

СОДЕРЖАНИЕ

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

*Зисман А. А., Куртеева К. Ю., Новоскольцев Н. С., Петров С. Н., Хлусова Е. И., Яковлева Е. А.* Текстурированный индекс мартенситных и бейнитных сталей для оценки состояния горячедеформированного аустенита перед закалкой ..... 5

*Козлова И. Р., Васильева Е. А., Маркова Ю. М.* Закономерности распада метастабильных фаз в титановых псевдо- $\beta$ -сплавах ..... 17

*Орыщенко А. С., Каштанов А. Д., Бланк Е. Д., Герасимов В. А., Иконников В. К.* Создание реактора пиролиза для утилизации твердых коммунальных отходов ..... 28

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Малецкий А. В., Волкова Г. К., Константинова Т. Е., Беличко Д. Р., Носолев И. К., Дорошкевич А. С., Мезенцева Ж. В., Оксенгендлер Б. Л., Теофилович В., Эрцег Т., Ристич И.* Влияние  $Y_3Al_5O_{12}$  на структурообразование и свойства керамики системы  $Al_2O_3-Y_2O_3$  ..... 33

*Красиков А. В., Меркулова М. В., Михайлов М. С., Петров С. Н.* Наноструктура гальванических покрытий Ni-W, отожженных при различных температурах ..... 46

*Красиков А. В.* Структурные особенности композиционных электрохимических покрытий никель – алмаз ..... 55

*Князюк Т. В., Мухамедзянова Л. В., Яковлева Н. В., Маннинен С. А., Жуков А. С., Бобырь В. В., Кузнецов П. А.* Влияние термической обработки на фазо- и структурообразование и магнитные свойства магнитомягкого сплава 80НХС, изготовленного аддитивной технологией ..... 62

*Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Марголин В. И., Сердюк Н. А., Тупик В. А., Фармаковский Б. В., Хроменков М. В.* Исследование электрической прочности и электросопротивления литых микропроводов в стеклянной изоляции ..... 73

*Быстров Р. Ю., Геращенко Д. А., Геращенко Е. Ю., Каширина А. А., Барковская Е. Н.* Технология нанесения антифрикционного слоя баббита марки Б83, полученного методом холодного газодинамического напыления ..... 78

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Дворянцев Д. Д., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Савелов А. С., Шарко Е. А.* Исследование физико-механических и триботехнических свойств антифрикционного углепластика на основе модифицированной терморективной матрицы ..... 91

**СВАРКА. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

*Старцев Е. А., Григорьев В. В., Бахматов П. В.* Структура и свойства сварного соединения при дуговой сварке низкоуглеродистой стали под слоем флюса, полученного из металлургического шлака электросталеплавильного производства ..... 104

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

*Смирнов В. И., Минкин А. И., Марголин Б. З.* Метод определения трещиностойкости конструкционных материалов при квазихрупком разрушении после стабильного подраста трещины ..... 122

*Филин В. Ю., Мизецкий А. В., Бараков Д. Р., Пегливанова М. М.* Экспериментальные исследования и расчеты распространения трещины при температуре нулевой пластичности судостроительной стали ..... 144

*Пегливанова М. М., Юнёв В. Д., Филин В. Ю.* Разработка методики расчета неопределенности специальных механических характеристик конструкционных сталей ..... 154

**РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

*Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Швецова В. А., Юрченко Е. В.* Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей: связь механизмов охрупчивания и разрушения с характеристиками зарождения и распространения микротрещин. Часть 3. Моделирование

хрупкого разрушения и анализ связи характеристик зарождения и распространения микротрещин с механизмами охрупчивания .....	166
<i>Марголин Б. З., Сорокин А. А., Беляева Л. А.</i> Моделирование радиационного упрочнения нержавеющей ферритно-мартенситных и аустенитных сталей посредством облучения в ионном ускорителе. Часть 1. Разработка методологии выбора режима ионного облучения ферритно-мартенситных сталей .....	187
<i>Марголин Б. З., Сорокин А. А., Беляева Л. А.</i> Моделирование радиационного упрочнения нержавеющей ферритно-мартенситных и аустенитных сталей посредством облучения в ионном ускорителе. Часть 2. Разработка методологии выбора режима ионного облучения аустенитных сталей .....	212
<b>Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов .....</b>	<b>233</b>

УДК 669.15–194:539.22:621.771.016.2

### ТЕКСТУРНЫЙ ИНДЕКС МАРТЕНСИТНЫХ И БЕЙНИТНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННОГО АУСТЕНИТА ПЕРЕД ЗАКАЛКОЙ

А. А. ЗИСМАН, д-р физ.-мат. наук, К. Ю. КУРТЕВА, Н. С. НОВОСКОЛЬЦЕВ,  
С. Н. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук, Е. А. ЯКОВЛЕВА, канд. техн. наук

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49. E-mail: nrc3@crism.ru*

Поступила в редакцию 19.10.2023

После доработки 4.12.2023

Принята к публикации 8.12.2023

Путем варьирования режимов горячей прокатки и термической обработки получены рекристаллизованное и деформированное состояния бывшего аустенита среднеуглеродистой мартенситной стали и низкоуглеродистой бейнитной стали. Для оценки состояния бывшего аустенита перед закалкой предложен скалярный текстурный индекс, определяемый с учетом межфазного ориентационного соотношения по данным дифракции электронов обратного рассеяния (ДОРЭ). Деформированное и рекристаллизованное состояния различаются по знаку индекса, тогда как его величина отражает интенсивность соответствующей текстуры в зависимости от режима горячей прокатки. Эффективность предложенного подхода подтверждена на среднеуглеродистой мартенситной стали, подвергнутой горячей прокатке в лабораторных условиях, а также на промышленном листовом прокате низкоуглеродистой бейнитной стали.

**Ключевые слова:** мартенсит, бейнит, высокопрочная сталь, бывший аустенит, фазовое превращение, ДОРЭ, текстура прокатки, текстура рекристаллизации, текстурный индекс

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-117-1-05-16

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bernier N., Bracke L., Malet L., Godet S. Crystallographic reconstruction of the effect of finish hot rolling temperature on the variant selection during bainite transformation in C–Mn high-strength steels // *Metall. Mater. Trans.* – 2014. – 45A. – P. 5937-5955. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2553-1>
2. Zhao H., Palmiere E. J. Influence of cooling rate on the grain-refining effect of austenite deformation in a HSLA steel // *Mater. Charact.* – 2019. – V. 158. – P. 109990. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109990>
3. Guo H., Feng X., Zhao A., Li Q., Chai M. Effects of ausforming temperature on bainite transformation kinetics, microstructures and mechanical properties in ultra-fine bainitic steel // *J. Mater. Res. Technol.* – 2020. – V. 9. – P. 1593-1605. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.085>
4. Mirzaei A., Ghaderi R., Hodgson P.D., Ma X., Rohrer G.S., Beladi H. The influence of parent austenite characteristics on the intervariant boundary network in a lath martensitic steel // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2022. – N 57. – P. 8904–8923. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07204-w>

