

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

- Костина М. В., Блинов В. М., Калинин Г. Ю., Фомина О. В., Мушникова С. Ю.* Высокопрочная аустенитная Mn–Ni–Cu–V–C дисперсионно-твердеющая сталь..... 7
- Фомина О. В., Зисман А. А., Вихарева Т. В.* Исследование механизмов формирования зародыша рекристаллизации в аустенитной азотсодержащей стали в процессе ВТМО..... 23
- Коротковская С. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И., Анисимов Д. М.* Формирование аустенита в ферритно-бейнитных, бейнитно-мартенситных и мартенситных судостроительных сталях и его влияние на превращенную структуру..... 37
- Цуканов В. В., Смирнова Д. Л., Ефимов С. В.* Научно-методические основы выбора режимов накопления и предварительной термической обработки при производстве поковок из среднеуглеродистых среднелегированных сталей..... 49
- Чезуров М. К., Чезрова М. Н., Горшунов М. Г., Бердник О. Б.* Оценка влияния структурного состояния на механические свойства стали 14X17H2..... 65
- Крюков Р. Е., Козырев Н. А., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Шлярова Ю. А.* Структурно-фазовое состояние и дефектная субструктура сварных швов из низкоуглеродистой стали ..... 74
- Висик Е. М., Рассохина Л. И., Ечин А. Б., Гамазина М. В.* О некоторых аспектах повышения качества литых турбинных лопаток ГТД из жаропрочных никелевых сплавов ..... 82

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Царева И. Н., Кривина Л. А., Бердник О. Б., Разов Е. Н.* Плазменное защитное керамическое покрытие системы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Ni из плакированной порошковой смеси ..... 99
- Герашенкова Е. Ю., Бобкова Т. И., Герашенков Д. А., Быстров Р. Ю., Макаров А. М., Фармаковский Б. В.* Получение защитных покрытий на основе композиции NbCo<sub>2</sub>–Zr–WC..... 108
- Царева И. Н., Кривина Л. А., Бердник О. Б., Разов Е. Н.* Исследование высокотемпературного поведения теплозащитного покрытия диоксида циркония методом лазерного нагрева..... 115
- Майоров Д. В., Колкова Е. К.* Влияние поверхностного натяжения внутривещной жидкости на физико-химические свойства слоистых двойных гидроксидов магния и алюминия, полученных методом твердофазного синтеза ..... 128
- Герашенков Д. А., Быстров Р. Ю., Кузнецов П. А., Герашенкова Е. Ю., Макаров А. М., Маркова Ю. М., Анисимов А. В.* Получение высоколегированного никелем слоя на поверхности низкоуглеродистой стали с использованием монометаллических порошков и лазерной обработки ..... 138

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Лебедев В. Л., Косильников В. Ю., Серый П. В., Трошкин С. Н., Анисимов А. В.* Прогнозирование гидростатической прочности сферопластиков ..... 149
- Курносоев А. О., Вавилова М. И., Гуляев И. Н., Ахмадиева К. Р.* Безрастворная технология изготовления препрега на основе высокотемпературного порошкового фталонитрильного связующего ..... 165

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

- Филин В. Ю., Мизецкий А. В., Виноградов О. П., Садкин К. Е., Назарова Е. Д., Порошков А. В., Пышкин Д. А.* Расчетные оценки эффективности мероприятий для обеспечения равномерного роста усталостной трещины при испытании на трещиностойкость образцов полной толщины .. 179
- Сухов Д. И., Ходинев И. А., Монин С. А., Рыжков П. В.* Высокотемпературная малоцикловая усталость жаропрочного сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta, полученного с помощью аддитивных технологических процессов..... 189

**РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

- Ерак Д. Ю., Чернобаева А. А., Медведев К. И., Журко Д. А., Кочкин В. Н., Скундин М. А., Бубякин, С. А. Паль Н. В., Решетников А. А.* Исследование металла необлучаемого сварного шва корпуса реактора ВВЭР-440 после эксплуатации в течение 45 лет ..... 202

Воскобойников Р. Е. Исследование первичного дефектообразования в каскадах смещений в титане ..... 216

Неустроев В. С., Маркелов Д. Е., Обухов А. В., Марголин Б. З., Пирогова Н. Е. Исследование микроструктуры основного металла и металла сварного шва стали 08X18H10T после низкотемпературного облучения в реакторе БОР-60 в интервале повреждающих доз от 40 до 100 смещений на атом ..... 233

#### **ХРОНИКА**

Академик РАН Олег Александрович Банных (к 90-летию со дня рождения)..... 244

Академик РАН Николай Тимофеевич Кузнецов (к 90-летию со дня рождения)..... 247

Академик РАН Константин Всеволодович Григорович (к 70-летию со дня рождения)..... 250

**Перечень статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вопросы материаловедения» в 2021 году..... 252**

**Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов ..... 256**

УДК 669.15–194.56:539.4

### **ВЫСОКОПРОЧНАЯ АУСТЕНИТНАЯ Mn–Ni–Cu–V–C ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩАЯ СТАЛЬ**

М. В. КОСТИНА<sup>1</sup>, д-р техн. наук, В. М. БЛИНОВ<sup>1</sup>, Г. Ю. КАЛИНИН<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
О. В. ФОМИНА<sup>2</sup>, д-р техн. наук, С. Ю. МУШНИКОВА<sup>2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)», 119334, Москва, Ленинский пр., 49

<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 11.10.2021

После доработки 8.11.2021

Принята к публикации 10.11.2021

Представлены результаты исследования структуры и механических свойств высокопрочной аустенитной бесхромистой дисперсионно-твердеющей Mn–Ni–V–C стали с пределом текучести не менее 700 МПа, состав которой и способ упрочнения были выбраны с учетом того, что сталь должна удовлетворять требованиям высокой прочности и немагнитности и обладать величиной электродного потенциала в хлоридных средах, обеспечивающей исключение гальванической коррозии при контакте с ферромагнитными низколегированными и углеродистыми сталями. Показано, что при введении в сталь Mn–Ni–V–C 1–2%Cu на фазовой диаграмме Fe–Ni–Mn расширяется область существования  $\gamma$ -фазы, сужается двухфазная  $\gamma+\alpha$ -область и сдвигается в сторону меньших содержаний Mn, повышая стабильность аустенита к мартенситному превращению при холодной деформации. Предложена численная оценка влияния легирующих аустенитообразующих элементов Ni, Mn, Cu на критическую степень холодной пластической деформации, приводящей к образованию в стали мартенсита деформации. Установлен температурный интервал обратного превращения данного мартенсита в аустенит при отжиге в зависимости от содержания никеля в стали. Для дисперсионно-твердеющей стали состава 10%Mn; 10%Ni; 2%Cu; 0,3–0,4%C; ~1,4%V изучены закономерности растворения при нагреве под закалку и выделения при старении частиц упрочняющей карбидной фазы VC. Показано, что максимальная прочность обеспечивается после закалки от 1150°C и старения при 650°C, 15 ч. С увеличением длительности старения от 0,7 до 10 ч циклическая долговечность стали возрастает, но старение на прочность, близкую к максимальной, приводит к снижению этого показателя. С учетом проведенных исследований стабильности аустенита, статической и циклической прочности и долговечности обоснован оптимальный интервал легирования стали никелем, марганцем и медью и выявлен оптимальный режим термической обработки, обеспечивающий сочетание высокой прочности с хорошей пластичностью и вязкостью стали.

**Ключевые слова:** сталь, аустенит, стабильность, мартенсит деформации, ферромагнитность, дисперсионное твердение, карбиды, прочность, вязкость разрушения, долговечность

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-07-22

© 2021

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2052532. Нержавеющая сталь / О. А. Банных, О. Г. Соколов, Н. П. Лякишев, В. М. Блинов, М. В. Костина и др. – Зарегистрирован в Госреестре изобретений 20.01.96.
2. Банных О. А., Блинов В. М.. Дисперсионно-твердеющие немагнитные ванадийсодержащие стали. – М.: Наука, 1980. – 190 с.
3. Костина М. В. Разработка высокопрочных немагнитных Mn–Ni–Cu–V–(Mo)–С сталей, коррозионно-совместимых с низколегированными и углеродистыми сталями // Дис. ... канд. техн. наук. – М.: ИМЕТРАН, 1993. – 152 с.
4. Банных О. А., Блинов В. М., Костина М. В. Влияние никеля, марганца и меди на стабильность бесхромистого аустенита при холодной пластической деформации // *Металлы*. – 1995. – № 2. – С. 62–66.
5. Банных О. А., Блинов В. М., Костина М. В. О влиянии меди и никеля на прочность и вязкость стареющих сталей // *Металлы*. – 1993. – № 1. – С. 67–72.
6. Немировский Ю. Р., Кибальник В. Д., Хадыев М. С., Немировский М. Р., Банных О. А., Блинов В. М., Костина М. В. Исследование процессов старения в стали 40Г10Н10Ф, легированной медью // *ФММ*. – V. 79, вып. 5. – 1995. – С. 111–121.
7. Smallman R. E., Ngan A. H. W. *Precipitation Hardening. Chapter 13: Modern Physical Metallurgy (Eighth Edition)*, 2014. – P. 499–527.
8. Sourmail T. *Precipitation in Creep Resistant Austenitic Stainless Steels // Materials Science and Technology*. – 2001. – January. – 2001. – V. 17(1). – P. 1–14. DOI:10.1179/026708301101508972
9. Raman L., Gothandapani K., Murty B. S. *Austenitic oxide dispersion strengthened steels: A review // Defence Science Journal*. – 2016. – V. 66, N 4, July. – P. 316–322. DOI: 10.14429/dsj.66.10205-2016, DESIDOC.
10. Kumar S. S., Sandeep E. S., Chandrasekhar S. B., Karak S. K. *Development of nano-oxide dispersed 304L steels by mechanical milling and conventional sintering // Articles Mater. Res.* – 2016. – V. 19 (1) Jan–Feb. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0593>.
11. *Dispersion strengthening of austenitic manganese alloy by using the aluminum oxide nano-powder and vanadium / A. Oakley, M. Ratisvili, B. Margiev a. e. // Materials science (S36), Georgian Engineering News (GEN)*. – 2008. – N 1. – P. 52–55.
12. Solenthaler Ch., Ramesh M., Uggowitzer P. J., Spolenak R. *Precipitation strengthening of Nb-stabilized TP347 austenitic steel by a dispersion of secondary Nb (C, N) formed upon a short-term hardening heat treatment // Materials Science and Engineering A*. – 2015. – N 647. – P. 294–302. DOI: 10.1016/j.msea.2015.09.028.
13. Kaputkina L. M., Svyazhin A. G., Bronz A. V., Smarygina I. V., Bazhenov V. E., Kindop V. E. *Hardening of austenitic steels with high Mn and Al content // Materials science. Non-equilibrium phase transformations*. – 2015. – N 1. – P. 22–24.
14. *Precipitation strengthening in high manganese austenitic TWIP steels / C. P. Scott, B. R. Jean-Louis Collet a. e. // International Journal of Materials Research (formerly Zeitschrift für Metallkunde)*. – 2011. – V. 102(5). – P. 538–549. DOI: 10.3139/146.110508
15. Iker M., Gaude-Fugarolas D., Jacques P. J., Delannay F. *Improvement of the Mechanical Properties of High Manganese Steels by Combination of Precipitation Hardening and Mechanical Twinning // Advanced Materials Research*. – 2007. – V. 15–17. – P. 852–857. [https://www.researchgate.net/publication/200677375\\_Improvement\\_of\\_the\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_High\\_Manganese\\_Steels\\_by\\_Combination\\_of\\_Precipitation\\_Hardening\\_and\\_Mechanical\\_Twinning#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/200677375_Improvement_of_the_Mechanical_Properties_of_High_Manganese_Steels_by_Combination_of_Precipitation_Hardening_and_Mechanical_Twinning#fullTextFileContent)
16. Farooq M. *Strengthening and degradation mechanisms in austenitic stainless steels at elevated temperature. Doctoral Thesis. Stockholm 2013* – <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:621120/FULLTEXT01.pdf>
17. Косицына И. И., Сагарадзе В. В. *Высокопрочные аустенитные стали с карбидным упрочнением*. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 178 с.
18. Сагарадзе В. В., Уваров А. И. *Упрочнение и свойства аустенитных сталей*. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. – 720 с.

19. Приданцев М. В., Талов Н. П., Левин Ф. Л. Высокопрочные аустенитные стали. – М.: Металлургия, 1969. – 248 с.

УДК 669.15'786–194.56:621.789:620.186.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАРОДЫША РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В АУСТЕНИТНОЙ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ВТМО

О. В. ФОМИНА, д-р техн. наук, А. А. ЗИСМАН, д-р физ.-мат. наук, Т. В. ВИХАРЕВА, 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 4.06.2021

После доработки 23.07.2021

Принята к публикации 27.07.2021

Представлены результаты исследования структуры высокопрочной коррозионно-стойкой аустенитной азотсодержащей стали, формирующейся в результате горячей деформации. Установлено, что в зависимости от температуры, степени и скорости деформации происходит смена механизма образования зародышей динамической рекристаллизации. При температуре выше 1100°C зародыши формируются за счет выгибания и последующей миграции границ зерен, однако при снижении температуры и увеличении степени и скорости деформации очагами рекристаллизации становятся субзерна вблизи исходных границ.

