрочные стали и сплавы. Справочник. – М.: Металлургия, 1988. – 191 с.
9. Адашкин А. М., Бутрим В. Н., Сапронов И. Ю. Фазовые превращения, структура и свойства сплава X65HВФТ на основе хрома // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – Т. 35, № 11. – С. 1001–1012.
10. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 2. Справочник / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1019 с.
11. Диаграммы состояния металлических систем 1997–1998. Выпуск ХLI: Приложение к сводному тому и выпуску реферативного журнала «Металловедение и термическая обработка». – М., 1999. – С. 71–72.
12. Свойства элементов. Справочник / Под ред. М. Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1967. – 672 с.
13. Золотаревский В. С. Механические испытания и свойства металлов. Изд. 3. – М.: МИСИС. – 1998. – 400 с.
14. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 472 с.
15. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1974.

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СТАРЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА  
ЛИТОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА**

О. Б. БЕРДНИК, канд. техн. наук, И. Н. ЦАРЕВА, канд. физ.-мат. наук

*Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН) – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики» Российской академии наук (ФИЦ ИПФ РАН), 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85. E-mail: berdnik80@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.01.2023

После доработки 24.01.2023

Принята к публикации 26.01.2023

Исследованы особенности изменения структуры и прочностных свойств жаропрочного никелевого сплава ХН65КМВЮТЛ после различных сроков эксплуатации в составе газотурбинного двигателя. Показано, что после эксплуатации в течение 25 000 ч в микроструктуре сплава происходят необратимые изменения, которые отрицательно влияют на рабочие характеристики деталей. Стабильность структурного состояния и механических свойств является необходимым условием для обеспечения надежности и продления ресурса. Приведены результаты исследования влияния термической обработки на структурные характеристики сплава, произведена оценка влияния структурных параметров на механические свойства. Установлено, что своевременное применение восстановительных технологий может продлить ресурс изделий.

*Ключевые слова:* никелевый сплав, микроструктура, карбидная фаза, интерметаллидная фаза, термическая обработка, механические характеристики

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-45-53

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Царева И. Н., Бердник О. Б., Разов Е. Н. Разработка технологии продления ресурса турбинных лопаток из сплава ХН65ВМТЮ // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3 (27), ч. 2. – С. 240–247.
2. Сорокин В. Г. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
3. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1976. – 568 с.
4. Металловедение. Т. 2 / И. И. Новиков и др. – М.: Издательский дом МИСиС. 2009. – 496 с.
5. Калин Б. А., Платонов П. А., Тузов Ю. В., Чернов И. И., Штромбах Я. И. Физическое материаловедение: Учебник для вузов. Т. 6. – М.: МИФИ, 2008. – 672 с.
6. Гольдштейн М. И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали: Учебник. – М.: Металлургия, 1999. – 408 с.
7. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986. – 542 с.
8. Ильин С. И., Корягин Ю.Д. Технология термической обработки сталей: Учебное пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 120 с.
9. Степнов М. Н. Справочник. – М.: Машиностроение, 2005. – 399 с.
10. Bowen J. R., Gholinia A., Roberts S. M., Prangnell P.B. Analysis of the billet deformation behavior in equal channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering*. – 2000. – № 287. – P. 87–99.
11. Тарасенко Ю. П., Бердник О. Б. Оптимизация режима термической обработки для продления ресурса лопаток турбин высокого давления // *Материаловедение*. – 2012. – № 5. – С. 24–29.
12. Скуднов В. А., Тарасенко Ю. П., Бердник О. Б. Выбор оптимальной рабочей температуры никелевых сплавов ЧС70-ВИ и ЧС88У-ВИ с позиции синергетики // *Технология материалов*. – 2008. – № 12. – С. 16–19.
13. Gazder A.A., Dalla Torre F., Gu C. F., Davies C. H. J., Pereloma E. V. Microstructure and texture evolution of  $b_{cc}$  and  $f_{cc}$  metals subjected to equal channel angular extrusion // *Materials Science and Engineering*. – 2006. – № 415. – P. 126–139.

14. Давыдов Д. И., Виноградова Н. И., Казанцев Н. В., Степанова Н. Н. Исследование структуры двух никелевых жаропрочных сплавов после высокотемпературной деформации // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116, № 2. – С. 210–218.

УДК 621.793.7:669.295

## РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СЛОЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6 ИЗ ПОРОШКОВ Cu–SiC И Al–SiC ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Ю. П. УДАЛОВ<sup>2</sup>, д-р хим. 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> СПбГТИ (ТУ), 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 26. E-mail: [udalov@lti-gti.ru](mailto:udalov@lti-gti.ru)

Поступила в редакцию 26.12.2022

После доработки 18.01.2023

Принята к публикации 20.01.2023

Рассмотрены физико-химические основы технологии «холодного» газодинамического напыления на титан покрытий для двух типов шихты, в одном из которых в качестве пластичного металла используется химически неактивная медь в сочетании с абразивным порошком карбида кремния, в другом – химически активный алюминий в сочетании с карбидом кремния. Разработана методика термодинамического моделирования для подбора состава шихты покрытия и прогноза изменения его фазового состава при высокой температуре.