© 2024

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

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

5. Куртева К. Ю., Яковлева Е. А., Федосеев М. Л., Зисман А. А., Хлусова Е. И. Влияние режима горячей деформации на текстуру, микроструктуру и механические свойства бейнитной стали после закалки с прокатного нагрева с отпуском // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 4 (116). – С. 20–31.
6. Miyamoto G., Iwata N., Takayama N., Furuhashi T. Reconstruction of parent austenite grain structure based on crystal orientation map of bainite with and without ausforming // ISIJ Int. – 2011. – N 51. – P. 1174–1178. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1174>.
7. Abbasi M., Nelson T.W., Sorensen C.D., Wei L. An approach to prior austenite reconstruction // Mater. Charact. – 2012. – N 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2012.01.010>
8. Abbasi M., Dong-Ik Kim, Nelson T.W. EBSD and reconstruction of pre-transformation microstructures, examples and complexities in steels // Mater. Charact. – 2014. – N 95. – P. 219–231. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.06.023>
9. Huang C.Y., Ni H.C., Yen H. W. New protocol for orientation reconstruction from martensite to austenite in steels // Materialia. – 2020. – N 9. – P. 100554. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100554>
10. Hielscher R., Nyssönen T., Niessen F., Gazder A.A., The variant graph approach to improved parent grain reconstruction // Materialia. – 2022. – V. 22. – P. 101399. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101399>
11. Kumar S., Manda S., Giri S.K., Kundu S., Karagadde S., Balamuralikrishnan R., Murty S.V.S.N., Anoop C.R., Samajdar I. Relating martensite variant selection with prior austenite micro-structure: A coupled study of experiments and pixel-by-pixel reconstruction // Mater. Charact. – 2023. – V. 199. – P. 112822. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112822>
12. Kurdjumov G., Sachs Z. Über den Mechanismus der Stahlhärtung, Zeitschrift für Physic. – 1930. – N 64. – P. 325–343.
13. Greninger A. B., Troyano A. R. The mechanism of martensite formation // Metals Trans. – 1949. – N 185. – P. 590–598.
14. Nishiyama Z. Lattice distortion and atomic displacements during the fcc/bcc martensitic transformation // Sci. Rep. Tohoku Imper. Univ. – 1934. – V. 23. – P. 637–644.
15. Zolotarevsky N. Y., Panpurin S. N., Zisman A.A., Petrov S. N. Effect of ausforming and cooling condition on the orientation relationship in martensite and bainite of low carbon steels // Mater. Charact. – 2015. – V. 107. – P. 278–282. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.07.023>
16. Nyssönen T., Isakov M., Peura P., Kuokkala V. T. Iterative determination of the orientation relationship between austenite and martensite from a large amount of grain pair misorientations // Metall. Mater. Trans. – 2016. – V. 47A. – P. 2587–2590. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3462-2>
17. Brust A. F., Payton E. J., Sinha V., Yardley V. A., Niezgodka S. R. Characterization of martensite orientation relationships in steels and ferrous alloys from EBSD data using bayesian inference // Metall. Mater. Trans. – 2020. – V. 51A. – P. 142–143. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05514-4>
18. Brown E. L., Deardo A. J. On the origin of equiaxed austenite grains that result from the hot rolling of steel, Metall. Trans. 12A (1981) 39–47. <https://doi.org/10.1007/BF02648506>
19. Jonas J. J. Transformation textures associated with steel processing // Microstructure and texture in steels/ Eds. Haldar A. and Suwas S. – Springer, New York, 2009. – P. 3–16.
20. Eres-Castellanos A., Morales-Rivas L., Jimenez J. A., Caballero F. G., Garsia-Mateo C. Effect of ausforming on the macro- and micro-texture of bainitic microstructures // Metall. Mater. Trans. – 2021. – N 52A. – P. 4033–4052. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06363-w>
21. Winkelmann A., Nolze G., Cios G., Tokarski T., Bala P. Refined calibration model for improving the orientation precision of electron backscatter diffraction maps // Materials. – 2020. – N. 13. – P. 2816. <https://doi.org/10.3390/ma13122816>
22. Bain E. C. The nature of martensite // Trans. AIME. – 1924. – N 70. – P. 25–46.
23. Morsdorf L., Tazan C. C., Ponge D., Raabe D. 3D structural and atomic-scale analysis of lath martensite: Effect of the transformation sequence // Acta Mater. – 2015. – N 95. – P. 366–377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2015.05.023>

24. Chakraborty A., Webster R. F., Primig S. Lath martensite substructure evolution in low-carbon microalloyed steels // J. Mater. Sci. – 2022. – V. 57. – P. 10359–10378. [https://doi.org/ 10.1007/s10853-022-07275-9](https://doi.org/10.1007/s10853-022-07275-9)

25. Shibata A., Miyamoto G., Morito Sh., Nakamura A., Moronaga T., Kitano H., Gutierrez-Urrutia I., Hara T., Tsuzaki K. Substructure and crystallography of lath martensite in as-quenched interstitial-free steel and low-carbon steel // Acta Mater. – 2023. – N 246. – P. 118675. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118675>

26. Cayron C., Baur A., Logé R. Intricate morphologies of laths and blocks in low-carbon martensitic steels // Materials and Design. – 2018. – N 154. – P. 81–95. <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>

27. Князюк Т. В., Новоскольцев Н. С., Зисман А. А., Хлусова Е. И. Влияние микролегирования ниобием на кинетику статической и динамической рекристаллизации при горячей прокатке среднеуглеродистых высокопрочных сталей // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 1 (101). – С. 5–15.

28. Engler O., Randle V. Introduction to texture analysis: Macrotexture, microtexture, and orientation mapping. – Taylor and Francis group, Abingdon-on-Thames, 2010. – 488 pp. <https://doi.org/10.1201/9781420063660>

29. Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1968. – 1171 с.

УДК 669.295:621.78

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПАДА МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ФАЗ В ТИТАНОВЫХ ПСЕВДО- $\beta$ -СПЛАВАХ

И. Р. КОЗЛОВА, канд. техн. наук, Е. А. ВАСИЛЬЕВА, Ю. М. МАРКОВА

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

Поступила в редакцию 19.01.2024

После доработки 6.02.2024

Принята к публикации 13.02.2024

Представлены результаты исследования процесса распада метастабильной фазы в титановом псевдо- $\beta$ -сплаве. Рассмотрены основные закономерности эволюции структуры и фазового состава высоколегированного сплава титана с термически нестабильной  $\beta$ -фазой в зависимости от режима термической обработки. Показано влияние температуры изотермической выдержки на морфологию и степень рекристаллизации выделяющейся фазы. Результаты исследования свидетельствуют о том, что низкотемпературный распад метастабильной  $\beta$ -фазы в исследуемом сплаве приводит к его охрупчиванию.

**Ключевые слова:** высокопрочный титановый псевдо- $\beta$ -сплав, упрочняющая термическая обработка, структура, микротвердость, равновесное состояние, термический цикл сварки

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-17-27

## ЛИТЕРАТУРА

1. Носова Г. И. Фазовые превращения в сплавах титана. – М.: Metallurgy, 1968. – 181 с.
2. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Metallurgy, 1974. – 368 с.
3. Польшин И.С. Упрочняющая термическая обработка титановых сплавов. – М.: Metallurgy, 1984. – 96 с.
4. Каспарова О. В., Гельман А. А., Польшин И. С., Колодкин Н. И., Корнилова Л. С. Термическая обработка сплава VT22 // Технология легких сплавов. – 1980. – № 6. – С. 102–105..
5. Моисеев В. Н., Куликов Ф. Р., Кириллов Ю. Г., Шолохова Л. В., Васькин Ю. В. Сварные соединения титановых сплавов (структура и свойства). – М.: Metallurgy, 1978. – 248 с.

6. Михайлов В. И., Козлова И. Р., Кузнецов С. В., Маркова Ю. М., Васильева Е. А. Структурно-фазовые превращения при сварке высоколегированного сплава титана // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 3 (107). – С. 63–81.
7. Полуфабрикаты из титановых сплавов / Александров В. К., Аношкин Н. Ф., Бочвар Г. А. и др. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
8. Хорев А. И. Термическая, термомеханическая обработка и текстурное упрочнение свариваемых титановых сплавов // Сварочное производство. – 2012. – № 10. – С. 11–20.
9. Хорев А. И. Основы легирования и термической обработки сварных соединений титановых бета-сплавов // Сварочное производство. – 2012. – № 3. – С. 31–39.
10. Щетников Н. В., Саватеева Г. В., Илларионов А. Г. Распад метастабильного бета-твердого раствора в высокопрочном титановом сплаве при старении // Сб. докл. междунар. конф. «Титан 2006 в СНГ», Суздаль, 2006. – С. 224–229.
11. Чечулин Б. Б., Ушаков С. С., Разуваева И. Н., Гольдфайн В. Н. Титановые сплавы в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977.
12. Семенова Н. М. Электронно-микроскопическое исследование структуры титановых сплавов с метастабильной бета-фазой // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1972.
13. Шоршоров М. Х., Куликов Ф. Р., Кириллов Ю. Г., Мещеряков В. Н. Влияние сварки и термообработки на структуру и свойства высокопрочных сплавов титана // Сплавы титана с особыми свойствами. – М.: Наука, 1982. – С. 87–96.
14. Козлова И. Р., Чудаков Е. В., Третьякова Н. В., Маркова Ю. М., Васильева Е. А. Влияние термической обработки на формирование структуры и уровень механических свойств высоколегированного сплава титана // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 4 (100). – С. 28–41.

УДК 628.475.7

## СОЗДАНИЕ РЕАКТОРА ПИРОЛИЗА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

А. С. ОРЫЩЕНКО<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. Д. КАШТАНОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Е. Д. БЛАНК<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
В. А. ГЕРАСИМОВ<sup>1</sup>, В. К. ИКОННИКОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

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

*АО РНЦ «Прикладная химия», 193232, Санкт-Петербург, ул. Крыленко, 26а. E-mail: [giph@giph/su](mailto:giph@giph/su)*

Поступила в редакцию 22.12.2023

После доработки 22.12.2023

Принята к публикации 10.01.2024

С целью утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) создан опытный образец реактора для их термической переработки с использованием материалов, разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», отработана технология разложения ТКО в реакторе, проведены его испытания. Результаты испытаний позволили сделать вывод о перспективности использования реакторов пиролиза для утилизации, обеспечивающих экологическую безопасность процесса и получение высокотемпературного газа (1000–1200°С), пригодного для дальнейшего использования в энергетических установках. Были определены технические требования для разработки промышленного реактора энерготехнологического комплекса для утилизации ТКО производительностью до 10 т/ч с учетом выявленных в процессе испытаний опытного образца недостатков.

*Ключевые слова:* твердые коммунальные отходы, утилизация, реактор пиролиза, термическая переработка, высокотемпературный газ, технические требования

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-28-32

## ЛИТЕРАТУРА

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Обезвреживание отходов термическим способом (сжигание отходов). – М.: Федеральное Агентство по техническому регулированию и метрологии (Бюро НТД), 2015.