*Ключевые слова:* азотсодержащая аустенитная сталь, EBSD-анализ, структура, динамическая рекристаллизация, горячая деформация, зародыш рекристаллизации

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-23-36

### ЛИТЕРАТУРА

1. Малышевский В. А., Цуканов В. В., Калинин Г. Ю., Фомина О. В. Современные маломагнитные стали для судостроения // Судостроение. – 2009. – № 5. – С. 19–21.
2. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю., Малахов Н. В., Ямпольский В. Д. Создание перспективных принципиально новых коррозионно-стойких корпусных сталей, легированных азотом // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2 (45). – С. 40–54.
3. Горынин И. В., Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю., Банных О. А., Блинов В. М., Костина М. В. Коррозионно-стойкие высокопрочные азотистые стали // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3 (59). – С. 7–16.
4. Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Тепленичева А. С., Фомина О. В., Мушникова С. Ю., Харьков А. А. Высокопрочные аустенитные свариваемые стали для судостроения // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 26–35.
5. Коджаспиров Г. Е., Рудской А. И., Рыбин В. В. Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий пластическим деформированием. – СПб.: Наука, 2006. – 350 с.
6. Вихарева Т. В., Фомина О. В., Калинин Г. Ю., Грибанова В. Б. Исследование динамической и статической рекристаллизации в аустенитной азотсодержащей стали в процессе ВТМО // Металлург. – 2016. – № 3. – С. 60–65.
7. Фомина О. В. Формирование структуры высокопрочной азотсодержащей стали в процессе горячей деформации // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 3. – С. 216–222.
8. Фомина О. В., Вихарева Т. В., Сагарадзе В. В., Катаева Н. В. Формирование структуры азотсодержащей аустенитной стали 04X20H6Г11M2АФБ при горячей деформации. Часть I: Влияние температуры и скорости деформации на процесс динамической рекристаллизации // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 2 (94). – С. 7–21.
9. Фомина О. В., Вихарева Т. В. Формирование структуры азотсодержащей аустенитной стали 04X20H6Г11M2АФБ при горячей деформации. Часть II: Влияние фазового состава и условий горячей деформации на процесс динамической рекристаллизации // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 2 (94). – С. 22–29.

10. Фомина О. В., Вихарева Т. В., Маркова Ю. М., Грибанова В. Б. Особенности формирования структуры азотсодержащей стали в процессе высокотемпературной термомеханической обработки // *Материаловедение*. – 2018. – № 9. – С. 3–11
11. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
12. Кондратьев Н. С., Трусов П. В. Механизмы образования зародышей рекристаллизации в металлах при термомеханической обработке // *Вестник ПНИПУ. – Механика*. – 2016. – № 4. – С. 151–174.
13. Коджаспиров Г. Е., Сулягин Р. В., Карьялайнен Л. П. Влияние температурно-деформационных условий на упрочнение и разупрочнение азотсодержащих коррозионно-стойких сталей // *Металловедение и термическая обработка*. – 2005. – № 11(605). – С. 22–26.
14. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
15. Humphreys F. J., Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena. – Elsevier, 2004. – 574 p.
16. Sakai T.A., 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.
17. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
18. Беляков А. Н. Изменение зеренной структуры в металлических материалах в результате пластической обработки // *Физика металлов и материаловедение*. – 2009. – Т. 108, № 4. – С. 412–423.
19. Doherty R. D., Hughes D. A., Humphreys F. J., Jonas J. J., Jensen D. J., Kassner M. E., King W. E., McNeley T. R., McQueen H. J., Rollett A. D. Current issues in recrystallization: a review // *Materials Science and Engineering A*. – 1997. – V. 238. – P. 219–274.
20. Dehghan-Manshadi A., Barnett M. R., Hodgson P. D. Hot deformation and recrystallization of austenitic stainless steel. Part I: Dynamic recrystallization // *Metallurgical and materials transactions A*. – 2008. – V. 39 A. – P. 1359–1370.
21. Ponge D., Gottstein G. Necklace formation during dynamic recrystallization: mechanisms and impact on flow behavior // *Acta materialia*. – 1998. – V. 46, N 1. – P. 69–80.
22. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.
23. Рекристаллизация металлических материалов / Под ред. Ф. Хеснер. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.
24. Куницкая И. Н., Спектор Я. И., Ольшанецкий В. Е., Тумко А. Н. Термокинетические диаграммы и механизмы рекристаллизации при многопроходной горячей деформации // *Нові матеріали технології в металургії та машинобудуванні*. – 2009. – № 1. – С. 11–17.
25. Куницкая И. Н., Спектор Я. И., Ольшанецкий В. Е., Ноговицын А. В. Об энергетике структурообразования при горячей деформации прокаткой аустенитной стали // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2009. – № 2. – С. 17–22.
26. Куницкая И. Н., Спектор Я. И., Ольшанецкий В. Е. Динамическая рекристаллизация специальных сталей при многопроходной горячей деформации // *Нові матеріали технології в металургії та машинобудуванні*. – 2010. – № 2. – С. 45–49.
27. Garcia-Mateo C., Lopez B., Rodriguez-Ibabe J. M. Static recrystallization kinetics in warm worked vanadium microalloyed steels // *Materials Science and Engineering A303*. – 2001. – P. 216–225.
28. Зисман А. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. Выявление бывших аустенитных зерен и анализ кинетики метадинамической рекристаллизации аустенита низкоуглеродистой стали в условиях горячей прокатки // *Письма о материалах*. – 2012. – Т. 2. – С. 3–8.
29. Evangelista E., McQueen H. J., Ryan N. D. Hot strength, dynamic recovery and dynamic recrystallization of 317 type stainless steel // *Metallurgical science and technology*. – 1987. – V. 5, N 2. – P. 50–58.
30. Mandal S., Bhaduri A. K., Sarma V. S. A Study on Microstructural Evolution and Dynamic Recrystallization During Isothermal Deformation of a Ti-Modified Austenitic Stainless Steel // *Metall. Mater. Trans.* – 2011. – V. 42A. – P. 1062–1072.

**ФОРМИРОВАНИЕ АУСТЕНИТА В ФЕРРИТНО-БЕЙНИТНЫХ, БЕЙНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ И МАРТЕНСИТНЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЯХ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПРЕВРАЩЕННУЮ СТРУКТУРУ**

С. В. КОРОТОВСКАЯ, канд. техн. наук, О. В. СЫЧ, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р. техн. наук,  
Д. М. АНИСИМОВ

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

Поступила в редакцию 11.06.2021

После доработки 27.07.2021

Принята к публикации 20.08.2021

Исследованы кинетика роста аустенитного зерна при нагреве и особенности фазовых превращений в зависимости от размера аустенитного зерна в ферритно-бейнитных, бейнитно-мартенситных и мартенситных судостроительных сталях. Изучена кинетика протекания динамической и статической рекристаллизации в зависимости от времени выдержки при заданной температуре. Проведенные исследования позволили определить влияние размера аустенитного зерна в судостроительных сталях марганцевой, марганцево-никелевой и никелевой композиции легирования на превращенную структуру.

*Ключевые слова:* судостроительная сталь, размер аустенитного зерна, динамическая рекристаллизация, статическая рекристаллизация, фазовые превращения, структура, свойства

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-37-48

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Орыщенко А. С. Фундаментальные подходы в создании высокопрочных конструкционных хорошо свариваемых сталей с элементами наноструктурирования // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т.60. – №11. – С. 919–924.
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 (956). – С. 14–42.
3. Голосиенко С. А., Минякин Н. А., Рябов В. В., Семичева Т. Г., Хлусова Е. И. Влияние микролегирования на механические свойства низколегированной хромоникельмолибденовой стали // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 1 (97). – С. 7–13.
4. Матросов М. Ю., Эфрон Л. И., Кичкина А. А., Лясоцкий И. В. Исследование микроструктуры микролегированной ниобием трубной стали после различных режимов контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением // МиТОМ. – 2008. – № 3. – С. 44–49.
5. Орлов В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И., Голосиенко С. А. Разработка технологий производства конструкционных сталей для морской техники и магистральных трубопроводов, предназначенных для эксплуатации в Арктике // Сталь. – 2014. – № 9. – С. 79–88.
6. Плеханов Т. П., Дорожко Т. К., Клестов В. М. Закалка низкоуглеродистых низколегированных сталей с прокатного нагрева. Термическая и термомеханическая обработка проката. – М.: Металлургия, 1981. – С. 17–20.
7. Коротовская С. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И., Новоскольцев Н. С. Влияние микролегирования на особенности структурообразующих процессов при горячей пластической деформации // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 4 (104). – С. 5–16.
8. Сыч О. В., Коротовская С. В., Хлусова Е. И., Новоскольцев Н. С. Разработка термодеформационных режимов прокатки низколегированной «агс»-стали с квазиоднородной ферритно-бейнитной структурой // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 2 (106). – С. 5–17.
9. Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка стали. Т.2. – М.: Металлургия, 1983.
10. Dhua S. K., Mukerjee D., Sarma D. S. Influence of Thermomechanical Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of HSLA-100 Steel Plates. – Met. and Mat. Trans. A. – 2003. – February, V. 34A. – P. 241–253.

11. Гуляев А. П. *Металловедение: Учебник для вузов.* – М.: Металлургия, 1986. – 542 с.
12. García de Andrés, C., Bartolomé, M.J., Capdevila, C., San Martín, D., Caballero, F. G., López, V., *Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels // Materials Characterization.* – 2001. – N 46 – P. 389–398
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.

УДК 621.785.1:669.15–194:621.73

## **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА РЕЖИМОВ НАКОПЛЕНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОКОВОК ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

В. В. ЦУКАНОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Д. Л. СМИРНОВА<sup>1</sup>, С. В. ЕФИМОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>АО «НПО «ЦНИИТМАШ», 115088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4

Поступила в редакцию 22.11.2021

После доработки 25.11.2021

Принята к публикации 26.11.2021

Рассмотрены вопросы, связанные с необходимостью учета процессов фазовых и структурных превращений при назначении послековки режимов накопления поковок из среднеуглеродистых среднелегированных марок стали и их предварительной термической обработки. Проанализированы и сформулированы основные положения, на основании которых был произведен выбор режимов предварительной термической обработки и рекомендовано их ограниченное применение при использовании диаграмм изотермического превращения аустенита, построенных по стандартным методикам.

*Ключевые слова:* диффузионное превращение, накопление, изотермическая выдержка, структурная наследственность, разнотермичность, инкубационный период распада аустенита, термокинетическая диаграмма

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-49-64

### ЛИТЕРАТУРА

1. Позняк Л. А. *Инструментальные стали: Справочник.* – М.: Металлургия, 1977.
2. Геллер Ю. А. *Инструментальные стали. Изд. 5-е.* – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
3. *Металловедение и термическая обработка стали. Т. 3: Справ. / Под ред. М. Л. Бернштейна и А. Г. Рахштадта.* – М.: Металлургия, 1983.
4. Дубовой В. Я. *Флокены в стали.* – М.: Металлургия, 1960. – 331 с.
5. Склюев П. В. *Водород и флокены в крупных поковках.* – М.: Машгиз, 1963. – 186 с.
6. Поволоцкий Д. Я., Морозов А. Н. *Водород и флокены в стали.* – М.: ГНТИ, 1959. – 184 с.
7. Борисов И. А. *Исследование особенностей исправления крупнозернистой структуры в сталях для валков холодной прокатки и штампов // Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* – М., 1968.
8. Товпенек Е. С. *Влияние режима охлаждения крупных поковок на их механические свойства и флокеночувствительность // Вестник машиностроения.* – 1970. – № 11. – С. 70–72.
9. Астафьев А. А. *Предварительная термическая обработка поковок // Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1978. – № 9. – С. 2–6.
10. Цуканов В. В. *Современные стали и технологии в энергомашиностроении.* – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2014. – 464 с.
11. *Термическая обработка в машиностроении: Справочник / Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта.* – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

12. Попов А. А., Попова Л. Е. Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. – М.: Машгиз, 1961. – 430 с.
13. Садовский В. Д. Структурная наследственность в стали. – М.: Металлургия, 1973.
14. Леонтьев Л. И., Цуканов В. В., Смирнова Д. Л. Роль Д. К. Чернова в создании и развитии учения о современной металлургии и металловедении. Ч. 1: Основные теоретические и промышленные открытия Д. К. Чернова // Изв. высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 796–801.
15. Леонтьев Л. И., Цуканов В. В., Смирнова Д. Л. Роль Д. К. Чернова в создании и развитии учения о современной металлургии и металловедении. Ч. 2: Научно-практическое подтверждение идей Д.К. Чернова // Черная металлургия. – 2020. – Т. 63, № 11–12. – С. 873–877.
16. Дурынин В. А., Цуканов В. В. Усовершенствование режимов предварительной термической обработки поковок из теплоустойчивых сталей композиций Cr–4Ni–Mo–V и Cr–Mo–V и рекомендации по окончательной термообработке // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3 (59). – С. 85–95.
17. Дурынин В. А., Цуканов В. В. Улучшение режимов термической обработки поковок из теплоустойчивой стали // Электрометаллургия. – 2008. – № 9. – С. 7–14.
18. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. Изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1978. – 568 с.
19. Садовский В. Д., Малышев К. А., Сазонов Б. Г. Фазовые и структурные превращения при нагреве стали. – М.: Металлургиздат, 1954.