**Ключевые слова:** титановый сплав, композиционное интерметаллидное покрытие, холодное газодинамическое напыление, медь – карбид кремния, алюминий – карбид кремния, лазерная обработка

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-62-71

### ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов И. А., Лещев К. А., Никифоров А. А., Демин С. А. Холодное газодинамическое напыление (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 8(90). – С. 77–93.
2. Иноземцев А. А., Башкатов И. Г., Коряковцев А. С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития. – М.: ВИАМ, 2010. – С. 43–46.
3. Гринберг Б. А., Иванов М. А. Интерметаллиды Ni<sub>3</sub>Al и TiAl: микроструктура, деформационное поведение. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 359 с.
4. Ночовная Н. А., Базылева О. А., Каблов Д. Е., Панин П. В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / Под общ. ред. Е. Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2018. – 308 с.
5. Proc. 10th World Conf. on Titanium (Titanium'2003). Science and Technology, 13–18 July 2003, Hamburg, Germany, 1–5. – P. 3425.
6. Tang C., Cheng F., Man H. Effect of laser surface melting on the corrosion and cavitation erosion behaviors of a manganese – nickel – aluminium bronze // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – N 373(1–2). – P. 195–203. doi:10.1016/j.msea.2004.01.016.
7. Colinet C., Pasturel A., Buschow K. H. J. Enthalpies of formation of Ti–Cu intermetallic and amorphous phases // Journal of Alloys and Compounds. – 1997. – N 247. – P. 15–19.
8. Радишевский В. Л., Лепаква О. К., Афанасьев Н. И. Синтез, структура и свойства МАХ-фаз Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> и Nb<sub>2</sub>AlC // В сб. XII межд. конф. «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 21–24 апреля 2015 г. – С. 502–504.
9. Истомина П. В., Надуткин А. Б., Рябков Ю. Л., Голдин Б. А. Получение Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> // Неорганические материалы. – 2006. – Т. 42, № 3. – С. 292–297.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОЙ РЕЗИНЫ К ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЮ В УГЛЕВОДОРОДНОЙ СРЕДЕ

Н. В. ШАДРИНОВ, канд. техн. наук, А. Ф. ФЕДОРОВА, канд. техн. наук,  
М. Л. ДАВЫДОВА, канд. техн. наук, А. Л. ФЕДОРОВ, канд. техн. наук

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН»  
Институт проблем нефти и газа СО РАН (ИПНГ СО РАН),  
677007, Якутск, ул. Автомоторная, д. 20. E-mail: [davmlar@mail.ru](mailto:davmlar@mail.ru)

Поступила в редакцию 14.11.2022

После доработки 29.12.2022

Принята к публикации 29.12.2022

Исследовано изменение свойств резин 98-1 и РП-10 на основе морозо- и маслобензостойких бутадиен-нитрильных каучуков с содержанием связанного нитрила акриловой кислоты (НАК) 17–20 мас.% в условиях термоциклирования в диапазоне от –50 до 80°С в воздушной и рабочей углеводородной среде гидравлического масла И-20А в свободном и деформированном состояниях. Установлено, что наибольшей стойкостью в среде воздуха обладает резина 98-1, а в углеводородной среде – резина РП-10, содержащая серо-пероксидную вулканизирующую систему и сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Показано незначительное влияние деформации на изменение свойств резин и ухудшение морозостойкости вплоть до ее полной потери при термоциклировании в среде гидравлического масла И-20А.

**Ключевые слова:** термоциклирование, старение резин, физико-механические свойства, морозостойкость, бутадиен-нитрильный каучук, сверхвысокомолекулярный полиэтилен

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-72-82

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чайкун А. М., Наумов И. С., Алифанов Е. В. Резиновые уплотнительные материалы (обзор) // Труды ВИАМ. – 2017. – № 1(49). – С. 99–106. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-12-12
2. Зуев Ю. С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред. – М.: Химия, 1972. – 232 с.
3. Бузник В. М., Василевич Н. И. Материалы для освоения арктических территорий – вызовы и решения // Лаборатория и производство. – 2020. – № 1(11). – С. 98–107. DOI: 10.32757/2619-0923.2020.1.11.98.107
4. Резниченко С. В., Морозов Ю. Л. Большой справочник резинщика. Т. 2: Резины и резинотехнические изделия. – М.: Техинформ МАИ, 2012. – 648 с.
5. Wei X.-F., Linde E., Hedenqvist M. S. Plasticizer loss from plastics or rubber products through diffusion and evaporation // Npj Materials Degradation. – 2019. – V. 18, Is. 3. – P. 1–8. DOI: 10.1038/s41529-019-0080-7
6. Петрова Н. Н., Федорова А. Ф. Старение резин на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-18 в условиях совместного действия углеводородных сред и низких температур // Каучук и резина. – 2001. – № 6. – С. 2–6.
7. Федорова А. Ф., Давыдова М. Л., Шадрин Н. В., Борисова А. А., Федоров А. Л., Антоев К. П., Халдеева А. Р., Павлова В. В. Исследование изменения свойств уплотнительных резин в условиях воздействия углеводородной среды и температурного режима // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2022. – № 2(27). – С. 316–326. DOI: [10.31242/2618-9712-2022-27-2-316-326](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-316-326)
8. Патент РФ № 2719809, С08L 9/02, С08L 23/06, С08K 3/04, С08K 3/06, С08K 5/14, С08K 5/3725, С08K 5/44, 23.04.2020 / Н. В. Шадрин, А. А. Борисова, А. Р. Халдеева и др. Маслобензостойкая морозостойкая резиновая смесь с повышенной термостойкостью.
9. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов. Учебник для вузов. – Изд. 3-е. – М.: НППА «Истек», 2009. – 504 с.