© 2024

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

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

2. Экспериментальные исследования пиролиза и газификации ТБО различного морфологического состава, включающего хлор и серосодержащие компоненты, методом термобарохимической деструкции / В. К. Иконников и др. – СПб.: ФГУП «РНЦ «Прикладная химия», 2014. – С. 133.

3. Иконников В. К., Горьков В. М. Автономные транспортные модульные энергоустановки для переработки твердых бытовых отходов (ТБО) // Сб. докл. VIII Невского международного экологического конгресса. Дополнительные материалы. – СПб., 2017. – С. 84–90.

4. Орыщенко А. С., Уткин Ю. А. Структура и механические свойства жаростойкого сплава 45Х26Н33С2Б2 и металла его сварных соединений при высоких температурах // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 19–25.

5. Орыщенко А. С. Конструкционные материалы для радиантных змеевиков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 5. – С. 44–47.

УДК 666.3–187:661.862'022

### ВЛИЯНИЕ $Y_3Al_5O_{12}$ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА КЕРАМИКИ СИСТЕМЫ $Al_2O_3 - Y_2O_3$

А. В. МАЛЕЦКИЙ<sup>1,2</sup>, Г. К. ВОЛКОВА<sup>1</sup>, Т. Е. КОНСТАНТИНОВА<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, Д. Р. БЕЛИЧКО<sup>1</sup>, И. К. НОСОЛЕВ<sup>1</sup>, А. С. ДОРОШКЕВИЧ<sup>2,3</sup>, Ж. В. МЕЗЕНЦЕВА<sup>2</sup>, Б. Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР<sup>4</sup>, В. ТЕОФИЛОВИЧ<sup>5</sup>, Т. ЭРЦЕГ<sup>5</sup>, И. РИСТИЧ<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина», 83114, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72А. E-mail: sashamalecki097@gmail.com

<sup>2</sup>Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований», 141980, Дубна, Московская область, ул. Жолио Кюри, д. 6

<sup>3</sup>Государственный университет «Дубна», 141982, Дубна, Московская область, Университетская ул., 19

<sup>4</sup>Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН Узбекистана, 100084, Ташкент, ул. Чингиз Айтматов, 2Б

<sup>5</sup>University of Novi Sad, Faculty of Technology Novi Sad, 21000 Novi Sad, Serbia

Поступила в редакцию 5.12.2023

После доработки 8.12.2023

Принята к публикации 22.12.2023

Представлены результаты исследования структуры и физико-механических свойств керамик составов  $\alpha-Al_2O_3 + nY_2O_3$  ( $n = 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5$  мас. %), полученных на основе полиморфных модификаций  $\gamma+\theta-Al_2O_3$ , в зависимости от концентрации легирующей примеси  $Y_2O_3$  и температуры отжига порошковых смесей (800 и 900°C). Обнаружен эффект защиты от кристаллизации, заключающийся во взаимном торможении кристаллизационных процессов в порошках системы  $Al_2O_3-Y_2O_3$ . Методом рентгеноструктурного анализа установлено наличие в керамике фазы иттрий-алюминиевого граната  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG). Выявлена зависимость механических характеристик исследуемых материалов от количества и размера зерен образовавшейся фазы YAG.

**Ключевые слова:** оксид алюминия, оксид иттрия, полиморфные модификации, иттрий-алюминиевый гранат, структура, физико-механические характеристики

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-33-45

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бордина Г. Е., Лопина Н. П., Некрасова Е. Г., Бигина Ю. В., Сухарева Д. Д. Материалы будущего. – 2018. – № 2 (68). – С. 11–12.

2. Kant T., Shrivastava K., Dewangan K., Kumar A., Jaiswal N.K., Deb M.K., Pervez S. Design and development of conductive nanomaterials for electrochemical sensors: a modern approach // Materials Today Chemistry. – 2022. – V. 24. DOI.org/10.1016/j.mtchem.2021.100769.

3. Zhu C. Zh., Yang G. H., Li H., Du D., Lin Y. Electrochemical Sensors and Biosensors Based on Nanomaterials and Nanostructures // *Analytical Chemistry*. – 2015. – N 87(1). – P. 230–249. DOI: 10.1021/ac5039863.
4. Luo X., Morrin A., Killard A. J., Smyth M. R. Application of Nanoparticles in Electrochemical Sensors and Biosensors. – 2006. – N 18(4). – P. 319–326. DOI:10.1002/elan.200503415.
5. Shrivastava K., Ghosale A., Bajpai P. K., Kant T., Dewangan Kh., Shankar R. Advances in flexible electronics and electrochemical sensors using conducting nanomaterials: A review // *Microchemical Journal*. – 2020. – V. 156. DOI.org/10.1016/j.microc.2020.104944.
6. Baig N., Kammakam I., Falath W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges // *Materials Advances*. – 2021. – N 2. – P. 1821–1871. DOI: 10.1039/d0ma00807a.
7. Wahsh M. M. S., Khattab R. M., Awaad M. Thermo-mechanical properties of mullite/zirconia reinforced alumina ceramic composites // *Materials & Design*. – 2012. – V. 41. – P. 31–36. DOI.org/10.1016/j.matdes.2012.04.040.
8. García Ferré F., Mairov A., Ceseracciu L., Serruys Y., Trocellier P., Baumier C., Kaïtasov O., Brescia R., Gastaldi D., Vena P., Beghi M. G., Beck L., Sridharan K., Di Fonzo F.. Radiation endurance in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoceramics // *Scientific Reports*, 2016, DOI:10.1038/srep33478.
9. Maletskiy A. V., Belichko D. R., Konstantinova T. E., Volkova G. K., Doroshkevich A. S., Lyubchik A. I., Burkhovetskiy V. V., Aleksandrov V. A., Mardare D., Mita C., Chicea D., Khiem L.H. Structure formation and properties of corundum ceramics based on metastable aluminium oxide doped with stabilized zirconium dioxide // *Ceramics International*. – 2021. – V. 47, Is. 14. – P. 19489–19495. DOI:10.1016/j.ceramint.2021.03.286.
10. Maletskiy A. V., Konstantinova T. E., Volkova G. K., Belichko D. R., Doroshkevich A. S., Popov E., Cornei N., Jasinska B., Mezentseva Zh. V., Tatarinova A. A., Mirzayev M. N., Khiem L.H., Ristić I., Teofilović V., Balvanović R. High hydrostatic pressure influence on the properties and tendency to agglomeration of ZrO<sub>2</sub> grains of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–YSZ composite ceramics system // *Ceramics International*. – 2023. – V 49, Is. 10. – P. 16044–16052. DOI.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.202.
11. Green D. J. Transformation toughening and grain size control in β"-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> composites // *J. Mater Sci*. – 1985. – N 20. – P. 2639–2646. DOI.org/10.1007/BF00556096.
12. Azar M., Palmero P., Lombardi M., Garnier V., Montanaro L., Fantozzi G., Chevalier J. Effect of initial particle packing on the sintering of nanostructured transition alumina // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2008. – V. 28, Is. 6. – P. 1121–1128. DOI.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.10.003.
13. Vovk O., Siryk Y., Nizhankovskiy S., Fedorov A., Mateichenko P. Morphology and microstructure of crystalline YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites grown by the horizontal directional crystallization // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – V. 934. DOI.org/10.1016/j.jallcom.2022.168004.
14. Li L., Xie F., Wu X., He J., Li Sh. Microstructure and phase formation of atmospheric plasma sprayed YAG coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – V. 466. DOI.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129614.
15. Глушкова В. Б., Кржижановская В. А., Егорова О. Н., Удалов Ю. П., Качалова В. П. Взаимодействие оксидов иттрия и алюминия // *Изв. АН СССР. Неорганические материалы*. – 1983. – Т. 19, № 1. – С. 95–99.
16. Лукин Е. С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой структурой // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 1997. – № 9. – С. 13–18.
17. Danilenko I., Prokhorenko S., Konstantinova T., Ahkozov L., Burkhovetski V., Glazunova V. Effect of small amount of alumina on structure, wear and mechanical properties of 3Y–TZP ceramics // *World Journal of Engineering*. – 2014. – Т. 11. – P. 9–16.
18. Стрекаловский В. Н., Полежаев Ю. М., Пальгугев С. Ф. Оксиды с примесной разупорядоченностью: состав, структура, фазовые превращения / Под ред. А. Д. Неуймина. – М.: Наука, 1987.

19. Прилуцкая Е. В., Протасов А. С., Сенина М. О., Лемешев Д. О. Фазовые переходы в системе иттрий-алюминиевый гранат – оксид скандия и перспективы получения высокоплотной керамики // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – V. 36, N 3 (252). – С. 127–129.

20. Bondar I.A., Koroleva L.N., Bezruk E.T. Physicochemical properties of yttrium aluminates and gallates // Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorg. Mater. – 1984. – V. 20, N 2. – P. 257–261.

21. Ермоленко Н.Ф., Эфрос М. Д., Ермоленко Е.Н. Влияние соосаждения гелей на структуру и сорбционные свойства получаемых из них оксидных катализаторов // Изв. АН БССР. Серия технических наук. – 1968. – № 1. – С. 1678–1687.