УДК 669.15–194.55:621.785:539.4

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 14X17H2

М. К. ЧЕГУРОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, М. Н. ЧЕЭРОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
М. Г. ГОРШУНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, О. Б. БЕРДНИК<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (НГТУ)», 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24,

<sup>2</sup> ФГБУН «Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН)» – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской академии наук» (ФИЦ ИПФ РАН), 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, E-mail: [berdnik80@mail.ru](mailto:berdnik80@mail.ru)

Поступила в редакцию 2.04.2021

После доработки 14.09.2021

Принята к публикации 22.09.2021

Вопросы обеспечения стабильности структурного состояния и механических свойств являются весьма актуальными для производства при изготовлении изделий, а также при оценке их качества и продлении ресурса. Приведены результаты исследования влияния параметров термической обработки на структурные характеристики стали мартенситно-ферритного класса 14X17H2, произведена оценка влияния структурных параметров на механические свойства.

**Ключевые слова:** сталь, термическая обработка, закалка, отпуск, структура, карбиды, δ-феррит, твердость, релаксация, механические свойства

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-65-73

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин В. Г. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
2. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1976. – 568 с.
3. Металловедение / И. И. Новиков и др. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 496 с.
4. Калинин Б. А., Платонов П. А., Тузов Ю. В., Чернов И. И., Штромбах Я. И. Физическое материаловедение. Т. 6: Учебник для вузов. – М.: МИФИ, 2008. – 672 с.



5. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали: Учебник. – М.: Металлургия, 1999. – 408 с.
6. Микрелегирование стали 14X17H2 бором в условиях ПАО «Днепрспецсталь» / Д. Н. Тогобицкая, В. П. Пиптюк, О. В. Кукса и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – № 1. – С. 40–45.
7. Ильин С. И., Корягин Ю. Д. Технология термической обработки сталей: Учебное пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 120 с.
8. Гуляев А. П. *Металловедение*. – М.: Металлургия, 1986. – 542 с.
9. Чегуров М. К., Сорокина С. А. Основы фрактографического анализа изломов образцов из конструкционных сплавов. – Н. Новгород: НГТУ, 2018. – С. 19–41.
10. Салтыков С. А. *Стереометрическая металлография*. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.
11. Сидоркина Н. М. Об исследовании режимов термообработки стали 14X17H2, обеспечивающих стойкость против межкристаллитной коррозии в различных диапазонах твердостей // *Актуальные вопросы современной науки*. – 2008. – № 2.
12. Скуднов В. А., Чегуров М. К. Релаксация напряжений в металлах и сплавах: Метод. пособие. – Н. Новгород: НГТУ, 2010. – 30 с.
13. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 2005. – 399 с.
14. Малов В. С., Васильев В. А. Влияние химического состава, технологических параметровковки на структуру и механические свойства стали 14X17H2 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2012. – № 9. – С. 2–5.
15. Якимов Н. С., Муратов В. С. Особенности деформационной и термической обработок коррозионно-стойких сталей мартенситно-ферритного класса // *Современные наукоемкие технологии*. – 2018. – № 12–2. – С. 398–402.
16. *Физическое материаловедение. Т. 1: Атомное строение металлов и сплавов* / Под ред. Р. У. Кана и П. У. Хаазена / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1987. – 640 с.

УДК 621.791.053: 539.4.015

### **СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ДЕФЕКТНАЯ СУБСТРУКТУРА СВАРНЫХ ШВОВ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

Р. Е. КРЮКОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Н. А. КОЗЫРЕВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук,  
В. Е. ГРОМОВ<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, Ю. Ф. ИВАНОВ<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук, Ю. А. ШЛЯРОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», 654007,  
Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

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

Поступила в редакцию 13.07.2021

После доработки 4.09.2021

Принята к публикации 7.09.2021

Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии исследованы структурно-фазовое состояние, дефектная субструктура и поверхность разрушения сварных швов из низкоуглеродистой легированной стали, полученных с применением углеродсодержащей добавки и без нее. Выполнен количественный анализ параметров структуры и дислокационной субструктуры металла сварных швов, проведена оценка вкладов скалярной и избыточной плотности дислокаций в прочность сварных швов. Показано, что высокие значения скалярной и избыточной плотности дислокаций в сварном шве, сформированном без углеродсодержащей добавки во флюсе, могут привести к охрупчиванию материала.

*Ключевые слова:* сварной шов, фрактография, структура, фазовый состав, поверхность разрушения, дислокации

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-108-4-74-81

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев Н. А., Крюков Р. Е., Крюков Н. Е., Ковальский И. Н., Козырева О. Е. Разработка новых сварочных флюсов и флюс-добавок для сварки и наплавки стали с использованием отходов металлургического производства. Сообщение 1. Углеродсодержащие добавки для сварочных флюсов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – Вып. 4 (1408). – С. 86–89.
2. Козырев Н. А., Крюков Р. Е., Роор А. В., Башенко Л. П., Липатова У. И. Исследование и разработка новых углеродфторсодержащих добавок для сварочных флюсов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 4. – С. 258–261.
3. Коваль Н. Н., Иванов Ю. Ф. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 304 с.
4. Egerton F. R. Physical Principles of Electron Microscopy. – Basel: Springer International Publishing, 2016. – 196 p.
5. Kumar C. S. S. R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. – New York: Springer, 2014. – 717 p.
6. Carter C. B., Williams D. B. Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
7. Ротштейн В. П., Проскуровский Д. И., Озур Г. Е., Иванов Ю. Ф. Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками. – Новосибирск: СО РАН Наука, 2019. – 348 с.
8. Чернявский К. С. Стереология в металловедении. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
9. Metals Handbook. Fractography and Atlas Fractographs. – American Society for Metals, 1982. – 489 p.
10. Кристалл М. М., Ясников И. С., Полунин В. И., Филатов А. М., Ульяенков А. Г. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения. – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.
11. Козлов Э. В., Жданов А. Н., Конева Н. А. Барьерное торможение дислокаций. Проблема Холла–Петча // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 3. – С. 81–92.
12. Конева Н. А., Козлов Э. В. Физическая природа стадийности пластической деформации // Структурные уровни пластической деформации и разрушения / Под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 77–123.
13. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 533 с.
14. Томас Г., Гориндж М. Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. – М.: Наука, 1983. – 320 с.
15. Физика и механика волочения и объемной штамповки / В. Е. Громов, Э. В. Козлов, В. И. Базайкин, В. Я. Целлермаер, Ю. Ф. Иванов и др. – М.: Недра, 1997. – 293 с.
16. Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Попова Н. А., Коновалов С. В., Конева Н. А. Структурно-фазовые состояния и механизмы упрочнения деформированной стали. – Новокузнецк: Полиграфист, 2016. – 510 с.
17. Гагауз В. П., Козлов Э. В., Данилов В. И., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е. Структурно-фазовые состояния и механические свойства толстых сварных швов. – Новокузнецк. Изд-во СибГИУ. – 2008. – 150 с.

УДК 669.245.018.44:621.74:621.438

### **О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЛИТЫХ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГТД ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Е. М. ВИСИК, канд. техн. наук, Л. И. РАССОХИНА, А. Б. ЕЧИН, канд. техн. наук, М. В. ГАМАЗИНА

*НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ», 105005, Москва, ул. Радио, д. 17,  
E-mail: em.visik@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.07.2021

После доработки 4.10.2021

Принята к публикации 7.10.2021

В условиях машиностроительного предприятия освоена технология литья рабочих монокристаллических турбинных лопаток ГТД из жаропрочного никелевого сплава с кристаллографической ориентацией [001] на автоматизированной литейной установке для направленной кристаллизации УВНК-9А. Отработаны конструкции литейных блоков лопаток, технологии изготовления форм и стержней, плавки рабочих охлаждаемых лопаток из сплава с монокристаллической структурой заданной кристаллографической ориентации взамен технологического процесса в печах проходного типа. В условиях машиностроительного предприятия получены опытные партии монокристаллических отливок рабочих охлаждаемых лопаток с бандажной полкой с выходом годного по структуре  $\geq 75\%$ . Представлены результаты исследования структурно-фазовых характеристик сплава монокристаллических отливок лопаток методом растровой электронной микроскопии в литом состоянии до и после последующей термической обработки. Дан сравнительный количественный анализ микроструктуры и характеристик прочности отливок из жаропрочного никелевого сплава с кристаллографической ориентацией [001], полученных на высокоградиентной установке для направленной кристаллизации, и в установке проходного типа.

*Ключевые слова:* жаропрочные никелевые сплавы, направленная кристаллизация, установка для направленной кристаллизации, монокристаллические рабочие лопатки, микроструктура

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-82-98

#### 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., Толорайя В. Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 105–117.
3. Дубровин В.К., Кулаков Б.А., Габбасов Р.Д. Процессы физико-химического взаимодействия в печах направленной кристаллизации ПМП-2 // *Материалы. Всеросс. науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД»* [Электронный ресурс]. – М.: ВИАМ, 2017. – С. 149–159.
4. Каблов Е. Н., Ечин А. Б., Бондаренко Ю. А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2020. – № 3. – Ст.01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 24.08.2020). DOI:10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
5. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: МИСиС, 2006. – 632 с.
6. Каблов Е. Н., Герасимов В. В., Висик Е. М., Демонис И. М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2013. – № 3. – Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.04.2017).
7. Miller J. D., Pollock T. M. Development and Application of Optimization Protocol For Directional Solidification: Integration Fundamental Theory, Experimentation and Modeling Tools/In: *Superalloys 2012*. TMS: (Minerals, Metals & Materials Society). – 2012. – P. 653–662.
8. Betz U., Jarczyk G., Seserko P. Economic Benefit of LMC Process for the Production of Turbine Components // 4-th ALD – Symposium, China, Sanya Hainan-Island, 7–8.11.2005.
9. Miller J.D., Chaput K.J., Lee D.S., Uchic M.D. Application and Validation of Directional Solidification Model Dendritic Morphology Criterion For Complex Single Crystal Castings // *Superalloys 2016*. TMS “Minerals, Metals & Materials Society”. 2016. – P. 229–236.
10. Герасимов В. В., Висик Е. М., Колядов Е. В. О неиспользованных резервах направленной кристаллизации в повышении эксплуатационных характеристик деталей ГТД и ГТУ // *Литейное производство*. – 2013. – № 9. – С 30–32.

11. Колядов Е. В., Герасимов В. В. Влияние приведенного размера отливки на осевой градиент температуры и макроструктуру отливок при направленной кристаллизации на установке УВНК-15 // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – №3. – С. 3–9. DOI:10.18577/2071-9140-2014-0-3-3-9.

12. Колядов Е. В., Рассохина Л. И., Висик Е. М., Герасимов В. В., Филонова Е. В. Исследование монокристаллических рабочих турбинных лопаток из сплава ЖС32 с перспективной системой охлаждения // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2018. – Т. 84, № 10. – С. 35–40.

13. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Светлов И. Л., Демонис И. М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 36–17.

14. Петрушин Н. В., Елютин Е. С., Королев А. В. Монокристаллические жаропрочные сплавы: состав, технологии, структура и свойства // *Материалы Всеросс. науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД» [Электронный ресурс]*. – М.: ВИАМ, 2017. – С. 271–303.

15. Кузьмина Н. А., Петрушин Н. В., Висик Е. М., Еремин Н. Н., Наприенко С. А. Применение метода Лауэ для исследования структуры образца никелевого жаропрочного сплава, разрушенного в процессе механической обработки // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2020. – №10. – Ст.01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 12.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-3-12.

16. Петрушин Н. В., Висик Е. М., Елютин Е. С. Усовершенствование химического состава и структуры литейного жаропрочного никелевого сплава с малой плотностью // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2021. – № 4. – Ст.01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 12.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-3-15.

17. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Петрушин Н. В., Висик Е. М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 2 (35). – С. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.

18. Оспенникова О. Г., Висик Е. М., Герасимов В. В., Колядов Е. В. Пути повышения эксплуатационных характеристик лопаток газовых турбин // *Технология металлов*. – 2017. – № 1. – С. 17–24.

19. Висик Е. М., Тихомирова Е. А., Петрушин Н. В., Оспенникова О. Г., Герасимов В. В., Живушкин А. А. Технологическое опробование нового жаропрочного сплава с низкой плотностью при литье турбинных рабочих монокристаллических лопаток // *Металлург*. – 2017. – № 2. – С. 34–40.

20. Шарова Н. А., Тихомирова Е. А., Барабаш А. Л., Живушкин А. А., Брауэр В. Э. К вопросу о выборе новых жаропрочных никелевых сплавов для перспективных авиационных ГТД // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2009. – № 3 (19). – С. 249–255.

21. Колядов Е. В., Висик Е. М., Герасимов В. В., Аргинбаева Э. Г. Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства интерметаллидных сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2019. – № 3. – Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 18.10.2020) DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.

22. Оспенникова О. Г., Рассохина Л. И., Битюцкая О. Н., Гамазина М. В. Оптимизация технологии изготовления керамических стержней для улучшения качества литых лопаток ГТД // *Новости материаловедения. Наука и технологии*. – 2017. – № 3–4. – С. 4.