10. Shadrinov N. V., Borisova A. A. Thermophysical and Dynamic Properties of Nitrile Butadiene Rubber Filled with Ultra-High Molecular Weight Polyethylene // *Inorganic Materials. Applied Research.* – 2021. – V. 12, Is. 4. – P. 1112–1119. DOI: [10.1134/S2075113321040389](https://doi.org/10.1134/S2075113321040389)

11. Вольфсон С. И., Охотина Н. А., Нигматуллина А. И., Сабиров Р. К. Исследование упруго-гистерезисных характеристик динамических термоэластопластов // *Вестник Казанского технологического университета.* – 2012. – № 11(15). – С. 100–101.

12. Заикин А. Е., Бобров Г. Б. Влияние содержания акрилонитрила в бутадиен-нитрильном каучуке на свойства динамических термоэластопластов на его основе // *Вестник Казанского технологического университета.* – 2014. – № 16(17). – С. 105–109.

УДК 678.067.2:620.1791.16

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В 3D-ТКАНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ ОРТОГОНАЛЬНОГО ПЛЕТЕНИЯ

С. И. ЯКОВЛЕВА<sup>1</sup>, М. А. ДАЛИН <sup>1</sup>, О. А. КРУПНИНА<sup>1</sup>, В. А. КРУПЕННИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ», 105005, Москва, ул. Радио, 17.  
E-mail: [viam-dma@mail.ru](mailto:viam-dma@mail.ru)

<sup>2</sup>ПАО «ОДК-Сатурн», 152903, Россия, Ярославская обл., г. Рыбинск, пр. Ленина, 163

Поступила в редакцию 11.10.2022

После доработки 24.11.2022

Принята к публикации 25.11.2022

Рассмотрены особенности дефектов в 3D-тканых композиционных материалах. Предложен автоматизированный теневой ультразвуковой метод для проведения неразрушающего контроля. Для установления причин сильного затухания ультразвуковых волн в образце 3D-тканого композиционного материала ортогонального плетения применяли метод рентгеновской компьютерной томографии. Анализ обнаруженных дефектов показал, что на ослабление ультразвуковой волны может влиять величина проекции их суммарной площади на плоскость, перпендикулярную направлению ввода ультразвуковых колебаний.

**Ключевые слова:** автоматизированный теневой ультразвуковой контроль, 3D-тканый композиционный материал, дефект, пора, трещина, рентгеновская компьютерная томография

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-113-1-83-93

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии.* – 2015. – № 1. – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33

2. Каблов Е. Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России.* – М.: ВИАМ, 2015. – С. 458–464.

3. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность.* – 2014. – № 4. – С. 28–29.

4. Мурашов В. В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. – М.: Спектр, 2016. – 244 с.

5. Белинис П. Г., Донецкий К. И., Лукьяненко Ю. В., Рогожников В. Н., Майер Ю., Быстрикова Д. В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии.* – 2019. – № 4(57). – С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26

6. Донецкий К. И., Караваев Р. Ю., Раскутин А. Е., Дун В. А. Углепластик на основе объемно-армирующей триаксиальной плетеной преформы // *Труды ВИАМ.* – 2019. – № 1(73). – С. 55–63. <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63

7. Saeedifara M., Saleha M. N., El-Dessoukyb H. M., De Freitas S. T., Zarouhas D. Ultrasonic Impact Damage Assessment in 3D Woven Composite Materials, Damage assessment of NCF, 2D and 3D woven composites under compression after multiple-impact using acoustic emission // Composites Part A. – 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105833>

8. Saboktakin A. 3D textile preforms and composites for aircraft structures: a review. // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace. – 2019. – № 6(1). <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2019.1299>

9. Tayong R. B., Mienczakowski M. J., Smith R. A. 3D ultrasound characterization of woven composites // Cite as: AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1949. – P. 130008; <https://doi.org/10.1063/1.5031603>

10. Демидов А. А., Крупнина О. А., Михайлова Н. А., Косарина Е. И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // Труды ВИАМ. – 2021. – № 5(99). – С. 105–113. <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-2021-2017-0-5-105-113

11. Косарина Е. И., Крупнина О. А., Демидов А. А., Михайлова Н. А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 1. – С. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42

12. Бойчук А. С., Диков И. А., Чертищев В. Ю., Генералов А. С. Определение пористости монолитных зон деталей и агрегатов самолета, изготавливаемых из ПКМ, с применением ультразвукового эхоимпульсного метода // Дефектоскопия. – 2019. – № 1. – С. 3–9. DOI: 10.1134/S01303082190100019

13. Диков И. А., Бойчук А. С. Способы определения объемной доли пор в полимерных композиционных материалах с помощью ультразвуковых методов неразрушающего контроля // Труды ВИАМ. – 2017. – № 2(50). – С. 80–95. <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-10-10

14. Бойчук А. С., Диков И. А., Чертищев В. Ю., Генералов А. С. Оценка возможности определения пористости в углепластике ультразвуковым теньевым методом // Труды ВИАМ. – 2017. – № 7(55). – С. 11. <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-11-11

15. Бойчук А. С., Диков И. А., Чертищев В. Ю., Генералов А. С., Славин А. В. Влияние морфологии пор на ультразвуковой контроль пористости в углепластике эхо-импульсным методом // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 8. – С. 22–29. DOI: 10.14489/td.2018.08.pp.022-029