22. Андерсон Дж. Структура металлических катализаторов. – М.: Мир, 1973. – С. 55.

УДК 621.793.3:621.357

## НАНОСТРУКТУРА ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ Ni–W, ОТОЖЖЕННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. В. КРАСИКОВ, канд. хим. наук, М. В. МЕРКУЛОВА, М. С. МИХАЙЛОВ,  
С. Н. ПЕТРОВ, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 6.05.2024

После доработки 21.05.2024

Принята к публикации 22.05.2024

Методом просвечивающей электронной микроскопии исследована кристаллизация при термообработке интерметаллических фаз в покрытии системы Ni–W с 44 мас. % вольфрама. Аморфное в исходном состоянии, покрытие кристаллизуется по различным механизмам в зависимости от температуры. Структура полученных покрытий близка к структуре классических композиционных электрохимических покрытий. Исследование структуры покрытий, отожженных по разным режимам, позволило установить условия термообработки для формирования структуры, обеспечивающей максимальную микротвердость.

*Ключевые слова:* покрытие Ni–W, термообработка, гальванические покрытия, интерметаллиды, наноструктура, просвечивающая электронная микроскопия, композиционные электрохимические покрытия

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-46-54

### ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов А. Л., Полушин Н. И., Овчинникова М. С., Кучина И. Ю. Исследование наноалмазного порошка и композиционных электрохимических покрытий, упрочненных нанодисперсными алмазами // Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 65–68.

2. Shi L., Sun Ch., Gao P., Zhou F., Li W. Mechanical properties and wear and corrosion resistance of electrodeposited Ni–Co/SiC nanocomposite coating // Applied surface science. – 2006. – V. 252, Is. 10. – P. 3591–3599.

3. Garcia I., Fransaer J., Celis J. P. Electrodeposition and sliding wear resistance of nickel composite coatings containing micron and submicron SiC particles // Surface and Coatings Technology. – 2001. – V. 148, N. 2–3. – P. 171–178.

4. Younes O., Zhu L., Rosenberg Y., Shacham-Diamand Y., Gileadi E. Electroplating of Amorphous Thin Films of Tungsten/Nickel Alloys // Langmuir. – 2001. – N 17. – P. 8270–8275.

5. Younes-Metzler O., Zhu L., Gileadi E. The anomalous codeposition of tungsten in the presence of nickel // Electrochimica Acta. – 2003. – N. 48. – P. 2551–2562.

6. Trelewicz J. R., Schuh C. A. Hot Nanoindentation of Nanocrystalline Ni–W Alloys // Scripta Materialia. – 2009. – V. 61. – P. 1056–1059.

7. Tsyntsar N., Cesiulis H., Donten M., Sort J., Pellicer E., Podlaha-Murphy E. J. Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2012. – V. 48, N 6. – P. 491–520.

© 2024

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

Научно-технический журнал  
«Вопросы материаловедения»

8. Eliaz N., Gileadi E. Induced Codeposition of Alloys of Tungsten, Molybdenum and Rhenium with Transition Metals // *Modern Aspects of Electrochemistry*. – 2008. – N. 42. – P. 191–301.
9. Younes O., Gileadi E. Electrodeposition of High Tungsten Content Ni/W Alloys // *Electrochemical and Solid-State Letters*. – 2000 – V. 12, N. 3 – P. 543–545.
10. Oue S., Nakano H., Kobayashi S., Fukushima H., Structure and Codeposition Behavior of Ni–W Alloys Electrodeposited from Ammoniacal Citrate Solutions // *J. Electrochem. Soc.* – 2009. – V. 156. – P. D17–D22.
11. Brenner. A., Burkhead P., Seegmiller E. Electrodeposition of tungsten alloys containing iron, nickel and cobalt // *Journal of research of the national bureau of standards*. – 1947. – V. 39. – P. 351–383.
12. Васько А.Т. Электрохимия молибдена и вольфрама. – Киев: Наукова думка, 1977. – 172 с.
13. Allahyarzadeh M. H., Aliofkhazraei M., Rezvanian A. R., Torabinejad V., Sabour Rouhaghdam A. R. Ni–W electrodeposited coatings: Characterization, properties and applications // *Surface & Coatings Technology*. – 2016. – N 307. – P. 978–1010.
14. Меркулова М. В., Красиков А. В., Михайлов М. С. Влияние режимов термообработки на структуру и микротвердость нанокпозиционного покрытия Ni–W // *Вопросы материаловедения*. – 2022. – № 4(112) . – С. 182–190.
15. Schlossmacher P., Yamasaki T. Structural Analysis of Electroplated Amorphous-Nanocrystalline Ni–W // *Microchim. Acta*. – 2000. – N. 132. – P. 309–313.

УДК 621.793.3:[669. 248+666.233]:666.792

## СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЬ – АЛМАЗ

А. В. КРАСИКОВ, канд. хим. наук

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

Поступила в редакцию 31.01.2024

После доработки 8.02.2024

Принята к публикации 13.02.2024

Проведено исследование структуры никель-алмазных композиционных электрохимических покрытий, полученных из электролита-суспензии с алмазным порошком АСМ 7/5. При содержании алмазного порошка в электролите 10 г/л осаждаются покрытия с равномерным распределением армирующей фазы и объемной долей алмаза до 20%. Исследованиями структуры никелевой матрицы покрытия выявлено, что по сравнению со стандартным гальваническим никелем, который обладает ярко выраженной текстурой, матрица композиционного покрытия имеет мелкодисперсную структуру с хаотичной ориентировкой зерен. Сравнительные измерения нанотвердости позволили зафиксировать упрочнение матрицы композиционных покрытий по сравнению с гальваническим никелем. Наряду с высокой твердостью армирующей компоненты и относительно крупным размером частиц это обуславливает высокую микротвердость композиционного покрытия, которая составляет в среднем 860 НВ.

*Ключевые слова:* композиционные электрохимические покрытия, никель – алмаз, электролит-суспензия, исследования структуры, нанотвердость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-55-61

### ЛИТЕРАТУРА

1. Huang Ch. A., Yang Sh. W., Shen Ch. H., Cheng K. Ch., Wang H., Lai P. L. Fabrication and evaluation of electroplated Ni – diamond and Ni – B – diamond milling tools with a high density of diamond particles // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Т. 104. – С. 2981–2989.
2. Яскельчик В. В., Жарский И. М., Буркат Г. К., Черник А. А., Михедова Е. В. Получение и свойства медных покрытий из цитратного электролита в присутствии ультрадисперсных алмазов // *Известия СПбГТИ (ТУ)*. – 2015. – № 28. – С.25–28.

3. Исаев А. В., Жирнова Т. А., Михаленко М. Г., Исаев В. В., Бакаев В. В. Влияние ультрадисперсных алмазов на катодное осаждение серебра // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. – 2014. – № 2 (104). – С. 231–240.
4. Кузьмар И. И., Вакульчик В. А., Кушнер Л. К., Хмыль А. А. Оптимизация условий электроосаждения композиционных покрытий олово – ультрадисперсный алмаз // Доклады БГУИР. – 2011. – № 6(60). – С. 34–38.
5. Галевский Г. В., Руднева В. В., Гарбузова А. К. Электроосаждение, структура и свойства композиционного покрытия никель — карбид титана // Материаловедение. Энергетика. – 2015. – № 1 (214). – С. 154–164.
6. Wang Sh.-Ch., J. Wei W.-Ch. Kinetics of electroplating process of nano-sized ceramic particle/Ni composite // Materials Chemistry and Physics. – 2003. – V. 78. – P. 574–580.
7. Fink C. G., Prince J. D. The codeposition of copper and graphite. // Trans. Am. Electrochem. Soc. – 1928. – V. 54. – P. 315–321.
8. Krasikov A. V., Agafonov D. V., Markov M. A., Belyakov A. N., Kravchenko I. N., Galinovskii A. L., Kuznetsov Yu. A. Electrodeposition of Ni–SiC composite coating from a vibration-stabilized electrolyte-suspension // Russian Metallurgy (Metally). – 2023. – V. 2023. – N. 6. – P. 796–802.
9. Krasikov A. V., Markov M. A., Krasikov V. L., Kravchenko I. N., Staritsyn M. V., Bykova A. D., Belyakov A. N. Influence of vibration parameters during electrodeposition of Ni–SiC composite coatings from a vibration stabilized suspension // Journal of machinery manufacture and reliability. – 2022. – V. 51, N 4. – P. 300–305.
10. Krasikov A. V., Krasikov V. L., Markov M. A., Kravchenko I. N., Galinovskii A. L., Belyakov A. N., Staritsyn M. V., Bykova A. D. Influence of vibration parameters on the composition of an electrochemical nickel-submicron silicon carbide composite coating // Russian Metallurgy (Metally). – 2023. – V. 2023. – N. 6. – P. 803–808.