УДК 621.793.7:666.3.016

### **ПЛАЗМЕННОЕ ЗАЩИТНОЕ КЕРАМИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ СИСТЕМЫ $Al_2O_3-Ni$ ИЗ ПЛАКИРОВАННОЙ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ**

И. Н. ЦАРЕВА, канд. физ.-мат. наук, Л. А. КРИВИНА, канд. техн. наук,  
О. Б. БЕРДНИК, канд. техн. наук, Е. Н. РАЗОВ

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН)» – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской академии наук» (ФИЦ ИПФ РАН), 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, E-mail: [imsh@sinn.ru](mailto:imsh@sinn.ru)

Поступила в редакцию 27.04.2021  
После доработки 6.11.2021  
Принята к публикации 10.11.2021

Для решения задачи повышения адгезионно-когезионной прочности плазменных многофункциональных покрытий, используемых для защиты деталей узлов оборудования энерго- и машиностроения от износа и коррозии, исследовано и предложено к применению керамическое покрытие системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ni}$ , полученное из порошковой смеси на основе плакированного никелем корунда. Покрытие было нанесено методом высокоэнергетического плазменного порошкового напыления (на установке «Термоплазма») на интерметаллидный подслои системы  $\text{Ni-Co-Cr-Al-Y}$ . Исследованы микроструктура, фазовый состав, механические, трибологические и адгезионные свойства плазменного керамического покрытия, сформированного из порошкового материала на основе оксида алюминия, плакированного тугоплавкой металлической компонентой (никелем). По результатам исследований установлено, что исходный порошковый материал имеет многофазный состав ( $\text{Ni} + \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 + \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) и сферическую морфологию частиц. Из него при высокоэнергетическом плазменном напылении формируется покрытие с фазовым составом ( $\text{Ni} + \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 + \gamma'\text{-Ni}_3\text{Al}$ ), слоистой микроструктурой с никелевыми прослойками и столбчатым строением оксидных зерен. Покрытие обладает высокими показателями твердости и адгезионно-когезионной прочности, низким коэффициентом трения и рекомендуется для защиты от износа деталей энерго- и машиностроения.

*Ключевые слова:* плакированный порошковый материал, высокоэнергетическое плазменное напыление, оксидные фазы, слоистая микроструктура, столбчатые зерна, твердость, коэффициент трения, адгезионно-когезионная прочность

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-99-107

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Геращенко Е. Ю., Бобкова Т. И., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. Композиционные плакированные порошки для нанесения защитных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 1(97). – С. 59–64.
2. Бобкова Т. И., Фармаковский Б. В., Соколова Н. А. Наноструктурированные порошки на основе алюминия, армированные нитридом кремния, для напыления многофункциональных покрытий повышенной твердости // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 1 (97). – С. 65–72.
3. Селиванов К. С. Оценка прочности материала поверхности при его испытании методом «скретч-тест» // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, № 1(67). – С. 100–106.
4. Семенычев В. В., Салахова Р. К. Оценка адгезии никель-кобальтового покрытия к стекло- и углепластику методом царапанья // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2016. – № 7 (43). – С. 48–57.
5. Структура и свойства интерметаллидных матриц с нанофазным упрочнением / Ю. Р. Колобов, Е. Н. Каблов, Э. В. Козлов и др. – М.: МИСИС, 2008. – 327 с.

УДК 621.793.7

#### ПОЛУЧЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ $\text{NbCo}_2\text{-Zr-WC}$

Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук,  
Р. Ю. БЫСТРОВ, А. М. МАКАРОВ, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 24.05.2021

После доработки 11.06.2021

Принята к публикации 6.09.2021

Приведены результаты комплексных исследований по получению защитных покрытий на основе композиции  $\text{NbCo}_2\text{-Zr-WC}$ . Покрытия, полученные методом микроплазменного напыления, имеют высокие показатели микротвердости ( $\sim 15,0$  ГПа) и износостойкости ( $\sim 1,0 \cdot 10^{-8}$ ).

*Ключевые слова:* интерметаллическое соединение, защитные покрытия, микроплазменное напыление, микротвердость, износостойкость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-108-114

## ЛИТЕРАТУРА

1. Головин Ю. И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение, 2007. – 162 с.
2. Эрлих Г. В. Малые объекты – большие идеи. Широкий взгляд на нанотехнологии. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017.
3. Слуцкий А. Г., Сметкин В. А., Слуцкая О. А., Трубицкий Р. Э. Исследование процесса восстановления при получении легированных высокоуглеродистых сплавов // Литье и металлургия. – 2006. – № 4(40). – С. 115–117.
4. Бобкова Т. И., Фармаковский Б. В. Износостойкие коррозионно-стойкие функционально-градиентные покрытия на основе композиционных порошков системы металл – неметалл // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2(90). – С. 124–129.
5. Бурканова Е. Ю., Фармаковский Б. В. Высокоскоростной механосинтез с использованием дезинтеграторных установок для получения наноструктурированных порошковых материалов системы металл – керамика износостойкого класса // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 1(69). – С. 80–85.
6. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017. – 28 с.
7. Юрков М. А. Разработка технологии создания объемно-пористых покрытий на основе оксида алюминия методом микроплазменного напыления // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 2(66). – С. 67–76.
8. Гринберг Б. А., Иванов М. А. Интерметаллиды Ni<sub>3</sub>Al и TiAl: микроструктура, деформационное поведение. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 359 с.
9. Оспенникова О. Г., Подъячев В. Н., Столянков Ю. В. Тугоплавкие сплавы для новой техники // Труды ВИАМ. – 2016. – № 10 (46). – С. 5.
10. Геращенко Д. А., Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Кузнецов П. А., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. Функциональные защитные покрытия из сплава на основе никеля // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 1(93). – С. 110–114.

УДК 621.793.7:621.785.36:666.3.016

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА

И. Н. ЦАРЕВА, канд. физ.-мат. наук, Л. А. КРИВИНА, канд. техн. наук,  
О. Б. БЕРДНИК, канд. техн. наук, Е. Н. РАЗОВ

*ФГБУН «Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН)» – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской академии наук» (ФИЦ ИПФ РАН), 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова 46, E-mail: [irichatsareva@mail.ru](mailto:irichatsareva@mail.ru)*

Поступила в редакцию 9.06.2021

После доработки 14.07.2021

Принята к публикации 17.09.2021

При изучении высокотемпературного поведения теплозащитного покрытия диоксида циркония апробирован метод лазерного нагрева. Покрытие наносили методом высокоэнергетического плазменного напыления на интерметаллидный подслоя системы Ni–Co–Cr–Al–Y из порошкового материала состава ZrO<sub>2</sub>+7%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> сферической морфологии.

Целью работы являлось исследование процессов структурно-фазовых превращений, плавления и кристаллизации, протекающих в материале керамического покрытия под действием единичного лазерного импульса длительностью 14 мс разной энергией (5, 10, 15 и 20 Дж). Установлено, что после напыления покрытие в исходном состоянии имеет двухфазный состав (T-ZrO<sub>2</sub> + K-ZrO<sub>2</sub>) и слоистую микроструктуру со столбчатым строением зерен диоксида циркония. Лазерный нагрев с энергией импульса 5 Дж стимулирует фазовое превращение T-ZrO<sub>2</sub>→K-ZrO<sub>2</sub>, появление пористости и микротрещин. С увеличением энергии импульса до 10 и 15 Дж на поверхности покрытия интенсивно протекают процессы плавления и сверхбыстрой кристаллизации, сопровождающиеся

измельчением зерен. По проведенным теоретическим оценкам, процессы оплавления затрагивают поверхностные слои толщиной от 2,2 до 6,6 мкм, а фазовые превращения имеют место на глубине ~11 мкм. При увеличении энергии лазерного импульса до  $E = 20$  Дж был инициирован процесс разрушения покрытия по механизму растрескивания с отслоением фрагментов поверхностного слоя толщиной 5–10 мкм.

Метод лазерного нагрева рекомендован в качестве экспресс-диагностики при проведении сравнительных испытаний теплостойкости керамических покрытий, получаемых разными методами и из различных исходных материалов.

**Ключевые слова:** высокоэнергетическое плазменное напыление, порошковый материал, диоксид циркония, слоистая микроструктура, столбчатые зерна, импульсный лазерный нагрев, структурно-фазовые превращения, плавление, рекристаллизация, экспресс-метод

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-115-127

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барвинок В. А., Шитарев И. Л., Богданович И. И., Докукина И. А., Карасев В. М. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД // *Авиационная и ракетно-космическая техника*. – 2009. – № 3(19). – С. 11–28.

2. Жирихин К. В., Николаев А. А., Талызин В. А., Шардин А. О., Тарасенко Ю. П., Царева И. Н., Бердник О. Б. Исследование термобарьерного покрытия на основе диоксида циркония для защиты криволинейных обводообразующих поверхностей экспериментального высокоскоростного летательного аппарата // *Материалы XXVIII Научно-технической конференции по аэродинамике* (г. Жуковский). – Изд-во ЦАГИ, 2017. – С. 131.

3. Карнавская Т. Г., Кикин П. Ю., Перевезенцев В. Н., Разов Е. Н., Русин Е. Н. Изменение морфологии поверхности тантал-вольфрамового покрытия после воздействия циклических лазерных импульсов // *Физика и химия обработки материалов*. – 2018. – № 1. – С. 5–10.

4. Кикин П. Ю., Перевезенцев В. Н., Русин Е. Н. Исследование процесса плавления ультрамелкозернистого алюминиевого сплава 1421 при импульсном лазерном воздействии // *Вопросы материаловедения*. – 2010. – № 2 (62). – С. 35–40.

5. Scott H. G. Phase relationships in the Yttria-rich Part of the Yttria – Zirconia System // *Journal of Material Science*. – 1977. – N 12 (2). – P. 311–316.

6. Алисин В. В. Трибологические свойства кристаллов диоксида циркония обработанных лазером // *JARiTS*. – 2019. – №13. – С. 33–36.

7. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСИС, 1994. – 328 с.

8. Абызов А. М. Рентгенодифракционный анализ поликристаллических веществ на минидифрактометре «Дифрей»: Учебное пособие. – СПб.: СПГТУ, 2008. – 95 с.

УДК 669.721'71–419:541.183:532.6

### **ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ВНУТРИПОРОВОЙ ЖИДКОСТИ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ ДВОЙНЫХ ГИДРОКСИДОВ МАГНИЯ И АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОГО СИНТЕЗА**

Д. В. МАЙОРОВ, канд. техн. наук, Е. К. КОПКОВА, канд. техн. наук

*«Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева» – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр РАН» (ИХТРЭМС КНЦ РАН), 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Академгородок, д. 26а, E-mail: d.maiorov@ksc.ru*

Поступила в редакцию 22.06.2021

После доработки 29.06.2021

Принята к публикации 27.07.2021

Приведены результаты исследований влияния поверхностного натяжения внутрипоровой жидкости на структурно-поверхностные свойства (удельные поверхность и объем пор, распреде-

ление пор по их диаметру) слоистых двойных гидроксидов (СДГ) магния и алюминия (Mg–Al СДГ), полученных при взаимодействии кристаллогидратов  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и карбоната аммония. Получены уравнения, связывающие удельную поверхность и удельный объем пор синтезированных образцов Mg–Al СДГ с поверхностным натяжением внутрипоровой среды. Показано, что замещение водной среды в поровом пространстве на ацетон перед сушкой синтезированного Mg–Al СДГ позволяет существенно увеличить емкость адсорбционного монослоя продуктов и не оказывает существенного влияния на механизм процесса сорбции.

**Ключевые слова:** слоистый двойной гидроксид магния и алюминия, поверхностное натяжение жидкости, удельная поверхность, удельный объем пор, сорбция

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-128-137

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cavani F., Trifiro F., Vassari A. Hydrotalcite – type anionic clays: preparation properties and applications // *Catal. Today*. – 1999. – V. 11. – P. 173–301.
2. Bissessur A., Naicker M. Synthesis and use of hydrotalcites as heat stabilisers in thermally processed powdered polyvinylchloride (PVC) // *International Journal of Physical Sciences*. – 2013. – V. 8(36). – P. 1772–1782.
3. Нестройная О. В., Рыльцова И. Г., Лебедева О. Е. Синтез и термические превращения мультикомпонентов слоистых двойных гидроксидов MgCo/AlFe со структурой гидроталькита // *Журнал общей химии*. – 2017. – Т. 87, № 2. – С. 181–185.
4. Синтез и изучение новых слоистых гидроксидов магния – кобальта – железа со структурой гидроталькита / И. Г. Рыльцова, О. В. Нестройная, О. Е. Лебедева и др. // *Журнал неорганической химии*. – 2014. – Т. 59, № 12. – С. 1652–1659.
5. Mg–Al слоистые двойные гидроксиды: получение, строение и каталитический потенциал в конденсации циклогексанона и с ацетонитрилом / В. В. Белов, В. И. Марков, С. Б. Сова и др. // *Журнал прикладной химии*. – 2014. – Т. 87, вып. 8. – С. 1028–1035.
6. Серцова А. А., Субчева Е. Н., Юртов Е. В. Синтез и исследование структуры двойных гидроксидов на основе Mg, Zn, Cu и Al // *Журнал неорганической химии*. – 2015. – Т. 60, № 1. – С. 26–35.
7. Исследование структуры Mg–Al и Ni–Al оксидных носителей катализаторов переработки углеводородов, полученных из слоистых двойных гидроксидов / О. Б. Бельская, Л. Н. Леонтьева, Т. И. Гуляева и др. // *Кинетика и катализ*. – 2016. – Т. 57, № 4. – С. 544–565.
8. Степанова Л. Н., Бельская О. Б., Казаков М. О., Лихолобов В. А. Использование карбонильных комплексов платины при синтезе катализаторов Pt/MgAlO<sub>x</sub> // *Кинетика и катализ*. – 2013. – Т. 54, № 4. – С. 533–539.
9. Степанова Л. Н., Бельская О. Б., Леонтьева Н. Н. Влияние соотношения Al/Mg в составе слоистых двойных гидроксидов на сорбцию хлоридных комплексов Pt (IV) // *Журнал Сибирского Федерального университета. Сер. Химия*. – 2012. – Т. 5, № 4. – С. 361–375.
10. Загузин А. С., Романенко А. В., Бухтиярова М. В. Синтез оксидов алюминия с контролируемыми текстурными и прочностными характеристиками // *Журнал прикладной химии*. – 2020. – Т. 93, вып. 8. – С. 1079–1090.
11. Li Y., Peng C., Li L., Ra P. Self-assembled 3D hierarchically structured gamma alumina by hydrothermal method // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2014. – V. 97, N 1. – P. 35–39. <http://doi.org/10.1111/jace.12652>.
12. Dong Y., Xu Y., Zhang Y., Lian X., Yi X., Zhou Y., Fang W. Synthesis of hierarchically structured alumina support with adjustable nanocrystalline aggregation toward efficient hydrodesulfurization // *Appl. Catal. A: General*. – 2018. – V. 559. – P. 30–39.
13. Dong Y., Yu X., Zhou Y., Lian X., Yi X., Fang W. Towards active macro-mesoporous hydrotreating catalysts: Synthesis and assembly of mesoporous alumina microspheres // *Catal. Sci. Technol.* – 2018. – V. 8, N 7. – P. 1892–1904.
14. Худеев И. И., Лебедев А. Е., Смирнов О. А., Меншутина Н. В. Интенсификация процесса свехкритической сушки // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2018. – Т. 32, № 11. – С. 90–93.