УДК 621. 891:[678.74+669.15–194]

## СПОСОБНОСТЬ ПОЛИМЕРОВ К САМОСМАЗЫВАНИЮ В МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАРАХ ТРЕНИЯ

Е. Б. СЕДАКОВА<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, ЛИ СЯНЬШУНЬ<sup>2</sup>, В. Е. ЖАРОВ<sup>2</sup>, А. Д. БРЕКИ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, А. О. ПОЗДНЯКОВ<sup>1,3</sup>, канд. физ.-мат. наук, А. А. СМИРНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН «Институт проблем машиноведения РАН», 199178, Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., 61. E-mail: [elenasedakova2006@yandex.ru](mailto:elenasedakova2006@yandex.ru)

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

<sup>3</sup> ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН», 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Поступила в редакцию 15.12.2022

После доработки 3.02.2023

Принята к публикации 6.02.2023

Приведены результаты сравнительных исследований износостойкости политетрафторэтилена (ПТФЭ), полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и полиамида 6 (ПА6) в парах трения со сталями марок 18X2H4МА, 08X18H10Т и 40X13. Способность к самосмазыванию полимеров определяли по величине контактного давления, соответствующего

верхней границе диапазона, в котором проявляется эффект стабилизации интенсивности линейного изнашивания, и по протяженности этого диапазона вдоль оси нагрузок. Для сравнения в качестве базовой использовали углеродистую сталь 45. Установлено, что в парах трения ПЭЭК, СВМПЭ и ПА6 со всеми исследуемыми легированными сталями наблюдается более высокая интенсивность линейного изнашивания при снижении способности к самосмазыванию. Однако в паре трения ПТФЭ – сталь 18Х2Н4МА с содержанием никеля в количестве около 4% наблюдается расширение диапазона стабилизации интенсивности линейного изнашивания. В парах трения ПТФЭ со сталью 40Х13, содержащей хром в значительном количестве (13%) при отсутствии никеля, и со сталью 18Х2Н4МА, содержащей и никель, и хром в количестве 10 и 18% соответственно, отмечаются наименьшие износостойкость и способность к самосмазыванию полимера. Определены температуры на трибоконтакте полимеров, соответствующие диапазонам нагрузок стабилизации износа в исследуемых парах трения.

**Ключевые слова:** трение, износ, политетрафторэтилен, полиэфирэфиркетон, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиамид 6, интенсивность линейного изнашивания, легированные стали, адгезионный механизм изнашивания, фрикционный нагрев

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-94-102

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Маленков М. И., Каратушин С. И., Тарасов В. М. Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2007. – 54 с.
2. Мышкин Н. К., Григорьев А. Я., Басинюк В. Л., Мардосевич Е. И., Ковалева И. Н., Кудрицкий В. Г. Космическая трибология: состояние и перспективы // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3–4 (20, 21). – С. 126–130.
3. Dascalescu D., Polychronopoulou K., Polycarpou A. A. The significance of tribochemistry on the performance of PTFE-based coatings in CO<sub>2</sub> refrigerant environment // Surface & Coatings Technology. – 2009. – V. 204, N 3. – P. 319–329.
4. Self-lubrication of PEEK polymer bearings in rolling contact fatigue under radial loads / H. Koike, K. Kida, E. C. Santos et al. // Tribology International. – 2007. – V. 39, N. 11. – P. 30–38.
5. Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z., Hilali M., Rafik M., Elharfi A. Polymer composite materials: a comprehensive review // Compos. Struct. – 2021. – V. 262. – Article 113640.
6. Yumashev A., Mikhaylov A. Development of polymer film coatings with high adhesion to steel alloys and high wear resistance // Polymer Composites. – 2020. – N 41(4). – P. 1–6.
7. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
8. Yemei Liu, Sujeet Kumar Sinha, Christina, Y. H. Lim, Keldren Xing Zheng Loy. Pre-Polishing the Metal Counterface of Metal – UHMWPE Wear Pair with Filler-Filled UHMWPE Composites to Generate Counterface Changes for an Effective Reduction in Pure UHMWPE Wear // Tribology Letters. – 2014. – V. 53, N 1. – P. 11–16.
9. Седакова Е. Б., Козырев Ю. П. Приложение эмпирического закона изнашивания к вопросам разработки композитов на основе политетрафторэтилена // Вопросы материаловедения. – 2012. – N. 4. – С. 217–222.
10. Дульнев Г. Н, Семяшкин Э. М. Теплообмен в электронных аппаратах. – Л.: Энергия, 1968. – 360 с.
11. Седакова Е. Б., Козырев Ю. П. Влияние теплопроводности сталей на предельные нагрузки при трении по полиамиду // Трение и износ. – 2021. – Т. 42, N. 4. – С. 469–477.
12. Козырев Ю. П., Седакова Е. Б. Применение термодинамической модели для анализа характеристик износостойкости материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – N 1. – С. 70–73.