УДК 621.762.5:621.318.13:621.785.3

### **ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФАЗО- И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТОМЯГКОГО СПЛАВА 80НХС, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Т. В. КНЯЗЮК, канд. техн. наук, Л. В. МУХАМЕДЗЯНОВА, Н. В. ЯКОВЛЕВА, С. А. МАННИНЕН, А. С. ЖУКОВ, В. В. БОБЫРЬ, П. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49. E-mail: prk-3@mail.ru*

Поступила в редакцию 22.09.2023

После доработки 22.01.2024

Принята к публикации 23.01.2024

Методами световой и электронной микроскопии, рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализов исследована эволюция структуры и фазового состава магнитомягкого сплава 80НХС, изготовленного селективным лазерным сплавлением и отожженного при различных температурах. Установлено, что ослабление структурной анизотропии и рост среднего размера зерна происходит только при температурах 1250°C, что связано с ранее образовавшимися при аддитивном сплавлении оксидами Al, Ti, Si, Mn, Cr и силицидом никеля. Данные фазы обладают высокой термической стабильностью и сдерживают рост зерна, ограничивая магнитную проницаемость сплава. Для достижения необходимого уровня магнитных свойств магнитомягкий сплав 80НХС, изготовленный аддитивным методом, должен подвергаться отжигу при более высоких температурах, чем это указано в ГОСТ 10160–75.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, термическая обработка, селективное лазерное сплавление, размер зерна, фазовый состав, металлический порошок, магнитомягкий сплав, 80НХС, магнитные свойства, структура

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-62-72

## ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин Г. С., Федотов В. В. Исследование свойств магнитных материалов. – М.: ММИТ, 2008.
2. ГОСТ 10160–75. Сплавы прецизионные магнитно-мягкие. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 49 с.
3. Преображенский А. А., Бишард Е. Г. Магнитные материалы и элементы. Учебник. Изд. 3-е. – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.
4. Périgo E. A., Jacimovic J., García Ferré F., Scherf L. M. Additive Manufacturing of Magnetic Materials // Additive Manufacturing. – 2019. – V. 30. – P. 100870, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100870>
5. Additive manufacturing of soft magnetic materials and components / D. Goll et al. // Additive Manufacturing. – 2019. – V. 27. – P. 428–429, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.021>
6. Laser Additive Manufacturing of Magnetic Materials. JOM: the journal of the Minerals / C. Mikler et al. // Metals & Materials Society. – 2017. – V. 3. – P. 532–543, <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2257-2>
7. Tuning the phase stability and magnetic properties of laser additively processed Fe–30%Ni soft magnetic alloys / C. Mikler et al. // Materials Letters. – 2017. – V. 199. – P. 88–92, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.04.054>
8. Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted Fe–6.9%wt Si soft magnets / M. Garibaldi et al. // Materials Characterization. – 2018. – V. 143. – P. 144–151, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.016>
9. Shishkovsky I. V. Peculiarities of selective laser melting process for permalloy powder // Materials Letters. – 2006. – V. 171. – P. 208–211, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.02.099>
10. Zhang B., Fenineche N. E., Liao H., Coddet C. Magnetic properties of in-situ synthesized FeNi<sub>3</sub> by selective laser melting Fe–80%Ni powders // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2013. – V. 336. – P. 49–54, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.02.014>
11. Zhang B., Fenineche N. E., Liao H., Coddet C. Microstructure and Magnetic Properties of Fe–Ni Alloy Fabricated by Selective Laser Melting Fe/Ni Mixed Powders // JMST. – 2013. – V. 29, is. 8. – P. 757–760, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.05.001>
12. Magnetic properties of Fe–Ni permalloy produced by selective laser / A.K. Mazeeva et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – V. 814. – P. 152315, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152315>
13. Composite Structure as a Strengthening Factor of Stainless Austenitic Chromium–Nickel Additive Steel / M. V. Staritsyn, P. A. Kuznetsov, S. N. Petrov et al. // Phys. Metals Metallogr. – 2020. – N 121. – P. 337–343, <https://doi.org/10.1134/S0031918X20040146>.
14. Saedi K., Lofaj F., Kevetkova L., Shen Z. Austenitic stainless steel strengthened by the in-situ formation of oxide nano inclusions // RSC Adv. – 2015. – N 5. – P. 20747–20750.
15. Флемингс М.К. Процессы затвердевания /Пер. с англ. / Под ред. А. А. Жукова и Б. В. Рабиновича. – М.: Мир, 1977.
16. Sames W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R., Babu S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // Int Mater Rev. – 2016. – N 61. – P. 315–360, <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>,
17. Song B., Dong S., Liu Q., Liao H., Coddet C. Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: Microstructure, residual stress and tensile behavior // Mater. Des. – 2014. – N 54. – P. 727–733, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.085>
18. Kanagarajah P., Brenne F., Niendorf T., Maier H. J. Inconel 939 processed by selective laser melting: Effect of microstructure and temperature on the mechanical properties under static and cyclic loading // Mater. Sci. Eng. A. – 2013. – N 588. – P. 188–195, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.09.025>
19. Hengsbach F., Koppa P., Duschik K., Holzweissig M. J., Burns M., Nellesen J., Tillmann W., Tröster T., Hoyer K.-P., Schaper M. Duplex stainless steel fabricated by selective laser melting. Microstructural and mechanical properties // Mater Des. – 2017. – N 133. – P. 136–142, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.046>
20. Suzuki H. Weldability of Modern Structural Steels in Japan // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. – 1983. – N 23. – P. 189–204, <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.189>

21. Liu F., Lin X., Yang G., Song M., Chen J., Huang W. Microstructure and residual stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy // Opt Laser Technol. – 2011. – N 43. – P. 208–213, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.06.015>

22. Bertsch K. M., De Bellefon G. M., Kuehl B., Thoma D. J. Origin of dislocation structures in an additively manufactured austenitic stainless steel 316L // Acta Materialia. – 2020. – N 199. – P. 19–33, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.07.063>

23. Deng P., Yin H., Song M., Li D., Zheng Yu., Prorok B. C., Lou X. On the Thermal Stability of Dislocation Cellular Structures in Additively Manufactured Austenitic Stainless Steels // Roles of Heavy Element Segregation and Stacking Fault Energy. Jom. – 2020. – N 72. – P. 4232–4243, <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04427-7>

24. Жуков А. С., Маннинен С. А., Тит М. А., Князюк Т. В., Кузнецов П. А. Исследование структуры и магнитных свойств аддитивного магнитомягкого сплава 80НХС // Физика металлов и металловедение. – 2023. – № 4. – С. 353–359.

УДК 621.74:621.316.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИТЫХ МИКРОПРОВОДОВ В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Т. И. БОБКОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, В. И. МАРГОЛИН<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
Н. А. СЕРДЮК<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В. А. ТУПИК<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, М. В. ХРОМЕНКОВ<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» 197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, д. 5. E-mail: [info@etu.ru](mailto:info@etu.ru)

Поступила в редакцию 21.12.2023

После доработки 24.01.2024

Принята к публикации 25.01.2024

Приведены результаты комплексного исследования электрической прочности стеклянной изоляции и электросопротивления литых микропроводов в изоляции из боросиликатных стекол в диапазоне температур от –60 до 155°C.

**Ключевые слова:** литой микропровод, стеклянная изоляция, электрическая прочность, электросопротивление, пробивная напряженность, положительные температуры, отрицательные температуры

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-73-77

### ЛИТЕРАТУРА

1. Литой микропровод и его свойства / Е. Я. Бадинтер и др. – Кишинев: Изд-во «Штиинца», 1973. – 317 с.

2. Литой микропровод и его применение в науке и технике / Под ред. Д. В. Гицу. – Кишинев: Изд-во «Штиинца», 1988. – 424 с.

3. Масайло Д. В., Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Высокопрочные литые микропровода для армирования конструкционных композитов // Металлообработка. – 2012. – № 4 – С. 23–27.

4. Горынин И. В., Фармаковский Б. В. Длинномерные литые микропровода в стеклянной изоляции с жилкой из интерметаллических соединений // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 4(84). – С. 58–61.

5. Батаев А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. – М.: Логос, 2006. – 496 с.

6. Милейко С. Т., Келли А. Композиты сегодня. Ч. 2: Композиты с металлической матрицей // Композиты и наноструктуры. – 2021. – Т. 13, № 3–4 (51–52). – С. 59–107.

7. Бурханов Г. С., Бурханов Ю. С. Современные подходы к созданию функциональных материалов // Материаловедение. – 2008. – № 3. – С. 184–190.

**ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННОГО СЛОЯ БАББИТА МАРКИ Б83,  
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Р. Ю. БЫСТРОВ, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, д-р техн. наук, Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА, А. А. КАШИРИНА,  
Е. Н. БАРКОВСКАЯ

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

Поступила в редакцию 26.12.2023

После доработки 18.01.2024

Принята к публикации 20.01.2024

Рассмотрен технологический процесс получения антифрикционного слоя из баббита, нанесенного методом холодного газодинамического напыления на установке ДИМЕТ-403 на подшипники скольжения, используемые на судовых мало- и среднеоборотных дизелях, турбинах, валопроводах. Рассматриваются также технические требования к материалам антифрикционного слоя, типовым технологическим процессам подготовки, напыления, термообработки, контролю качества.