15. Сулова Е. Н., Ловская Д. Д., Лебедева Н. В. Совмещение процессов замены растворителя в сверхкритической сушки в одном аппарате для получения аэрогелей // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 12. – С. 40–42.
16. Кузнецова Т. Ф., Еременко С. И. Синтез мезопористого кремнезема аэрогельного типа // Коллоидный журнал. – 2014. – Т. 76, № 3. – С. 356–362.
17. Патент РФ 2678007. Способ получения слоистого гидроксида магния и алюминия / Матвеев В. А., Майоров Д. В. – 2019. – Бюл. № 3.
18. Матвеев В. А., Копкова Е. К., Майоров Д. В., Михайлова О. Б. Новый подход к синтезу Mg–Al слоистых гидроксидов // Химическая технология. – 2020. – № 2. – С. 57–63. doi: 10.31044/1684-5811-2020-21-2-57-63.
19. Zhitova E. S., Yakovenchuk V. N., Krivovichev S. V., Zolotarev A. A., Pakhomovsky Y. A., Ivanyuk G. Y. Crystal chemistry of natural layered double hydroxides. 3. The crystal structure of Mg, Al-disordered quintinite-2H // Mineralogical Magazine. – 2010. – V. 74. № 5. – P. 841–848.
20. Кривовичев С. В., Антонов А. А., Житова Е. С., Золотарев А. А., Кривовичев В. Г., Яковенчук В. Н. Квинтинит-1М из Баженовского месторождения (Средний Урал, Россия): кристаллическая структура и свойства // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология, География. – 2012. – № 2. – С. 3–10.
21. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Изд 2-е / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 306 с.
22. Яковлева Н. В. Исследование характеристик пористости объемно-пористых нанокатализаторов на основе оксида алюминия и интерметаллидов системы никель–алюминий // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 1(73). – С. 95–101.
23. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов. Изд. 10-е. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
24. Гороновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии: Изд. 5-е / Под общ. ред. А. Т. Филипенко. – Киев: Наукова думка, 1987. – С. 612.
25. Бобылёв В. Н. Физические свойства наиболее известных химических веществ: Справочное пособие. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. – 2003. – 24 с.

УДК [621.793.7+621.791.927]:669.018.8'24

## ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ, П. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА, А. М. МАКАРОВ, Ю. М. МАРКОВА, А. В. АНИСИМОВ, 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 18.11.2021

После доработки 2.12.2021

Принята к публикации 6.12.2021

Представлены результаты исследования высоколегированного никелем коррозионно-стойкого слоя, нанесенного на поверхность низкоуглеродистой экономнолегированной стали. Формирование слоя осуществляется в два этапа – на первом этапе методом «холодного» газодинамического напыления наносится прекурсорное покрытие, на втором при воздействии лазера формируется легированный слой. Исследованы состав и свойства легированного никелем слоя на поверхности низкоуглеродистой стали. Результаты рентгеноструктурного фазового анализа свидетельствуют об образовании в сформированном слое ГЦК решетки твердого раствора и интерметаллида Ni<sub>3</sub>Fe.

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, лазерное легирование, «холодное» газодинамическое напыление, интерметаллидные соединения, микротвердость, оптоволоконный лазер, никелевые сплавы

ЛИТЕРАТУРА

1. Gorynin, I. V., Ignatov, V. A., Rybin, V. V., Fabritsiev, S. A., Kazakov, V. A., Chakin, V. P., Prokofyev, Y. G. Effects of neutron irradiation on properties of refractory metals // *Journal of Nuclear Materials*. – 1992. – V. 191–194. – P. 421–425. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(09\)80079-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(09)80079-2).
2. The effect of microalloying on mechanical properties of low-carbon chromium–nickel–molybdenum steel / S. A. Golosienko, N. A. Minyakin, V.V. Ryabov et al. // *Inorg. Mater. Appl. Res.* – 2019. – V. 10. – P. 1309–1313. <https://doi.org/10.1134/S2075113319060194>.
3. Quantitative Analysis of Carbide Phases in Medium-Carbon Steel After Low-Temperature Tempering // V. V. Ryabov, E. I. Khlusova, A. A. Zisman et al. // *Metallurgist*. – 2019. – V. 62. – P. 926–936. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00739-5>.
4. Müller G., Schumacher, G., Zimmermann, F. Investigation on oxygen controlled liquid lead corrosion of surface treated steels. *Journal of Nuclear Materials*. – 2000. – V. 278(1). – P. 85–95. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(99\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(99)00211-1).
5. Markov M. A., Kashtanov A. D., Krasikov A. V., Bykova A. D., Gerashchenkov D. A., Makarov A. M., Perevislov S. N. Corrosion-resistant ceramic coatings that are promising for use in liquid metal environments // *Key Engineering Materials*. – 2019. – V. 822. – P. 752–759. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.752>.
6. Cheng G. P., He Y. Z. Preparing of NiAl and Ni3Al Intermetallic Composite Coatings by Laser Cladding *In Situ* Synthesis // *Advanced Materials Research*. – 2011. – V. 239–242. – P. 636–641. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.239–242.636.
7. Qi C., Zhan X., Gao Q., Liu L., Song Y., Li Y. The influence of the pre-placed powder layers on the morphology, microscopic characteristics and microhardness of Ti–6Al–4V/WC MMC coatings during laser cladding // *Optics & Laser Technology*. – 2019. – N 119. – P. 105572. doi:10.1016/j.optlastec.2019.105572.
8. 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.
9. Emamian A., Corbin S. F., Khajepour A. Effect of laser cladding process parameters on clad quality and in-situ formed microstructure of Fe–TiC composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – N 205(7) . – P. 2007–2015. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.08.087.
10. Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkimov, A., Fomin, V. Cold Spray Technology. *Cold Spray Technology*. – Elsevier Ltd., 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045155-8.X5000-5>.
11. Oryshchenko A. S., Gerashchenkov D. A. Aluminum matrix functional coatings with high microhardness on the basis of Al–Sn + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite powders fabricated by cold gas dynamic spraying // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2016. – N 7(6). – P. 863–867. <https://doi.org/10.1134/S2075113316060125>.
12. Gerashchenkov D. A., Farmakovskii B. V., Bobkova T. I., Klimov V. N. Features of the Formation of Wear-Resistant Coatings from Powders Prepared by a Micrometallurgical Process of High-Speed Melt Quenching // *Metallurgist*. – 2017. – N 60(9–10). – P. 1103–1112. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0413-0>.
13. Geraschenkov D. A., Vasiliev A. F., Farmakovskiy B. V., Mashek A. Ch. Study of the flow temperature in the process of cold gas-dynamic spraying of functional coatings // *Materials Science*. – 2014. – Is. 1. – P. 87–96. (Gerashchenkov, D. A., Vasil'yev, A. F., Farmakovskiy, B. V., & Mashek, A. Ch.). Issledovaniye temperatury potoka v protsesse kholodnogo gazodinamicheskogo napyleniya funktsional'nykh pokrytiy // *Voprosy materialovedeniya*. – 2014, N 1 (77). – P. 87–96. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21515704>.
14. Bystrov R. Yu, Gerashchenkov D. A. Coating of a multicomponent system Al–Cr–Ni–Co–Fe on a steel substrate obtained by laser // *Materials science*. – 2021. – Is. 3 (107). DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-00-00.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СФЕРОПЛАСТИКОВ

В. Л. ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук, В. Ю. КОСУЛЬНИКОВ, П. В. СЕРЫЙ, канд. техн. наук,  
С. Н. ТРОШКИН, А. В. АНИСИМОВ, 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 10.06.2021

После доработки 20.09.2021

Принята к публикации 30.09.2021

Выполнены расчеты гидростатической прочности сферопластика с использованием ранее описанной эмпирической формулы. В расчетах использованы физико-механические характеристики полимерного связующего и полых стеклянных микросфер. Определение физико-механических характеристик полимерного связующего, полых стеклянных микросфер и сферопластика выполнено с применением стандартных методов: динамического механического анализа, газового и гидростатического пикнометров. Были использованы также результаты тензометрических испытаний коэффициентов Пуассона связующих. Гидростатическую прочность измеряли в гидрокамере высокого давления. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных ряда составов сферопластика на основе многокомпонентных эпоксидных связующих. Показана степень влияния свойств микросфер и связующих на гидростатическую прочность сферопластика. Проведена оценка корреляции расчетных значений с экспериментальными.

**Ключевые слова:** сферопластики, многокомпонентное эпоксидное связующее, стеклянные микросферы, физико-механические характеристики, прогнозирование гидростатической прочности

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-149-164

### ЛИТЕРАТУРА

1. Krehnzke M. A., Kiernan T. I. Advanced syntactic foams for deep submergence. The decade ahead – 1970–1980 // Soc. MTS Conf. “Marin Technology”, 1969. – P. 531–556.
2. Кржечковский П. Г. Микромеханика деформирования и разрушения сферопластиков // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Николаев, Николаевский кораблестроительный институт, 1992.
3. Дадт П. Определение величины кратковременного критического разрушающего гидростатического давления для синтактной пены / Под ред. Ю. И. Еловкова. – Л.: ЦНИИ ТС, 1980. – 17 с.
4. Кржечковский П. Г., Павлицев В. И. Приведенные упругие характеристики для полых сферических наполнителей // Строительная механика корабля: Сб. науч. тр. – Николаев, Николаевский кораблестроительный институт, 1984. – С. 56–62.
5. Будов В. В. Полые стеклянные микросферы. Применение, свойства, технология // Стекло и керамика – 1994. – № 7–8. – С. 7–11.
6. Асланова М. С., Стеценко В. Я., Шустров А. Ф. Полые неорганические микросферы // Химическая промышленность за рубежом. – 1981. – № 9 – С. 33–51.
7. Будов В. В. Физико-химические процессы в технологии полых стеклянных микросфер // Стекло и керамика. – 1990. – № 3. – С. 9–10.
8. Будов В. В. Прочность полых стеклянных микросфер разного типа // Проблемы прочности. – 1991. – № 5. – С. 68–70.
9. Будов В. В. Влияние некоторых факторов на прочность полых стеклянных микросфер // Тугоплавкие волокна и мелкодисперсные наполнители. – М., 1990. – С. 34–36.
10. Гулоян Ю. А. Физико-химические основы технологии стекла. – Владимир: Транзит-Икс, 2008. – 736 с
11. Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла. – М.: Мир, 2006. – 288 с.
12. Саркисов П. Д. Технология стекла. Справочные материалы. – М.: Российский хим.-технол. ин-т им. Д. И. Менделеева, 2012.
13. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. – Киев: Наукова думка, 1972.