**О КОРРЕЛЯЦИИ СТАТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ С ПАРАМЕТРАМИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И СТАНДАРТНЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

А. В. ИЛЬИН, д-р техн. наук, А. А. ЛАВРЕНТЬЕВ, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук,  
Е. В. ЗАБАВИЧЕВА, С. Н. ПЕТРОВ, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 25.11.2022

После доработки 4.02.2023

Принята к публикации 6.02.2023

Характеристики трещиностойкости листового проката высокопрочной среднелегированной стали с мартенситной или мартенситно-бейнитной структурой могут варьироваться в широких пределах в зависимости от особенностей их структурного состояния, определяемого, в свою очередь, конкретным химическим составом, режимами прокатки, закалки и отпуска. В предшествующих работах [1, 2] авторы исследовали металл различных опытных плавок, существенно различающийся по размерам структурных составляющих, разделенных большеугловыми границами (наследственное аустенитное зерно, пакеты мартенсита, бейнитные кристаллиты). Продолжением этих исследований является анализ связи трещиностойкости металла одной плавки и общего режима закалки, т. е. с одинаковыми параметрами структуры, сформированной при закалке, но с различными режимами отпуска. На основе полученных данных получен обобщенный параметр структурного состояния, коррелирующий с трещиностойкостью.

*Ключевые слова:* высокопрочная сталь, трещиностойкость, хрупкое разрушение, критерий разрушения, микроструктура

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-103-123

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Голосиенко С. А., Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Михайлов М. С., Мотовилина Г. Д., Петров С. Н., Садкин К. Е. Сопротивление хрупкому разрушению высокопрочной среднелегированной стали и его связь с параметрами структурного состояния // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 3(99). – С. 128–147.
2. Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Мизецкий А. В. О формулировке локального критерия хрупкого разрушения для прогнозирования трещиностойкости высокопрочной стали // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3(103). – С. 114–134.
3. Morris J. W., Jr. On the Ductile-Brittle Transition in Lath Martensitic Steel // ISIJ International. – 2011. – V. 51(10). – P. 1569–1575.
4. Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Высокопрочные свариваемые улучшаемые стали. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 212 с.
5. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Семичева Т. Г., Шерохина Л. Г. Превращение дислокационного мартенсита при отпуске вторичнотвердеющей стали // МиТОМ. – 1999. – № 3. – С. 13–19.
6. Аксаков И. С., Анисимов А. В., Антипов В. С. и др. Материалы для судостроения и морской техники: Справ. Т. 1. / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2009. – 776 с.
7. Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении / Под ред. А. Шварца, М. Кумара, Б. Адамса, Д. Филда. – М.: Техносфера, 2014. – С. 376–393.
8. Петров С. Н., Пташник А. В. Экспресс-метод определения границ бывшего аустенитного зерна в сталях бейнитно-мартенситного класса по локальным ориентировкам превращенной структуры // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2019. – № 5. – С. 5–12.

9. Рыбин В. В., Рубцов А. С., Нестерова Е. В. Метод одиночных рефлексов (ОР) и его применение для электронномикроскопического анализа дисперсных фаз // Заводская лаборатория. – 1982. – № 5. – С. 21–26.

10. Методика анализа фазового состава конструкционных наноматериалов методом рентгеновской дифрактометрии, свидетельство об аттестации № 01.00225/206-03-2011 от 20.05.2011 г., регистрационный код ФР.1.31.2011.10209.

11. Effect of microstructure on the impact toughness transition temperature of direct quenched steels / A. S. Pallaspuuro, A. Kajjalainen, S. Mehtonen, a. e. // Materials Science & Engineering A. – 2018. – January. – V. 712. – P. 671–680.

12. Копельман Л. А. Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

УДК 621.039.531:669.245:620.17

## **ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫДЕРЖЕК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СПЛАВА 42ХНМ ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ В СОСТАВЕ ВВЭР-1000. Часть 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ**

Б. А. ГУРОВИЧ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. С. ФРОЛОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Е. А. КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, И. В. ФЕДОТОВ<sup>1</sup>

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

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

Поступила в редакцию 26.10.2022

После доработки 12.12.2022

Принята к публикации 12.01.2023

Представлены результаты механических испытаний кольцевых образцов из сплава 42ХНМ после облучения в составе системы управления и защиты реактора ВВЭР-1000 до повреждающей дозы ~12 сна при температуре ~350°C и последующих изотермических отжигов в интервале температур 400–1150°C (нагрев и выдержка по ~2 ч). На основе результатов механических испытаний методом конечных элементов построена и валидирована модель, описывающая механические характеристики облученных и необлученных образцов из сплава 42ХНМ при испытаниях в интервале температур от 500 до 1000°C. Модель была использована для построения температурных зависимостей максимальной локальной пластической деформации и предела текучести исследуемого материала.

**Ключевые слова:** реактор ВВЭР-100, кольцевые образцы, облучение, механические испытания, метод конечных элементов, пластическая деформация, предел текучести

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-134-149

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Gurovich B. A., Frolov A. S., Kuleshova E. A., Maltsev D. A., Safonov D. V. Microstructural evolution of the 42XNM alloy during a severe accident (LOCA) // J. Nucl. Mater. – 2022. – V. 561. – P. 153535.

2. Ward J. T., Witter J. K., Angeliu T. M. Assessing the effects of radiation damage on Ni-base alloys for the prometheus space reactor system // J. Nucl. Mater. – 2007. – V. 366, N 1–2. – P. 223–237.

3. Solonin M. I., Alekseev A. B., Kazennov Y. I., Khramtsov V. F., Kondrat'ev V. P., Krasina T. A., Rechitsky V. N., Stepankov V. N., Votinov S. N. XHM-1 alloy as a promising structural material for water-cooled fusion reactor components // J. Nucl. Mater. – 1996. – V. 233–237, Part 1. – P. 586–591.