*Ключевые слова:* холодное газодинамическое напыление, микротвердость, адгезия, баббит, подшипники скольжения

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-118-2-78-90

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Алифанов А. В. Разработка и исследование модифицированного баббитового материала с целью использования его при ремонте тяжело нагруженных подшипников скольжения // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (66). – С. 83–86.

2. Oryshchenko A. S., Gerashchenkov D. A. Aluminum matrix functional coatings with high micro-hardness 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>.

3. 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>.

4. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Машек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 1 (77). – P. 87–96.

5. Bystrov R. Yu., Gerashchenkov D. A. Coating of a multicomponent system Al–Cr–Ni–Co–Fe on a steel substrate obtained by laser // Inorganic Materials: Applied Research. – 2022. – December, N 13. – P. 1569–1574. DOI: 10.1134/S2075113322060065.

6. Чудина О. В. Комбинированные технологии поверхностного упрочнения конструкционных сталей // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: Моск. гос. автомобильно-дорожный ин-т, 2003. – 46 с.

УДК 678.067:620.17

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
АНТИФРИКЦИОННОГО УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ  
ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ МАТРИЦЫ**

Д. Д. ДВОРЯНЦЕВ, И. В. ЛИШЕВИЧ, канд. техн. наук, А. С. САРГСЯН, канд. техн. наук,  
А. С. САВЕЛОВ, канд. техн. наук, Е. А. ШАРКО

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

Поступила в редакцию 29.11.2023

После доработки 20.12.2023

Принята к публикации 22.12.2023

Исследованы физико-механические и триботехнические свойства антифрикционного углепластика УГЭТ на основе низкомолекулярной углеродной ткани «Урал Т-15Р» с целью повышения величины предельной деформации и снижения модуля упругости за счет применения модифицированной терморективной матрицы ЭТ-4 вместо традиционно применяемой ЭТ-2.

На основании результатов проведенных экспериментов подобраны режимы полимеризации и термической обработки эпоксидных связующих. Опытные образцы препрегов, полученные методом растворной пропитки на линии УПСТ-1000М, переработаны в ПКМ методом горячего прессования. Проведены физико-механические испытания образцов по определению предела прочности при сжатии, сдвиге и изгибающего напряжения при разрушении, а также ударной вязкости по Шарпи. В качестве роликов контртел для определения триботехнических свойств углепластиков применяли сталь 20Х13 и оксидированный титановый сплав ПТ-3В.

Установлено, что образцы углепластика на основе химически модифицированного связующего ЭТ-4 с двухступенчатым режимом полимеризации и термообработки в диапазоне от 90 до 180°С обладают более высокими физико-механическими и триботехническими свойствами при трении по стали 20Х13 и оксидированному титановому сплаву ПТ-3В по сравнению с образцами, подвергнутыми трехступенчатому режиму полимеризации, и углепластиком УГЭТ.

*Ключевые слова:* модифицированное эпоксидное связующее, антифрикционный углепластик, трение, износ

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-91-103

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бахарева В. Е. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы. Справочник / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2014. – С. 79–133.
2. Дворянцев Д. Д., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Морозов Д. Л., Шарко Е. А. Исследование физико-механических и триботехнических свойств антифрикционного углепластика на основе модифицированной терморективной матрицы // Материалы 20-й конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (КМУС-2023), НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2023.
3. Николаев Г. И., Бахарева В. Е., Власов В. А., Лобынцева И. В., Анисимов А. В., Петрова Л. В., Симица В. Н. Применение антифрикционных углепластиков в подшипниках скольжения // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 2 (46). – С. 7–21.
4. Бахарева В. Е., Николаев Г. И., Анисимов А. В. Улучшение функциональных свойств антифрикционных полимерных композитов для узлов трения скольжения // Российский химический журнал. – 2009. – Т. 53, № 4. – С. 4–18.
5. Мустафа Л. М., Исмаилов М. Б., Ермаханова А. М., Санин А. Ф. Исследование влияния пластификаторов и термопластов на механические свойства эпоксидной смолы и углепластика (Обзор) // Комплексное использование минерального сырья (Complex Use of Mineral Resources). – 2019. – №4 (311). – С. 48–56. <https://DOI.org/10.31643/2019/6445.37>
6. Кузнецов А. В., Петров В. В. Метод химической модификации эпоксидных композиций // Электронный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2019. – № 6. – С. 1–9.
7. Куперман А. М., Зеленский Э. С., Кербер М. Л. Стеклопластики на основе матриц, совмещающих термо- и реактопласты // Механика композитных материалов. – 1996. – Т. 32, № 1. – С. 111–117.
8. Пат. РФ 2153107 № 99116523 Антифрикционная композиция / Абозин И. Ю., Бахарева В. Е., Лобынцева И. В. и др. – Оpubл. 15.07.1999.
9. Антифрикционные углеродные материалы / Под ред. С. М. Клейменова. – М., 1973. – 62 с.
10. Чурсова Л. В., Панина Н. Н., Гребенева Т. А., Кутергина И. Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. – СПб.: Профессия, 2020. – 574 с.
11. Перепелкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. – СПб.: Научные основы технологии, 2009. – С. 92.
12. Гинзбург Б. М., Точильников Д. Г., Бахарева В. Е., Анисимов А. В., Киреенко О. Ф. Полимерные материалы для подшипников скольжения, смазываемых водой (Обзор) // Журнал прикладной химии. – 2006. – Т. 79, № 5. – С. 705–716.

13. Точильников Д. Г., Гинзбург Б. М. Технология триботехнических экспресс-испытаний антифрикционных полимеров // Вопросы материаловедения. – 2002. – № 3 (31). – С. 39–48.
14. Пластификаторы // Химическая энциклопедия [Электронный ресурс] – URL. – <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3395.html> (дата обращения 25.08.2019).
15. Мостовой А. С. Рецептная модификация эпоксидных смол с применением новых высокоэффективных пластификаторов // Современные наукоемкие технологии (Modern high technologies). – 2015. – № 7. – С. 66–70.
16. Мараховский К. М., Осипчик В. С. Модификация эпоксидного связующего с повышенными характеристиками для получения композиционных материалов // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – Т. XXX, № 10. – С. 56–58.
17. Загора А. Г., Ткачук А. И., Терехов И. В., Мухаметов Р. Р. Методы химической модификации эпоксидных олигомеров (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021. – № 7 (110). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-73-85
18. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. – Л.: Химия, 1972.

УДК 621.791.048:669.15–194

### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Е. А. СТАРЦЕВ, В. В. ГРИГОРЬЕВ, канд. техн. наук, П. В. БАХМАТОВ, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»,  
681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: [egorstarts@inbox.ru](mailto:egorstarts@inbox.ru)

Поступила в редакцию 27.12.2023

После доработки 9.01.2024

Принята к публикации 10.01.2024

Представлены результаты исследования влияния теплофизических свойств полученного переработкой техногенных отходов электросталеплавильного производства (металлургического шлака) сварочного флюса на структуру и свойства сварных стыковых соединений тонколистовой низкоуглеродистой стали при автоматической дуговой сварке на керамических подкладках. Установлены режимы сварки с применением разработанного флюса, способствующие получению сварных соединений с механическими свойствами, близкими к свойствам основного металла, с размерами швов по ГОСТ 8713–79 и обеспечению минимального уровня сварочных деформаций и напряжений.

**Ключевые слова:** сварочный флюс, структура и свойства сварных соединений, сварной шов, режимы сварки, сварка под флюсом, низкоуглеродистая сталь, напряженно-деформационное состояние  
**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-104-121

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Верхотуров А. Д., Бабенко Э. Г., Макиенко В. М. Методология создания сварочных материалов / Под ред. чл.-корр. РАН Б. А. Воронова. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009. – 128 с
2. Evaluation of the influence of slag heaps on the state of the urban residential area / T. V. Sviridova et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2019. – Т. 537. – N 6. doi:10.1088/1757-899X/537/6/062009
3. Хаматова А. Р., Хохряков О. В. Электросталеплавильный шлак ОАО «Ижсталь» для цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе // Изв. Казанского гос. архитектурно-строительного ун-та. – 2016. – № 2. – С. 221–227.
4. Tsakiridis P. E., Papadimitriou G. D., Tsvivilis S., Koroneos C. Utilization of steel slag for Portlandcement clinker production // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – V. 152, Is. 2. – P. 805–811. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>.