14. Сандитов Д. С., Мантатов В. В., Сандитов В. Д. Коэффициент Пуассона и пластичность стекла // Журнал теоретической физики. – 2009. – Т. 79, вып. 4. – С. 150–152.
  15. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. – Л.: Наука, 1974.
  16. Деденко Л. Г., Керженцев В. В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. – М.: Изд-во МГУ, 1977.
  17. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. – М.: Мир, 1985.
  18. Земельман М. А. Метрологические основы технических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
  19. Схиртладзе А. Г. Практикум по нормированию точности: Учеб. пособие. – М.: Славянская школа, 2003.
  20. Voigt W. Lehrbuch der Kristallphysik. – Berlin: Teubner, 1928. – 962 s.
  21. Reuss A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung // Z. Angew. Math. und Mech. – 1929. – V 9, № 1. – S. 49–58.
  22. Hashin Z., Shtrikman S. A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials // J. Mech. Phys. Solids. – 1963. – V. 11. – P. 127–140.
  23. Светашков А. А., Куприянов Н. А., Манабаев К. К. Модификации эффективных модулей типа Хашина–Штрикмана для двухкомпонентного изотропного композита // Физическая мезомеханика. – 2015. – N 18–6. – С. 57–65.
  24. Зарубин В. С., Кувыркин Н. Г., Савельева И. Ю. Сравнительный анализ оценок модулей упругости композитов. Изотропные шаровые включения // Вестник МГТУ им. М. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2014. – № 5. – С. 53–69.
- УДК 678.067.5

## **БЕЗРАСТВОРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕПРЕГА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОРОШКОВОГО ФТАЛОНИТРИЛЬНОГО СВЯЗУЮЩЕГО**

А. О. КУРНОСОВ, М. И. ВАВИЛОВА, И. Н. ГУЛЯЕВ, канд. техн. наук, К. Р. АХМАДИЕВА

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

Поступила в редакцию 17.09.2021

После доработки 4.10.2021

Принята к публикации 7.10.2021

Представлены результаты исследования свойств порошкового фталонитрильного связующего различного гранулометрического состава. Проведены микроструктурные исследования связующего. Описаны основные технологии совмещения полимерных связующих с армирующими наполнителями. Приведены примеры расчета диапазона весовых характеристик препрегов с учетом возможного разброса поверхностной плотности армирующего наполнителя и выбранного диапазона массового содержания связующего. Показана принципиальная возможность использования порошкового фтало-нитрильного связующего для получения ПКМ по препреговой технологии.

*Ключевые слова:* полимерные композиционные материалы, препрег, стеклопластик, фталонитрил, матрица, аутогезия, порошковое связующее

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-165-178

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Сб. тез. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Т.4. – СПб., 2019. – С. 24.
2. Вешкин Е. А. Технологии без автоклавного формования низкопористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них // Автореф. ... канд. техн. наук. – М., ВИАМ, 2016. – 23 с.
3. Курносков А. О., Мельников Д. А., Соколов И. И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2015. – № 8. – Ст.08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 03.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.

4. Зеленина И. В., Гуляев И. Н., Кучеровский А. И., Мухаметов Р. Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 2. – Ст.08 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 12.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.

5. Keller T. M. Phthalonitrile-based high temperature resin // Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry. – 1988. – V. 26, Is. 12. – P. 3199–3212.

6. Шимкин А. А., Пономаренко С. А., Мухаметов Р. Р. Исследование процесса отверждения дифталонитрильного связующего // Журнал прикладной химии. – 2016. – Т.89, вып. 2. – С. 256–264.

7. Keller T. M., Dominguez D. D. High temperature resorcinol-based phthalonitrile polymer // Polymer. – 2005. – V. 46. – P. 4614–4618.

8. Колпачков Е. Д., Петрова А. П., Курносое А. О., Соколов И. И. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – № 11. – С. 22–36. URL: <https://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.06.2021) DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.

9. Бабкин А. В. Высокотермостойкие фталонитрильные матрицы и полимерные композиционные материалы на их основе // Автореф. ... канд. хим. наук. – М.: МГУ, 2016. – 25 с.

10. Григорьев М. М., Хрульков А. В., Гуревич Я. М., Панина Н. Н. Изготовление стеклопластиковых обшивок методом вакуумной инфузии с использованием эпоксиангидридного связующего и полупроницаемой мембраны // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2014. – № 2. – Ст.04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-4-4.

11. Мельников Д. А., Петрова А. П., Громова А. А., Соколов И. И., Раскутин А. Е. Расчет соотношения компонентов препрега марки ВПС-53/120, определение физико-механических и эксплуатационных характеристик стеклопластика // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – № 1. – Ст.01 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-92-104.

12. Чурсова Л. В., Бабин А. Н., Панина Н. Н., Ткачук А. И., Терехов И. В. Использование ароматических аминных отвердителей для создания эпоксидных связующих для ПКМ конструкционного назначения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 6. – Ст.04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-4-4.

13. Соловьев П. П., Суменков А. Л., Семочкин И. И., Зимин А. И. Об аутогезии высокодисперстных порошков // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. XXI, № 9 (77) . – С. 95–97.

14. Металлические порошки и порошковые материалы: Справочник / Б. Н. Бабич, Е. В. Вершинина, В. А. Глебов и др. / Под ред. Ю. В. Левинского. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 520 с.

15. Евстратова К. И., Купина Н. А., Малахова Е. Е. Физическая и коллоидная химия. – М.: Высшая школа, 1990. – 487 с.

16. Басов Н. И. Любартович В. А., Любартович С. А. Контроль качества полимерных материалов. – Л.: Химия, 1990. – 112 с.

17. 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.

УДК 620.173.24:621.791.011:539.421

#### **РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАВНОМЕРНОГО РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ОБРАЗЦОВ ПОЛНОЙ ТОЛЩИНЫ**

В. Ю. ФИЛИН<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. В. МИЗЕЦКИЙ<sup>1</sup>, О. П. ВИНОГРАДОВ<sup>1</sup>,  
К. Е. САДКИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Е. Д. НАЗАРОВА<sup>1</sup>, А. В. ПОРОШКОВ<sup>2</sup>, Д. А. ПЫШКИН<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> АО «Выксунский металлургический завод», 607061, Нижегородская обл., г. Выкса, ул. Братьев Баташевых, 45

Поступила в редакцию 13.09.2021  
После доработки 8.11.2021  
Принята к публикации 10.11.2021

При сдаточных испытаниях на трещиностойкость основного металла и сварных соединений стального проката и труб определяют критические значения CTOD, требуемые в технических условиях на поставку продукции. Обязательными являются испытания основного металла трубы и металла шва в полнотолщинных образцах с ориентацией надреза по толщине. Рассмотрены проблемы, возникающие при изготовлении образцов из труб. Рассчитана и спроектирована оснастка, облегчающая их изготовление. Приемлемую кривизну фронта усталостной трещины в образцах можно обеспечить путем проведения дополнительных мероприятий: для исследованных материалов эффективным является локальное боковое обжатие. Расчеты параметров процесса сварки, бокового обжатия и последующего нанесения надреза на заготовку позволили найти эпюры остаточных напряжений и определить оптимальную степень обжатия. Показано, что такая последовательность предпочтительнее по сравнению с обжатием образцов с надрезом.

*Ключевые слова:* трещиностойкость, сварные соединения, трубы, прямолинейность фронта трещины, локальное боковое обжатие.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-179-188

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин А. В., Филин В. Ю., Гусев М. Ф., Маркадеева Ф. Ю., Юрков М. Е. Практика аттестационных испытаний высокопрочных хладостойких судостроительных сталей для получения свидетельства Российского морского регистра судоходства // *Материалы Шестой международной научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2016)»* / Под ред. В. А. Грановского. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2016. – С. 111–118.
2. ISO 12135:2021 Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness. – 2021. – 112p.
3. ISO 15653:2018 Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds. – 2018. – 46p.
4. Филин В. Ю. Контроль качества сталей для крупногабаритных сварных конструкций арктического шельфа. Применение российских и зарубежных требований // *Вопросы материаловедения*. 2019. – № 2 (98). – С. 136–153.
5. Назарова Е. Д. Разработка методов регулирования остаточных напряжений в образцах, испытываемых на трещиностойкость: Выпускная квалификационная работа магистра. – СПбПУ, 2021. – 147 с. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2021/vr/vr21-4910.
6. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
7. Леонов В. П., Антонова С. Д., Сафронова Н. Н., Нестерова Е. В. Влияние предварительной пластической деформации на характеристики стали PCE40Z // *Вопросы материаловедения*. – 2003. – № 2(34). – С. 50–66.
8. Копельман Л. А. Основы теории прочности сварных конструкций: Уч. пособие. – СПб.: Изд-во политехнического университета, 2008. – 273 с.
9. Садкин К. Е., Филин В. Ю., Мизецкий А. В., Назарова Е. Д. Оценка методом конечных элементов эффективности локального бокового обжатия призматических образцов с надрезом // *Вопросы материаловедения*. – 2020. – № 4(104). – С. 182–191.
10. Артемьев Д. М., Садкин К. Е., Мизецкий А. В. Расчетная оценка остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях судокорпусных конструкций методом конечных элементов // *Материалы и доклады V Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем»*. Т.1, Красноярск, 12–16 октября 2015 г. – С. 51–55.

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Co–Cr–Ni–W–Ta, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Д. И. СУХОВ, канд. техн. наук, И. А. ХОДИНЕВ, С. А. МОНИН, П. В. РЫЖКОВ

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ», 105005, Москва, ул. Радио, д. 17,

E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Поступила в редакцию 1.07.2021

После доработки 4.10.2021

Принята к публикации 7.10.2021

Приведены результаты усталостных испытаний гладких цилиндрических образцов при контроле полной деформации в условиях симметричного цикла и повышенной температуры. Рассмотрена взаимосвязь значений усталостных характеристик материала при учете напряжений, пластической деформации и количества циклов до разрушения. Представлено сравнение деформационных кривых, построенных по экспериментальным данным, с деформационными кривыми, построенными оценочными методами.

*Ключевые слова:* механические свойства, характеристики усталости, жаропрочные сплавы на основе кобальта, технология селективного лазерного сплавления, деформационный подход, уравнение Рэмберга–Осгуда, уравнение Басквина–Мэнсона–Коффина

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-189-201

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендательный циркуляр № РЦ-АП-33.15-1. Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов. – М.: ОАО «Авиаиздат», 2013.
2. Евгенов А. Г., Шуртаков С. В., Прагер С. М., Малинин Р. Ю. К вопросу о разработке универсальной расчетной методики оценки деградации оборотных металлических порошковых материалов в зависимости от цикличности использования в процессе селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. – 2020. – № 4. – С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.
3. Луценко А. Н., Славин А. В., Ерасов В. С., Хвацкий К. К. Прочностные испытания и исследование авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 5. – С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
4. Bannantine J. A., Comer J. J., Handrock J. L. *Fundamentals of metal fatigue analysis*. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1990. – P. 271.
5. Donachie M. J., Donachie S. J. *Superalloys: A Technical Guide, 2nd Edition*. – ASM International, 2002. – 439 p.
6. Reuchet J., Remy L. High Temperature Low Cycle Fatigue of MAR-M 509 Superalloy I: The Influence of Temperature on the Low Cycle Fatigue Behaviour from 20 to 1100°C // *Materials Science and Engineering*. – 1983. – V. 58. – P. 19–32.
7. Kablov E. N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 2020. – V. 90, N 2. – P. 225–228.
8. Каблов Е. Н., Подживотов Н. Ю., Луценко А. Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. – 2019. – № 3. – С. 28–34.
9. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. – 2016. – № 2 (14). – С. 16–21.
10. Ерасов В. С., Орешко Е. И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Ч. 2: Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Методики испытаний и обработки результатов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2021. – № 1 (62). – С. 80–94. DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.

11. Ерасов В. С., Нужный Г. А., Гриневиц А. В. Об оценке повреждаемости металлических материалов методами механических испытаний // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 3. – С. 42–47.
12. Горбовец М. А., Ходинев И. А., Рыжков П. В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2018. – № 9. Ст.06URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 03.11.2020). DOI:[dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60)
13. Lee Y. -L., Barley M. E., Kang H. -T. Metal fatigue analysis handbook: practical problem-solving techniques for computer-aided engineering. – Elsevier Inc., 2012. – P. 222–223.
14. ASTM E606–04. Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing. – ASTM International. United States, 2004.
15. Мазалов И. С., Сухов Д. И., Неруш С. В., Сульянова Е. А. Особенности формирования микроструктуры сплавов системы Co–Cr–Ni–W–Ta и их механические свойства // Кристаллография. – 2019. – Т. 64, № 4. – С. 544–549.
16. Егорушкин В. Е., Панин В. Е., Панин А. В. О физической природе пластичности // Физическая мезомеханика. – 2020. – № 23 (2) . – С. 5–14.
17. Meggiolaro M. A. Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions // International Journal of Fatigue. – 2004. – N 26. – P. 452–467.
18. Manson S. S. Fatigue: a Complex Subject – Some Simple Approximations // Experimental Mechanics – Journal of the Society for Experimental Stress Analysis. – 1965. – N 5 (7) . – P. 193–226.
19. Muralidharan U., Manson S. S. Modified Universal Slopes Equation for Estimation of Fatigue characteristics // Journal of Engineering Materials and Technology – Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. – 1988. – N 110. – P. 55–58.
20. 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.

УДК 621.039.536.2:621.791.053

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛА НЕОБЛУЧАЕМОГО СВАРНОГО ШВА КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-440 ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ТЕЧЕНИЕ 45 ЛЕТ**

Д. Ю. ЕРАК, д-р техн. наук, А. А. ЧЕРНОБАЕВА, д-р техн. наук, К. И. МЕДВЕДЕВ,  
Д. А. ЖУРКО, канд. техн. наук, В. Н. КОЧКИН, М. А. СКУНДИН, С. А. БУБЯКИН, канд. техн. наук,  
Н. В. ПАЛЬ, А. А. РЕШЕТНИКОВ

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва,  
пл. Академика Курчатова, 1, E-mail: medvedev\_ki@nrcki.ru*

Поступила в редакцию 1.06.2021

После доработки 23.08.2021

Принята к публикации 6.09.2021

Представлены результаты исследования механических характеристик и химического состава металла проб, вырезанных из необлучаемого сварного шва корпуса реактора ВВЭР-440 после эксплуатации в течение 45 лет. Получено расчетное распределение значений критической температуры хрупкости по толщине облучаемого сварного шва корпуса реактора ВВЭР-440 (140 мм) с учетом распределения исходных свойств, содержания фосфора и меди, а также плотности потока быстрых нейтронов по толщине шва. Учитывая, что все кольцевые сварные швы, соединяющие обечайки, в корпусе реактора типа ВВЭР-440 изготавливаются по одной технологии, результаты исследования необлучаемого сварного шва можно использовать для оценки распределения свойств в облучаемом сварном шве. При этом допускается, что эффект температурного старения при температуре 270°C (при которой эксплуатируется необлучаемый сварной шов) невелик, и им можно пренебречь.