4. Cr–Ni alloys for fusion reactors / M. I. Solonin et al. // J. Nucl. Mater. – 1998. – V. 258–263, Part 2. – P. 1762–1766.

© 2023

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

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

5. Gurovich B. A., Frolov A. S., Fedotov I. V. Improved evaluation of ring tensile test ductility applied to neutron irradiated 42XNM tubes in the temperature range of (500–1100)°C // Nucl. Eng. Techno. – 2020. – V. 52, N 6. – P. 1213–1221.
6. Gurovich B. A., Frolov A. S., Kuleshova E. A., Maltsev D. A., Safonov D. V., Fedotova S. V., Kochkin V. N., Panferov P. P. Structural evolution features of the 42XNM alloy during neutron irradiation under VVER conditions // J. Nucl. Mater. – 2021. – V. 543. – P. 152557.
7. Razumovskiy V. I., Lozovoi A. Y., Razumovskii I. M. First-principles-aided design of a new Ni-base superalloy: Influence of transition metal alloying elements on grain boundary and bulk cohesion // Acta Mater. Acta Materialia Inc. – 2015. – V. 82. – P. 369–377.
8. Frolov A. S., Fedotov I. V., Gurovich B. A. Evaluation of the true-strength characteristics for isotropic materials using ring tensile test // Nucl. Eng. Technol. – 2021. – V. 53, N 7. – P. 2323–2333..
9. Kleemola H. J., Nieminen M. A. On the strain-hardening parameters of metals // Metall. Trans. – 1974. – V. 5. – P. 1863–1866.
10. Walley S. M. The Effect of Temperature Gradients on Elastic Wave Propagation in Split Hopkinson Pressure Bars // J. Dyn. Behav. Mater. Springer International Publishing. – 2020. – V. 6, N 3. – P. 278–286.
11. Barsoum I., Al Ali K. F. Development of a method to determine the transverse stress-strain behaviour of pipes // Procedia Eng. – 2015. – V. 130. – P. 1319–1326.
12. Nindiyasari F., Pierick P., Boomstra D., Pandit A. Ring tensile test of reference zircaloy cladding tube as a proof of principle for hotcell setup // TopFuel-2018 Conf., Prague, Czech Republic, September 30 – October 4, 2018.
13. Campitelli E. Assessment of mechanical properties in unirradiated and irradiated zircaloys and steels with non-standard tests and finite element calculations // Thesis N 3304. EPFL, Lausanne, 2005.

УДК 621.039.531:669.245:620.18

**ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫДЕРЖЕК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СПЛАВА 42ХНМ ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ В СОСТАВЕ ВВЭР-1000. Часть 2. СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Б. А. ГУРОВИЧ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. С. ФРОЛОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Е. А. КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, Д. А. МАЛЬЦЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, И. В. ФЕДOTOV<sup>1</sup>,  
Д. В. САФОНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук

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

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

Поступила в редакцию 12.12.2022

После доработки 11.01.2023

Принята к публикации 20.01.2023

Представлены результаты структурных исследований образцов из сплава 42ХНМ после облучения в составе СУЗ ВВЭР-1000 до повреждающей дозы ~12 сна при температуре ~350°С и последующих изотермических отжигов в интервале температур ~400–1150°С при продолжительности нагрева и выдержки ~2 ч. Показано, что в процессе длительных изотермических отжигов наблюдается изменение фазового состава сплава, происходит отжиг дислокационных структур и зернограничных сегрегаций, а также эволюция пористости. Подтверждено, что причинами снижения пластических свойств сплава 42ХНМ после облучения и последующих изотермических отжигов в интервале температур 400–1000°С являются образование выделений вторых фаз (зон прерывистого распада твердого раствора с выделением частиц α-Cr по границам зерен) и пор на границах зерен.

**Ключевые слова:** реактор ВВЭР-100, кольцевые образцы, облучение, механические испытания, модель конечных элементов, пластическая деформация, предел текучести