5. Барышников В. Г., Горелов А. М., Папков Г. И. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии. Справочник. – М.: Экономика, 1986. – Т. 2. – 344 с.
6. Гарабрина, Л. А., Курган Т. А., Игнатъева Н. С. Переработка сталеплавильных шлаков в ОАО «ММК». – М.: Металлург, 2000. – 101 с.
7. Голов С. В., Ситников С. М., Калимулинов Е. Г. Переработка и использование техногенных отходов в ОАО «НТМК» // *Сталь*. – 2002. – № 5. – С. 96.
8. Данилов Е. В. Современная технология утилизации сталеплавильных шлаков // *Металлург*. – 2003. – № 6. – С. 38–39.
9. Флейшандерл А., Песл Дж., Соерт Ф. Обращение отходов в прибыль // *Новости черной металлургии за рубежом*. – 2002. – № 2. – С. 3–6.
10. Игошев М. В., Шакуров Е. И. Переработка сталеплавильных шлаков на комбинате «Северсталь». – М.: Металлург, 2003. – 60 с.
11. Song Q., Shen B., Zhou Z. Effect of blast furnace slag and steel slag on cement strength, pore structure and autoclave expansion // *Advanced Materials Research*. – 2011. – V. 168–170. – P. 17–20. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.17>
12. Skaf M., Manso M. J., Aragon A., Fuente-Alonso J. A., Ortega López V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2017. – V. 120. – P. 176–185. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
13. Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий. Ч. 3: Развитие технологий переработки вторичных ресурсов / Под ред. Д. О. Скобелева. – М.-СПб.: «Реноме», 2019. – 824 с. ISBN 978-5-00125-250-4
14. Филипп Ю. А. Современное состояние и развитие охраны окружающей среды черной металлургии // *Черные металлы*. – 2000. – № 4. – С. 26–35.
15. Шульц Л. А. Энергоэкологические проблемы современного металлургического комбината // *Изв. вузов. Чер. металлургия*. – 2002. – № 11. – С. 65–70.
16. Грановская Н. В., Наставкин А. В., Мещанинов Ф. В. Техногенные месторождения полезных ископаемых. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2013. – 93 с.
17. Патент РФ № 2793303 С1. Способ изготовления сварочного флюса из техногенных отходов сталеплавильного производства / Бахматов П. В., Старцев Е. А., Гладовский Р. Е., Соболев Б. М. Заявл. 07.11.2022, опубл. 31.03.2023.
18. Юсфин Ю. С., Леонтьев Л. И., Черноусов П. И. Промышленность и окружающая среда. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 469 с.
19. Зайцев А. К., Похвиснев Ю. В. Экология и ресурсосбережение в черной металлургии // *Соросовский образовательный журнал*. – 2001. – Т. 7, № 3. – С. 52–58.
20. Сварочные материалы для дуговой сварки. Т. 1: Защитные газы и сварочные флюсы. Справочное пособие / Н. Н. Потапов, Б. П. Конищев, С. А. Курланов и др. / Под ред. Н. Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
21. Classification and symbolization of bare steel wire electrodes and fluxes for submerged arc welding of structural steel // *Welding World*. – 1978. – N 3–4. – P. 70–71.
22. Бахматов П. В., Старцев Е. А. Влияние режимов дуговой сварки под слоем экспериментального флюса на распределение внутренних напряжений в сварных образцах, выявленных методом магнитной памяти металлов // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. – 2023. – № 5(69). – С. 83–96. DOI 10.17084/20764359-2023-69-83.
23. Васютинский Н. А. Металлургические шлаки. – Киев: Тэхника, 1990. – 150 с.
24. Haunstetter J., Krüger M., Zunft M. Experimental Studies on Thermal Performance and Thermo-Structural Stability of Steelmaking Slag as Inventory Material for Thermal Energy Storage // *Applied Sciences*. – 2020. – N 10. – P. 931. DOI 10.931.10.3390/app10030931.

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КВАЗИХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ ПОСЛЕ СТАБИЛЬНОГО ПОДРОСТА ТРЕЩИНЫ

В. И. СМИРНОВ, канд. техн. наук, А. И. МИНКИН, Б. З. МАРГОЛИН, 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 28.09.2023

После доработки 19.01.2024

Принята к публикации 19.01.2024

Рассмотрены случаи экспериментальных исследований трещиностойкости, когда по результатам проведенных испытаний определение характеристик трещиностойкости ( $K_{Jc}$ ,  $J_c$ ,  $J_R$ -кривые) не может быть выполнено корректно в соответствии с требованиями существующих стандартов. Предложен упрощенный метод определения длины стабильно растущей трещины по диаграмме нагрузка – перемещение (по линии нагружения), позволяющий в этих случаях получить необходимые характеристики трещиностойкости ( $J_R$ -,  $\delta_R$ -,  $K_R$ -кривые) и тем самым существенно повысить информативность проведенных испытаний. Даны методические рекомендации по проведению испытаний и обработке их результатов. Реализация методики, а также ее апробация и верификация рассмотрены на примере экспериментального построения  $J_R$ -кривых.

**Ключевые слова:** трещиностойкость, метод секущих, упругопластическая податливость, зона пластической деформации, эффективная длина трещины,  $J_R$ -кривая

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-122-143

### ЛИТЕРАТУРА

1. ASTM E 1820–23. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
2. ISO 12135:2016. Metallic Materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness.
3. BS 7448-4:1997. Fracture mechanics toughness tests. Part 4: Method for determination of fracture resistance curves and initiation values for stable crack extension in metallic materials.
4. JSME S001. Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness  $J_{Ic}$  (in Japanese).
5. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
6. ГОСТ Р 59115.6–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов.
7. СТО-07516250-233–2012. Определение параметров вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении стали и сварных соединений. Методика испытаний. – СПб: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2012. – 56 с.
8. ASTM E 1921–23. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range.
9. Landes J. D., Zhou Z., Lee K., Herrera R. Normalization Method for Developing  $J_R$  Curves with the LMN Function // Journal of Testing and Evaluation, JTEVA. – July 1991. – V. 19, N 4. – P. 305–311.
10. Rybakina O. G., Strogonova O. A. A Method of the  $J_R$ -curve Determination Using Linear Normalization // Advances in Solid and Fracture Mechanics. Advanced Structured Materials. – 2022. – V. 180. – P. 211–220.
11. ASTM E 561–22. Standard Test Method for  $K_R$  Curve Determination.
12. Irwin G. R. Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate // Journal of Applied Mechanics. – 1957. – N 24. – P. 361–364.

13. Tarnowski K. M. Measuring Crack Initiation and Growth in the Presence of Large Strains using the Potential Drop Technique // Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. – Department of Mech. Eng. Imperial College, London, 2016. – 271 pgs.
14. Kumar J., Mukhopadhyay C., Kumar V. Monitoring of Elastoplastic Fracture Behavior of HSLA Steel Using Acoustic Emission Testing // Materials Evaluation, – 2011. – V. 79. – P. 383–390.
15. Lee J.-H. Applicability of Ultrasonic Technique for Evaluation of Elastic Plastic Fracture Toughness of High Manganese Steel at Low Temperatures // Journal of Mechanical Science and Technology. – 1995. – V. 9. – P. 1–7.
16. Henschel S., Krüger L. Temperature Dependent Crack Initiation of 42CrMo4 Steel at High Loading Rates // EPJ Web of Conferences DYMAT 2018. – 2018. – V. 183.
17. А.с. 1359706 СССР. Способ определения трещиностойкости материалов / В. В. Калайда, В. Н. Красико, А. В. Наумов // Открытия. Изобретения. – 1987. – № 46. – С. 187.
18. Васнин А. Н., Щербинин И. Н. Регистрация начала движения трещины при испытании образцов на трещиностойкость // Заводская лаборатория. – 1990. – № 4. – С. 54–57.
19. Водопьянов В. И. Метод экспериментального определения момента старта трещины // Заводская лаборатория. – 1996. – № 8. – С. 44–46.
20. Смирнов В. И. Об определении момента страгивания трещины при испытаниях на вязкость разрушения конструкционных материалов // Заводская лаборатория. – 2004. – № 9. – С. 42–47.
21. Landes J. D. J. Calculation from Front Face Displacement Measurements of a Compact Specimen // International Journal of Fractur. – 1980. – V. 16. – P. R183–R186.
22. Veerman C. C., Muller T. The Location of the Apparent Rotation Axis in Notched Bend Testing // Engineering Fracture Mechanics. – 1972. – V. 4. – P. 25–32.
23. Кална К. Уточненный метод расчета критического раскрытия трещины // Проблемы прочности. – 1975. – № 11. – С. 19–24.
24. Исследование сопротивления разрушению низколегированной стали при различных видах нагружения / Ю. П. Рыбалов, П. Ф. Кошелев, Г. С. Васильченко и др. // Проблемы прочности. – 1976. – № 11. – С. 28–34.
25. Смирнов В. И. Методические особенности определения критического коэффициента интенсивности напряжений и критического раскрытия трещины при испытаниях на вязкость разрушения // Вопросы судостроения, серия Сварка. – 1977. – Вып. 24. – С. 18–25.
26. Kolednik O. Plastic and Overall Rotational Factors in Bend and CT-specimens // International Journal of Fracture. – 1989. – V. 39. – P. 269–286.
27. Liu Yongning. Crack Opening and Rotation Factor. // International Journal of Fracture. – 1994. – V. 66. – P. R39–R42.
28. Mills W. J. Heat-to-Heat variations in the Fracture Toughness of Austenitic Stainless Steels // Engineering Fracture Mechanics. – 1988. – V. 30. – P. 469–492.
29. Волков Г.С., Науменко В.П. К определению трещиностойкости конструкционных материалов // Проблемы прочности. – 1979. – № 8. – С. 64–67.
30. Хеллан К. Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
31. Saxena A., Hudak S.J. Jr. Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens // International Journal of Fracture. – 1978. – V. 14. – P. 455–468.
32. ASTM E 3076–18. Standard Practice for Determination of the Slope in the Linear Region of a Test Record.
33. Weidner A., Mottitschka T., Biermann H., Henkel S. Determination of Stretch Zone Width and Height by Powerful 3D SEM Imaging Technology // Engineering Fracture Mechanics. – 2013. – V. 108. – P. 294–304.
34. Saxena S., Ramakrishnan N., Dutta B. K. Determination of Stretch Zone Width Using FEM // Engineering Fracture Mechanics. – 2009. – V. 76. – P. 911–920.