*Ключевые слова:* сварной шов, критическая температура хрупкости, корпус реактора ВВЭР-440, флюенс быстрых нейтронов, радиационное охрупчивание, содержание фосфора, содержание меди



1. Алексеенко Н. Н., Амаев А. Д., Горынин И. В., Николаев В. А. Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 191 с.
2. Хоуторн Дж. Р. Радиационное охрупчивание // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Под ред. К. Л. Брейента и С. К. Бенерджи / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1988. – С. 423–479.
3. Chernobaeva A., Shtrombah Ya., Krjukov A., Erak D., Platonov P., Nikolaev J., Krasikov E., Debarberis L., Kohopaa Y., Valo M., Vodenicharov S. Material characterisation and selection for the international research project “PRIMAVERA” // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2007. – V. 84(3). – P. 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.09.016>
4. Chernobaeva A., Shulgan N., Shtromakh Ya., Titova T., Nikoalev Y., Blinova M. Mechanical properties distribution in welds and forging of VVER-1000 // ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 22–26, 2007, San Antonio, Texas.
5. ГОСТ Р 50.05.12–2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Контроль радиационного охрупчивания корпуса реактора атомной станции.
6. ГОСТ 1497–84 Металлы. Методы испытаний на растяжение
7. Viehrig H.-W., Houska M., Altstadt E., Valo M. Summary of the investigations on the decommissioned WWER-440 reactor pressure vessel of the NPP Greifswald // The Thirteenth International Conference “Material Issues in Design, Manufacturing and Operation of Nuclear Power Plants Equipment”, June 2–6, 2014, St. Petersburg
8. Штроббах Я. И., Чернобаева А. А., Николаев Ю. А., Красиков Е. А. Обоснование содержания фосфора облучаемого сварного шва корпуса реактора Ровенской АЭС-1 для оценки радиационного охрупчивания // История науки и техники. – 2013. – № 8. – С. 119–130.
9. Kohopää J., Ahlstrand R. Re-embrittlement behaviour of VVER-440 reactor pressure vessel weld material after annealing // International Journal of Pressure Vessels and Piping 2000. – N 77. – P. 575–584.
10. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М. Пороговые и предельные значения концентраций примесных элементов в материале корпусов реакторов типа ВВЭР // Вопросы материаловедения. – 2016. – №2 (86). – С. 152–163.
11. Чернобаева А. А., Ерак Д. Ю., Медведев К. И., Красиков Е. А., Дадон М. В., Решетников А. А., Паль Н. В., Кочкин В. Н. Исследование распределения содержания фосфора по толщине сварного соединения корпусов реакторов ВВЭР-440 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2020. – Вып. 3. – С. 47–53.
12. Kolluri M., Kryukov A., Magielsen A. J., Hähner P., Petrosyan V., Sevikyan G., Szaraz Z. Mechanical properties and microstructure of long term thermal aged WWER 440 RPV steel // Journal of Nuclear Materials. – 2017. – V. 486. – P. 138–147.
13. Ерак Д. Ю., Папина В. Б., Чернобаева А. А., Медведев К. И., Журко Д. А. Радиационное охрупчивание материалов корпусов ВВЭР-440 после отжига // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2017. – Вып. 2. – С. 67–78.
14. Valo M., Debarberis L., Kryukov A., Chernobaeva A. Copper and phosphorus effect on residual embrittlement of irradiated model alloys and RPV steels after annealing // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2008. – V. 85. – P. 575–579.
15. Amaev A., Kryukov A., Levit V., Platonov P., Sokolov M. Mitigation of irradiation damage by annealing // Contribution of materials investigation to the resolution of problems encountered in pressurized water reactors, Fontevraud III, 12–16 sep. – 1994, V. 2. – P. 602–609.
16. Amaev, A. Kryukov, M. Sokolov, Recovery of the transition temperature of irradiated WWER-440 vessel metal by annealing, Radiation embrittlement of nuclear reactor pressure vessel steels, An international review (Fourth volume), ASTM STP 1170, Lendell E. Steele, Ed. – Philadelphia, 1993. – P. 369–379.
17. Krasikov E. A. Elemental analysis of the operated and decommissioned nuclear power plant reactor pressure vessel materials by optical emission spectrometer // Progress in analytical chemistry in

the steel and metals industry. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996. – P. 585–589.

УДК 669.295:621.039.531

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В КАСКАДАХ СМЕЩЕНИЙ В ТИТАНЕ

Р. Е. ВОСКОБОЙНИКОВ<sup>1,2</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
115409, Москва, Каширское ш., 31, E-mail: roman.voskoboynikov@gmail.com

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва,  
пл. Академика Курчатова, 1

Поступила в редакцию 20.07.2021

После доработки 8.09.2021

Принята к публикации 17.09.2021

Методом молекулярной динамики смоделированы радиационные повреждения в каскадах смещений, инициированных первично выбитыми атомами (ПВА) с энергией  $E_{PKA} = 5, 10, 15$  и  $20$  кэВ в  $\alpha$ -Ti при температурах 100, 300, 600 и 900 К. Для каждой пары параметров ( $E_{PKA}, T$ ) смоделирована серия из 24 каскадов смещений. Необходимый размер статистической выборки обосновали *a posteriori* при помощи простой процедуры. Получили число пар Френкеля, долю вакансий  $\epsilon_v$  и междоузельных атомов  $\epsilon_i$  в кластерах точечных дефектов в зависимости от значений ( $E_{PKA}, T$ ). Обнаружено, что каскады смещений в  $\alpha$ -Ti вытянуты вдоль траектории высокоэнергетичных ПВА и распадаются на субкаскады. В противоположность другим чистым металлам с плотноупакованной кристаллической структурой в каскадах смещений в  $\alpha$ -Ti выполняется соотношение  $\epsilon_v \geq \epsilon_i$ . Более того, как  $\epsilon_v$ , так и  $\epsilon_i$ , практически не зависят от температуры. Это косвенно указывает на термическую стабильность вакансионных и междоузельных кластеров в  $\alpha$ -Ti в рассмотренном температурном интервале.

**Ключевые слова:**  $\alpha$ -титан, радиационные повреждения, пары Френкеля, кластеры точечных дефектов, каскады смещений, молекулярная динамика

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-216-232

### ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. 13<sup>th</sup> World Conf. on Titanium / Ed. V. Venkatesh, A. L. Pilchak et al. – Hoboken, Wiley, 2015. – 1959 p.
2. Froes F., Qian M., Niinomi M. Titanium for Consumer Applications: Real World Use of Titanium. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – 384 p.
3. Brunette D. M., Tengvall P., Textor M., Thomsen P. Titanium in medicine: materials science, surface science, engineering, biological responses and medical applications // Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 1019 p.
4. Niinomi M. Metals for Biomedical Devices, 2<sup>nd</sup> ed. – Duxford: Woodhead Publishing, 2019. – 596 p.
5. Oshida Y. Bioscience and Bioengineering of Titanium Materials, 2<sup>nd</sup> ed. – Amsterdam: Elsevier, 2012. – 516 p.
6. Jin M., Yao S., Wang L., Qiao Y., Volinsky A. Enhanced bond strength and bioactivity of interconnected 3D TiO<sub>2</sub> nanoporous layer on titanium implants // Surf. Coat. Technol. – 2016. – V. 304. – P. 459–467.
7. Tabie V. M., Li C., Saifu W., Li J., Xu X. Mechanical properties of near alpha titanium alloys for high-temperature applications – a review // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 2020. – V. 92 (4). – P. 521–540.
8. Breeze P. Gas-Turbine Power Generation. – London: Academic Press, 2016 – 104 p.
9. Whittaker M. Titanium in the Gas Turbine Engine // Advances in Gas Turbine Technology. – Chapter 14 / Ed. E. Benini, 2011 – P. 315–336.

10. Muktinutalapati N. R. Materials for Gas Turbines – An Overview // *Advances in Gas Turbine-Technology*. – Chapter 13 / Ed. E. Benini, 2011. – P. 293–314.
11. Donachie M. J. *Titanium, A Technical Guide*, 2<sup>nd</sup> ed. – Cleveland, OH: ASM International, 2000. – 381 p.
12. Gogia A. K. High Temperature Titanium Alloys // *Defence Science Journal*. – 2005. – N 55(2). – P. 149–173.
13. Ушков С. С., Кожевников О. А. Опыт применения и значение титановых сплавов для развития атомной энергетики России // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 59(3). – С. 172–187.
14. Орыщенко А. С., Кудрявцев А. С., Михайлов В. И., Леонов В. П. Титановые сплавы для морской техники и атомной энергетики // *Вопросы материаловедения*. – 2011. – № 65(1). – С. 60–74.
15. Горынин И. В., Рыбин В. В., Ушков С. С., Кожевников О. А. Титановые сплавы как перспективные реакторные материалы // *Радиационное материаловедение и конструктивная прочность реакторных материалов: Юбилейный сборник, посвященный 100-летию акад. И. В. Курчатова и А. П. Александрова*. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2002. – С. 37–45.
16. Boyer R. R. *Titanium and Its Alloys: Metallurgy, Heat Treatment and Alloy Characteristics* // *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, Online – Hoboken, NJ: Wiley, 2010.
17. Bauer S., Schmuki P., Vonder M. K., Park J. Engineering biocompatible implant surfaces Part I: Materials and surfaces // *Prog. Mater. Sci.* – 2013. – N 58. – P. 261–326.
18. Dong H. *Surface engineering of light alloys. Aluminium, magnesium and titanium alloys*. – Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2010 – 680 p.
19. Zeidler H., Boettger-Hiller F., Edelmann J., Schubert A. Surface Finish Machining of Medical Parts Using Plasma Electrolytic Polishing // *Procedia CIRP*. – 2016. – N 49. – P. 83–87.
20. Kemény A., Hajdu I., Károly D., Pammer D. Osseointegration specified grit blasting parameters // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – N 5(13), Part 2. – P. 26622–26627.
21. *Surface Modification of Materials by Ion Implantations for Industrial and Medical Applications*, IAEA-TECDOC-1165, Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000. – 108 p.
22. Nastasi M., Mayer J. W. *Ion Implantation and Synthesis of Materials*. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 263 p.
23. García J. A., Rodríguez R. J. Ion implantation techniques for non-electronic applications // *Vacuum*. – 2011. – N 85. – P. 1125–1129.
24. Rautray T. R., Narayanan R., Kim K.-H. Ion implantation of titanium based biomaterials // *Prog. Mater. Sci.* – 2011. – N 56. – P. 1137–1177.
25. Renk T. J., Buchheit R. G., Sorensen N. R., Cowell S. D., Thompson M. O., Grabowski K. S. Surface treatment and alloying with high-power ion beams to improve properties in Al-, Fe-, and Ti-based metals // *Digest of Technical Papers 11th IEEE International Pulsed Power Conference*. Vol. 1. – New York: IEEE, 1997 – P. 192–197.
26. 21<sup>st</sup> Int. Conf. “Surface Modification of Materials by Ion Beams (SMMIB-2019)”. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University, 25–30 August 2019. – 200 p.
27. Nastasi M., Mayer J. W., Hirvonen J. K. *Ion-Solid interactions: Fundamentals and Applications*. – Cambridge: Cambridge University Press, 1996. – 572 p.
28. Was G. S. *Fundamentals of Radiation Materials Science. Metals and Alloys*. 2<sup>nd</sup> ed. – Amsterdam: Elsevier, 2017 – 1002 p.
29. Cai W., Li J., Uberuaga B. P., Yip S. *Molecular Dynamics* // *Comprehensive Nuclear Materials*. V. 1 (Second Edition) / Ed. R. J. M. Konings, R. E. Stoller. – Amsterdam: Elsevier, 2020. – P. 573–594.
30. Stoller R. E., Zarkadoula E. *Primary Radiation Damage Formation in Solids* // *Comprehensive Nuclear Materials*. Vol. 1 (Second Edition) / Ed. R. J. M. Konings, R. E. Stoller. – Amsterdam: Elsevier, 2020. – P. 620–662.
31. Wooding S. J., Bacon D. J., Phythian W. J. A computer simulation study of displacement cascades in  $\alpha$ -titanium // *Philos Mag A*. – 1995. – V. 72(5). – P. 1261–1279.