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-150-173

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mukherji D., Rösler J., Strunz P., Gilles R., Schumacher G., Piegert S. Beyond Ni-based superalloys: Development of CoRe-based alloys for gas turbine applications at very high temperatures // *Int. J. Mater. Res.* – 2011. – V. 102, N 9. – P. 1125–1132.
2. Backman D. G., Williams J. C. Advanced Materials for Aircraft Engine Applications // *Science.* – 1992. – V. 255, N 5048. – P. 1082–1087.
3. Kear B. H., Thompson E. R. Aircraft Gas Turbine Materials and Processes // *Science.* – 1980. – V. 208, N 4446. – P. 847–856.
4. Pollock T. M., Tin S. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties // *J. Propuls. Power.* – 2006. – V. 22, N 2. – P. 361–374.
5. Rowcliffe A. F., Mansur L. K., Hoelzer D. T., Nanstad R. K. Perspectives on radiation effects in nickel-base alloys for applications in advanced reactors // *J. Nucl. Mater.* – 2009. – V. 392, N 2. – P. 341–352.
6. Stophor M. A. The effects of neutron radiation on nickel-based alloys // *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom).* – 2017. – V. 33, N 5. – P. 518–536.
7. Solonin M., et al. Cr–Ni alloys for fusion reactors // *J. Nucl. Mater.* – 1998. – V. 258–263. – P. 1762–1766.
8. Solonin M. I., Alekseev A. B., Kazennov Y. I., Khrantsov V. F., Kondratev V. P., Krasina T. A., Rechitsky V. N., Stepanov V. N., Votinov S. N. XHM-1 alloy as a promising structural material for water-cooled fusion reactor components // *J. Nucl. Mater.* – 1996. – V. 233–237, Part 1. – P. 586–591.
9. Solonin M. I. Radiation-Resistant Alloys of the Nickel-Chromium System // *Met. Sci. Heat Treat.* – 2005. – V. 47, N 7–8. – P. 328–332.
10. Vatulin A. V., Kondratev V. P., Rechitskii V. N., Solonin M. I. Corrosion and radiation resistance of “Bochvaloy” nickel-chromium alloy // *Met. Sci. Heat Treat.* – 2004. – V. 46, N 11–12. – P. 469–473.
11. De los Reyes M., Edwards L., Kirk M. A., Bhattacharyya D., Lu K. T., Lumpkin G. R. Microstructural Evolution of an Ion Irradiated Ni–Mo–Cr–Fe Alloy at Elevated Temperatures // *Mater. Trans.* – 2014. – V. 55, N 3. – P. 428–433.
12. Le Brun C. Molten salts and nuclear energy production // *J. Nucl. Mater.* – 2007. – V. 360, N 1. – P. 1–5.
13. Delpech S., Cabet C., Slim C., Picard G. S. Molten fluorides for nuclear applications // *Mater. Today.* – 2010. – V. 13, N 12. – P. 34–41.
14. Angeliu T., Ward J., Witter J. Assessing the Effects of Radiation Damage on Ni-base Alloys for the Prometheus Space Reactor System. – Niskayuna, NY, 2006.
15. Gurovich B. A., Frolov A. S., Kuleshova E. A., Maltsev D. A., Safonov D. V., Fedotova S. V., Kochkin V. N., Panferov P. P. Structural evolution features of the 42XNM alloy during neutron irradiation under VVER conditions // *J. Nucl. Mater.* – 2021. – V. 543. – P. 152557.
16. Gurovich B. A., Frolov A. S., Kuleshova E. A., Maltsev D. A., Safonov D. V. Microstructural evolution of the 42XNM alloy during a severe accident (LOCA) // *J. Nucl. Mater.* – 2022. – V. 561. – P. 153535.
17. Kuleshova E. A., Fedotova S. V., Gurovich B. A., Frolov A. S., Maltsev D. A., Stepanov N. V., Margolin B. Z., Minkin A. J., Sorokin A. A. Microstructure degradation of austenitic stainless steels after 45 years of operation as VVER-440 reactor internals // *J. Nucl. Mater.* – 2020. – V. 533. – P. 152124.
18. Gurovich B. A., Frolov A. S., Fedotov I. V. Improved evaluation of ring tensile test ductility applied to neutron irradiated 42XNM tubes in the temperature range of 500–1100°C // *Nucl. Eng. Technol.* – 2020. – V. 52, N 6. – P. 1213–1221.
19. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 273 с.
20. Deutsche Gesellschaft für Metallkunde. Zeitschrift für Metallkunde. – Riederer-Verlag, 1948.

21. Maziasz P. J. Overview of microstructural evolution in neutron-irradiated austenitic stainless steels // *J. Nucl. Mater.* – 1993. – V. 205. – P. 118–145.
22. Ayanoglu M., Motta A. T. Microstructural evolution of the 21Cr32Ni model alloy under irradiation // *J. Nucl. Mater. Elsevier B.V.* – 2018. – V. 510. – P. 297–311.
23. Yang Y., Yiren C., Yina H., Todd A., Appajosula R. Irradiation Microstructure of Austenitic Steels and Cast Steels Irradiated in the BOR-60 Reactor at 320°C // 15th Int. Conf. Environ. Degrad. Mater. Nucl. Power Syst. React. John Wiley & Sons, Inc., 2012. – P. 2447–2450.
24. Ken H., Yao Z., Morin G., Griffiths M. TEM characterization of in-reactor neutron irradiated CANDU spacer material Inconel X-750 // *J. Nucl. Mater. Elsevier B.V.* – 2014. – V. 451, N 1–3. – P. 88–96.
25. 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. Mater.* – 2008. – V. 376, N 2. – P. 169–173.
26. Kato T., Takahashi H., Izumiya M. Grain boundary segregation under electron irradiation in austenitic stainless steels modified with oversized elements // *J. Nucl. Mater.* – 1992. – V. 189, N 2. – P. 167–174.
27. Was G. S., Bruemmer S. M. Effects of irradiation on intergranular stress corrosion cracking // *J. Nucl. Mater.* – 1994. – V. 216. – P. 326–347.
28. Kenik E. A., Inazumi T., Bell G. E. C. Radiation-induced grain boundary segregation and sensitization of a neutron-irradiated austenitic stainless steel // *J. Nucl. Mater.* – 1991. – V. 183, N 3. – P. 145–153.
29. Duh T., Kai J., Chen F. Effects of grain boundary misorientation on solute segregation in thermally sensitized and proton-irradiated 304 stainless steel // *J. Nucl. Mater.* – 2000. – V. 283–287. – P. 198–204.
30. Renault A.-E., Pokor C., Garnier J., Malaplate J. Microstructure and Grain Boundary Chemistry Evolution in Austenitic Stainless Steels Irradiated in the BOR-60 Reactor up to 120 Dpa // 14th, Int. Conf. Environ. Degrad. Mater. Nucl. power Syst. water React. Virginia Beach, VA. – 2009. – P. 1324–1334.
31. Jensen R. R., Tien J. K. Temperature and strain rate dependence of stress-strain behavior in a nickel-base superalloy // *Metall. Trans. A.* – 1985. – V. 16, N 6. – P. 1049–1068.
32. Kim I. S., Choi B. G., Seo S. M., Kim D. H., Jo C. Y. Influence of heat treatment on microstructure and tensile properties of conventionally cast and directionally solidified superalloy CM247LC // *Mater. Lett.* – 2008. – V. 62, N 6–7. – P. 1110–1113.
33. Kim I. S., Choi B. G., Seo S. M., Jo C. Y. Mechanical Behavior of As-Cast and High Temperature Exposed Ni-Base Superalloy B1900 // *Mater. Sci. Forum.* – 2004. – V. 449–452. – P. 541–544.
34. Zheng L., Schmitz G., Meng Y., Chellali R., Schlesiger R. Mechanism of Intermediate Temperature Embrittlement of Ni and Ni-based Superalloys // *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* – 2012. – V. 37, N 3. – P. 181–214.
35. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. – М.: Машиностроение, 1996–2000.
36. Gurovich B. A., Frolov A. S., Maltsev D. A., Kuleshova E. A., Fedotova S. V. Phase transformations in irradiated 42CrNiMo alloy after annealing at elevated temperatures, and also after rapid annealing, simulating the maximum design basis accident [in Russian] // *Proc. 11-th Conf. React. Mater. Sci. Russ. Dimitrovgrad.* – 2019.