32. Zope R. R., Mishin Y. Interatomic potentials for atomistic simulations of the Ti–Al system // *Phys. Rev. B.* – 2003. – N 68. – P. 024102–1–14.
33. Daw M. S., Baskes M. I. Embedded-atom method: Derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals // *Phys. Rev. B.* – 1984. – N 29. – P. 6443–6453.
34. Gärtner K., Stock D., Weber B., Betz G., Hautala M., Hobler G., Hou M., Sarite S., Eckstein W., Jiménez-Rodríguez J. J., Pérez-Martín A. M. C., Andribet E. P., Konoplev V., Gras-Marti A., Posselt M., Shapiro M. H., Tombrello T. A., Urbassek H. M., Hensel H., Yamamura Y., Takeuchi W. Round robin computer simulation of ion transmission through crystalline layers // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* – 1995. – N 102. – P. 183–197.
35. Biersack J. P., Ziegler J. F. Refined universal potentials in atomic collisions // *Nucl. Instr. Meth.* – 1982. – N 194. – P. 93–100.
36. Ziegler J. F., Biersack J. P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Matter // *Treatise on Heavy-Ion Science. Vol. 6: Astrophysics, Chemistry, and Condensed Matter / Ed. D. A. Bromley.* – New York: Springer, 1985 – P. 93–129.
37. Shirley C. G., Chaplin R. L. Evaluation of the Threshold Energy for Atomic Displacements in Titanium // *Phys. Rev. B.* – 1972. – N 5. – P. 2027–2029.
38. Sattonnay G., Rullier-Albenque F., Dimitrov O. Determination of displacement threshold energies in pure Ti and in  $\gamma$ -TiAl alloys by electron irradiation // *J. Nucl. Mater.* – 1999. – V. 275(1). – P. 63–73.
39. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособие. Т. I: Механика. – Изд. 4-е. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 214 с.
40. Фок В. А. Начала квантовой механики. – М.: Наука, 1976. – 376 с.
41. Thermophysical Properties of Mater: The TPRC Data Series. Vol. 12. Thermal Expansion: Metallic Elements and Alloys / Touloukian Y. S. et al. – New York: IFI/Plenum, 1975. – 346 p.
42. Russell A. M., Cook B. A. Coefficient of thermal expansion anisotropy and texture effects in ultra-thin titanium sheet // *Scripta Mater.* – 1997. – V. 37(10). – P. 1461–1467.
43. Ziegler J. F. SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter. URL: <http://www.srim.org/SRIM/SRIMLEGL.htm> (reference date 24.11.2021).
44. Paul H. Nuclear stopping power and its impact on the determination of electronic stopping power // *AIP Conf. Proc.* – 2013. – V. 1525. – P. 309–313.
45. Allen M. P., Tildesley D. J. Computer Simulation of Liquids. – Oxford: Clarendon Press, 1987 – 408 p.
46. Marqués L. A., Rubio J. E., Jaraíz M., Enríquez L., Barbolla J. An improved molecular dynamics scheme for ion bombardment simulations // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* – 1995. – N 102. – P. 7–11.
47. Voskoboinikov R. E., Osetsky Yu. N., Bacon D. J. Statistics of primary damage creation in high-energy displacement cascades in copper and zirconium // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* – 2006. – N 242. – P. 68–70.
48. Voskoboinikov R. An MD study of primary damage formation in aluminium // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* – 2019. – N 460. – P. 86–91.
49. Voskoboinikov R. A contribution of L1<sub>0</sub> ordered crystal structure to the high radiation tolerance of  $\gamma$ -TiAl intermetallics // *Instr. Meth. Phys. Res. B.* – 2019. – N 460. – P. 92–97.
50. Voskoboinikov R. An insight into radiation resistance of D0<sub>19</sub> Ti<sub>3</sub>Al intermetallics // *J. Nucl. Mater.* – 2019. – N 519. – P. 239–246.
51. Voskoboinikov R. MD simulations of primary damage formation in L1<sub>2</sub> Ni<sub>3</sub>Al intermetallics // *J. Nucl. Mater.* – 2019. – N 522. – P. 123–135.
52. Voskoboinikov R. MD simulations of collision cascades in the vicinity of a screw dislocation in aluminium // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* – 2013. – N 303. – P. 104–107.
53. Voskoboinikov R. Interaction of collision cascades with an isolated edge dislocation in aluminium // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* – 2013. – N 303. – P. 125–128.
54. Lindemann P. Über die Berechnung molekularer Eigenfrequenzen // *Physikalische Zeitschrift.* – 1910. – N 11. – P. 609–612.

55. Nordlund K., Averback R. S. Point defect movement and annealing in collision cascades // Phys Rev B. – 1997. – V. 56. – P. 2421–2431.
56. Voskoboinikov R. E., Osetsky Yu. N., Bacon D. J. Computer simulation of primary damage creation in displacement cascades in copper. I. Defect creation and cluster statistics // J. Nucl. Mater. – 2008. – V. 377. – P. 385–395.
57. Norgett L. K., Robinson M. T., Torrens I. M. A proposed method for calculating displacement dose rates // Nucl. Eng. Design. – 1975. – N 33. – P. 50–54.
58. Nordlund K., Sand A. E., Granberg F., Zinkle S. J., Stoller R., Averback R. S., Suzudo T., Maierba L., Banhart F., Weber W. J., Willaime F., Dudarev S., Simeone D. Primary Radiation Damage in Materials: Review of Current Understanding and Proposed New Standard Displacement Damage Model to Incorporate In-cascade Mixing and Defect Production Efficiency Effects. – OECD Nuclear Energy Agency. – Paris: OECD, 2015. – 87p.
59. Broeders C. H. M., Konobeyev A. Yu. Defect production efficiency in metals under neutron irradiation // J. Nucl. Mater. – 2004. – N 328. – P. 197–214.
60. Konobeyev A. Yu., Fischer U., Korovin Yu. A., Simakov S. P. Evaluation of effective threshold displacement energies and other data required for the calculation of advanced atomic displacement cross-sections // Nuclear Energy and Technology. – 2017. – N 3. – P. 169–175.
61. Bacon D. J., Osetsky Yu. N., Stoller R., Voskoboinikov R. E. MD description of damage production in displacement cascades in copper and  $\alpha$ -iron // J. Nucl. Mater. – 2003. – N 323. – P. 152–162.
62. Bacon D. J., Gao F., Osetsky Yu. N. The primary damage state in FCC, BCC and HCP metals as seen in molecular dynamics simulations // J. Nucl. Mater. – 2000. – N 276. – P. 1–12.
63. Voskoboinikov R. Statistics of primary radiation defects in pure nickel // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 2020. – N 478. – P. 201–204.
64. Osetsky Yu., Rodney D. Atomic-Level Dislocation Dynamics in Irradiated Metals // Comprehensive Nuclear Materials. Vol. 1 (Second Edition) / Ed. R. J. M. Konings, R. E. Stoller. – Amsterdam: Elsevier, 2020. – P. 663–688.
65. Voskoboinikov R. E., Osetsky Yu. N., Bacon D. J. Interaction of  $1/3(11\bar{2}0)(0001)$  edge dislocation with point defect clusters created in displacement cascades in  $\alpha$ -zirconium // Mater. Sci. Eng. A. – 2005. – V. 400–401. – P. 49–53.

УДК 669.15–194.56:621.039.531:620.187.24

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И МЕТАЛЛА СВАРНОГО ШВА  
СТАЛИ 08X18H10T ПОСЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ БОР-60  
В ИНТЕРВАЛЕ ПОВРЕЖДАЮЩИХ ДОЗ ОТ 40 ДО 100 СМЕЩЕНИЙ НА АТОМ**

В. С. НЕУСТРОЕВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Д. Е. МАРКЕЛОВ<sup>1</sup>, А. В. ОБУХОВ<sup>1</sup>,  
Б. З. МАРГОЛИН<sup>2</sup>, д-р техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>АО «ГНЦ НИИАР» 433510, Димитровград, Ульяновская обл., Западное шоссе, 9, E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

<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 6.08.2021

После доработки 3.12.2021

Принята к публикации 8.12.2021

Проведены исследования микроструктуры облученных образцов из стали 08X18H10T методом трансмиссионной электронной микроскопии. Образцы из основного металла были облучены в реакторе БОР-60 до доз 43 и 96 сна, из металла сварного шва – до доз 40 и 101 сна при температурах от 330 до 350°C. При исследовании структуры основного металла и металла шва были получены новые данные по количественным микроструктурным характеристикам дислокационных петель, карбонитридов титана, мелкодисперсной G-фазе, порам в облученных образцах в интервале повреждающих доз от 40 до 101 сна.

*Ключевые слова:* сталь 08X18H10T, нейтронное облучение, БОР-60, повреждающая доза, микроструктура, дислокационные петли, вторичные фазы, частицы G-фазы

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2021-108-4-233-243

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Garner F. A. Irradiation Performance of Cladding and Structural Steels in Liquid Metal Reactors // *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment*. – 1994. – V. 10A. – P. 419–543.
2. Lee E. H., Maziasz P. J., Rowcliffe A. F. The structure and composition of phases occurring in austenitic stainless steels in thermal and irradiation environments // *Proceedings of the International Symposium “Phase Stability During Irradiation”*, Pittsburgh, Warrendale, PA. – The Metallurgical Society of AIME, 1981. – P.191–218.
3. Maziasz P. J., McHague C. J. Microstructural evolution in annealed austenitic steels during neutron irradiation // *International Materials Reviews*. – 1987. – V. 32. – P.190–219.
4. Brager H. R., Garner F. A. Microchemical Evolution of Neutron-Irradiated Stainless Steel // *10th International Symposium, ASTM STP 725, American Society for Testing and Materials, Philadelphia*. – 1981. – P. 478–483.
5. Norris D. I. Evolution of Dislocation in Irradiated Austenitic Alloys // *Radiation Effects*. – 1972. – V. 14. – P. 1–12.
6. Бородин О. В., Брык В. В., Воеводин В. Н., Зеленский В. Ф., Неклюдов И. М., Платонов П. В., Неустроев В. С., Шамардин В. К. Исследование микроструктуры стали X18H10T, облученной в реакторе БОР-60 // *Атомная энергия*. – 1991. – Т. 70, вып. 3. – С. 159–163.
7. Borodin O. V., Bryk V. V., Voyevodin V. N., Neklyudov I. M., Shamardin V. K., Neustroev V. S., Microstructural evolution of austenitic stainless steels irradiated in a fast reactor // *17th International Symposium «Effects of Radiation on Materials»*. – ASTM STP 1270, 1996. – P.817–830.
8. Неустроев В. С., Голованов В. Н., Шамардин В. К., Островский З. Е., Печерин А. М. Радиационные явления в стали X18H10T, облученной в различных реакторах при условиях близких к условиям эксплуатации ВКУ ВВЭР // *Сб. докладов Шестой Российской конференции по реакторному материаловедению*. Т. 3, ч. 1. – Димитровград: ГНЦ НИИАР, 2001. – С. 3–23.
9. Неустроев В. С., Дворецкий В. Г., Островский З. Е., Шамардин В. К., Шиманский Г. А. Исследование микроструктуры и механических свойств стали 06X18H10T после облучения в активной зоне реактора ВВЭР-1000 // *ВАНТ. Сер.: ФРП и РМ*. – 2003. – № 3(83). – С. 73–78.
10. Neustroev V. S., Dvoretzky V. G., Ostrovsky Z. E., Shamardin V. K., Shimansky G. A. Investigation of microstructure and mechanical properties of 18Cr–10Ni–Ti steel irradiated in the core of VVER-1000 reactor // *21th International Symposium «Effects of Radiation on Materials»*, ASTM STP 1447.2004. – P. 32–45.
11. Белозеров С. В., Неустроев В. С., Шамардин В. К. Исследование накопления гелия в сталях аустенитного класса для оценки радиационной повреждаемости материалов внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР // *Физика металлов и металловедение*. – 2008. – Т. 106, № 5. – С. 520–526.
12. Porollo S. I., Dvoriashin A. M., Konobeev Yu. V., Ivanov A. A., Shulepin S. V., Garner F. A. Microstructure and mechanical properties of austenitic stainless steel 12X18H9T after neutron irradiation in the pressure vessel of BR-10 fast reactor at very low dose rates // *Journal of Nuclear Materials*. – 2006. – V. 359, N 1–2. – P. 41–49.
13. Porollo S. I., Konobeev Yu. V., Dvoriashin A. M., Vorobjev A. N., Krigan V. M., Garner F. A. Void swelling at low displacement rates in annealed 12X18H9T stainless steel at 4–56 dpa and 280–332°C // *Journal of Nuclear Materials*. – 2002. – V. 307–311, N 1. – P. 339–342.
14. Охрупчивание и трещиностойкость высокооблученных аустенитных сталей для элементов ВКУ ВВЭР. Сообщение 2. Связь радиационного набухания с радиационным охрупчиванием – физические и механические закономерности / Б. З. Марголин, И. П. Курсевич, А. А. Сорокин и др. // *Проблемы прочности*. – 2010. – № 2. – С. 25.
15. Маркелов Д. Е., Обухов А. В., Неустроев В. С. Влияние скорости набора повреждающей дозы на микроструктуру стали марки X18H10T после облучения в реакторе БОР-60 при температуре 330–350°C // *Материалы XI конференции по реакторному материаловедению, посвященная 55-летию отделения реакторного материаловедения АО «ГНЦ НИИАР»*. – 2019. – С. 251-253.

16. Влияние радиационно-индуцированной сегрегации на форму и скорость роста вакансионных пор / А. С. Бакай, О. В. Бородин, В. В. Брык и др. // Труды международной конференции по радиационному материаловедению. Т. 6, Алушта, 22–25 мая. – Харьков, 1990.

17. Влияние кремния на радиационное распухание сплавов и сталей: обзор / В. Н. Воеводин, В. Ф. Зеленский, Б. В. Матвиенко и др. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1988. – 23 с.