УДК:621.039.536.2:621.791.053.42

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ КОРПУСА ВВЭР

Е. В. ЮРЧЕНКО, канд. техн. наук, М. Н. ТИМОФЕЕВ, канд. техн. наук,  
Б. З. МАРГОЛИН, д-р 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 25.01.2023

После доработки 8.02.2023

Принята к публикации 9.02.2023

Представлены результаты исследования механических свойств и сопротивления хрупкому разрушению (СХР) металла сварного шва корпуса ВВЭР, выполненного современными сварочными материалами с использованием сварочной проволоки Св-15ХГМТА и керамического флюса 48АФ-71. Механические свойства исследованы посредством испытаний образцов на растяжение, а СХР – посредством испытаний образцов на ударный изгиб и на трещиностойкость. Анизотропия механических свойств и СХР исследованы при испытаниях указанных образцов, ориентированных в двух направлениях: в первом случае поверхность разрушения перпендикулярна оси сварного шва, во втором – параллельна. Показано, что металл шва, выполненного по данной технологии не имеет анизотропии как по механическим свойствам, так и по СХР. Предложено объяснение разброса СХР на основании результатов проведенных металлографических исследований. Полученные экспериментально прочностные и пластические характеристики сварного шва, выполненного современными сварочными материалами, позволяют заключить, что для исследовательских работ из соображений экономии материала для испытаний на растяжение можно применять цилиндрические пятикратные образцы диаметром 3 мм, имеющие поперечную ориентацию относительно оси шва, а вместо образцов диаметром 6 мм и более продольной ориентации, при этом масштабным фактором можно пренебречь. Установлена корреляционная зависимость между значениями референсной температуры  $T_0$ , определенной по методу Master Curve, и референсной температуры  $T_{100}$ , определенной по методу Advanced Unified Curve, и значением критической температуры хрупкости  $T_{K0}$  для исследуемого металла шва в исходном состоянии.

*Ключевые слова:* металл сварных швов, современные сварочные материалы, сопротивление хрупкому разрушению, механические свойства, анизотропия свойств, масштабный фактор, корреляционная зависимость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2023-113-1-174-188

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Национальный стандарт Российской Федерации. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора. ГОСТ Р 59115.14–2021. – М., 2021.
2. ASTM E 1921-10<sup>e1</sup>. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range // Annual Book of ASTM Standards. – 2010. – V. 03.01.
3. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Nikolaev V. A., Ryadkov L. N. A new engineering method for prediction of the fracture toughness temperature dependence for RPV steels // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – N 80. – 2003. – P. 817–829.
4. 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 // Eng. Fract. Mech. – 2018. – N 191. – P. 383–402.
5. Национальный стандарт Российской Федерации Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. ГОСТ Р 59115.6-2021.
6. Comparison of Irradiation-Induced Shifts of  $K_{Jc}$  and Charpy Impact Toughness for Reactor Pressure Vessel Steels. NUREG/CR-6609 U.S. Nuclear Regulatory Commission FIEN Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001. Oak Ridge National Laboratory.
7. Юрченко Е. В. Исследование и прогнозирование радиационного и теплового охрупчивания материалов эксплуатируемых и перспективных корпусов реакторов ВВЭР // Дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2015.
8. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭГ-7-002-86) / Госатомнадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
9. Национальный стандарт Российской Федерации. Материалы оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения ударной вязкости и критической температуры хрупкости по результатам испытаний на ударный изгиб. ГОСТ Р 70431–2022. – М., 2022.

10. 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 // Eng. Fract. Mech. – 2018. – N 191. – P. 383–402.
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. 9–13.
12. ГОСТ Р 50.05.12–2018. Межгосударственный стандарт. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.
13. AWS B4.0:2016. Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, by American Welding Society, 2016.
14. ГОСТ Р 50.05.12–2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Контроль радиационного охрупчивания корпуса реактора атомной станции.
15. 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.
16. ASTM E399–90. Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.