35. Roos E., Otremba F., Eisele U. Fracture Mechanics Material Characteristics for a simplified Safety Analysis // Transactions SMiRT-16, Washington DC. – August, 2001.
36. Ильин А.В., Леонов В.П. Особенности использования параметра CTOD как характеристики перехода от режима стабильного роста трещины к нестабильному разрушению в конструкционных низколегированных сталях // Заводская лаборатория. – 2002. – № 2. – С. 28–36.
37. Eisele U., Schiedermaier J. Application of Ductile Fracture Assessment Methods for the Assessment of Pressure Vessels from High Strength Steels (HSS) // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2004. – V. 81. – P. 879–887.
38. Green G., Knott J. F. On Effects of Thickness on Ductile Crack Growth in Mild Steel // Journal of Mechanics and Physics of Solids. – 1975. – V. 23. – P. 172–183.
39. Bansal S., Nath S. K., Ghosh P. K., Ray S. Stretched zone width and blunting line equation for determination of initiation fracture toughness in low carbon highly ductile steels // International Journal of Fracture. – 2009. – V. 159. – P. 43–50.
40. Taira S., Tanaka K. Thickness effect of notched metal sheets on deformation and fracture under tension // Engineering Fracture Mechanics. – 1979. – V.11, № 2. – P. 231–249
41. Кишкина С. И., Старова Е. Н., Ямилинец В. Ф. Остаточная прочность и сопротивление срабатыванию трещины алюминиевых сплавов // Физико-химическая механика материалов. – 1981. – № 3. – С. 3–11.
42. Фадеев Ю. И., Бартенев О. А. Упрощенный способ определения  $J$ -интеграла с применением акустической эмиссии // Заводская лаборатория. – 1989. – № 5. – С. 54–57.
43. Otsuka A., Miyata T., Nishimura S., Kashiwagi Y. Crack Initiation from a Sharp Notch and Stretched Zone // Engineering Fracture Mechanics. – 1975. – V. 7. – P. 419–428.
44. Розанов М. П., Смирнов В. И. Исследование влияния размеров образцов и температуры испытания на характеристики вязкости разрушения конструкционных сталей // Труды Всесоюзного симпозиума по механике разрушения. – Киев: Наукова Думка, 1980. – С. 181–188.
45. Цайслмайер Х.-Хр. Факторы, влияющие на параметры трещиностойкости // Статическая прочность и механика разрушения сталей: Сб. статей / Под ред. В. Даля, В. Антона / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1986. – 564 с.
46. Карзов Г.П., Смирнов В.И., Тимофеев Б.Т. Об определении критических температур хрупкости при испытаниях на вязкость разрушения // Физико-химическая механика материалов, – 1989, – № 5. – С. 54–59
47. Lucon E. ASTM E08.07.09 Analytical Round-Robin on the Use of DC Electrical Potential Difference for the Measurement of Crack Size in Ductile Fracture Testing // Materials Performance and Characterization. Materials and National Institute of Standards. – 2018. – V. 7. –P. 15–25.
48. Landes J. D. The Blunting Line in Elastic-Plastic Fracture // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 1995. – V. 18. – P. 1289–1297.
49. Validation of the Fracture Mechanics Test Method EGF P1-87D (ESIS P1-901 ESIS P1-92) / K.-H. Schwalbe, B. Hayes, K. Baustiana, et al. // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 1993. – V. 16. – P. 1231–1284.
50. Argon A. S., Im J., Safoglu R. Cavity Formation from in Ductile Fracture Inclusions in Ductile Fracture // Metallurgical and Materials Transactions. – 1975. – V. 6. – P. 825–837.
51. Zheng G. O., Radom J. C. The Formation of Voids in the Ductile Fracture of a Low-Alloy Steel // Proceeding ICF, International Symposium of Fracture Mechanics, Beijing, 22–25, Nov. 1983. – P. 118–125.
52. ESIS P3-05D. Draft Unified Procedure for Determining the Fracture Behavior of Materials / ESIS European Structural Integrity Society, Torino, 2005.
53. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
54. Spitzig W. A. Correlations Between Fractographic Features and Plane-Strain Fracture Toughness in an Ultrahigh-Strength Steel // Symp. on Electron Microfractography, ASTM STP 453. – 1968. – P. 90–110.

55. Krasowsky A. J., Vainshtok V. A. On a Relationship Between Stretched Zone Parameters and Fracture Toughness of Ductile Structural Steels // International Journal of Fracture. – 1981. – V. 17. – P. 579–592.

56. Kolednik O., Stuwe H.P. The Stereophotogrammetric Determination of the Critical Crack Tip Opening Displacement // Engineering Fracture Mechanics. – 1985. – V. 21. – P. 145–155.

57. Baron A. A. On a Relationship Between Fracture Toughness, Stretched Zone Width and Mechanical Properties in Tensile Test // Engineering Fracture Mechanics. – 1994. – V. 49. – P. 445–450.

58. Zhong-Xin G., De-Ming W., Nan-Sheng Y. Deformation Analysis of the Local Field in the Vicinity of a Stably Growing Crack-tip // Engineering Fracture Mechanics. – 1988. – V. 30. – P. 415–434.

УДК 539.421.5:620.178.2:669.15–194.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ НУЛЕВОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ

В. Ю. ФИЛИН, д-р техн. наук, А. В. МИЗЕЦКИЙ, Д. Р. БАРАКОВ, М. М. ПЕГЛИВАНОВА

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

Поступила в редакцию 23.11.2023

После доработки 29.02.2024

Принята к публикации 4.03.2024

Сопrotивление распространению трещины в низколегированных сталях проверяется экспериментальным определением температур вязкохрупкого перехода. При этом необходимо обоснование корреляции результатов испытаний по каждой применяемой методике с минимальной температурой эксплуатации морских конструкций. С использованием критериев механики разрушения предложена формула требуемого температурного запаса для температуры нулевой пластичности (NDT). Использована оригинальная методика моделирования с равномерным сеточным разбиением.

*Ключевые слова:* морские конструкции, требования к материалам, температура нулевой пластичности NDT, торможение хрупкой трещины

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-118-2-144-153

### ЛИТЕРАТУРА

1. Crack arrest methodology and application / Harn G.T., Kanninen M.F., ed. // ASTM STP 711. – Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 1980.

2. Tagawa T., Handa T., Tajika H., Nanno S., Matsumoto K., Kawabata T. Brittle crack arrest behavior and its interpretation in an isothermal crack arrest test // Engineering Fracture Mechanics. – 2020. – N 235. – P. 107130.

3. Filin V. Yu., Ilyin A. V., Mizetsky A. V. Crack arrest simulation in steel in account of competing ductile and cleavage fracture // Procedia Structural Integrity. – 2020. – N 28. – P. 3–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.002>.

4. Филин В. Ю., Мизецкий А. В., Назарова Е. Д. Определение критических температур хрупкости стали на базе численного моделирования испытаний образцов Шарпи // Материалы XIV Всероссийской конф. «Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов «ТестМат», Москва, 25 марта 2022 г. – М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. – С. 320–332.

5. НД № 2-020101-174. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XIII «Материалы». – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2023. – 270 с.

6. Филин В. Ю., Ильин А. В., Ларионов А. В., Мизецкий А. В., Назарова Е. Д., Пегливанова М. М. Количественные оценки сопротивления распространению разрушения судостроительных и трубных сталей // Материалы VIII Всероссийской конф. «Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем» / Под. ред. В. В. Москвичева (Красноярск, 16–20 сентября 2023 г.). – Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. – С. 83–88.

7. Pellini W. S., Puzak P. P. Fracture Analysis Diagram Procedures for the Fracture-Safe Engineering Design of Steels Structures. – 1963. – March, N 15.

8. Ильин А. В., Артемьев Д. М., Филин В. Ю. Моделирование МКЭ распространения и торможения хрупкого разрушения в пластинах с исходной трещиной //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 1(1). – С. 56-65.

9. Ларионов А. В., Филин В. Ю., Ильин А. В. Оценка связи сопротивления металла вязкому разрушению с поглощенной энергией при испытаниях падающим грузом / Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов: материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «Тест-Мат», Москва, 25 марта 2022 г. – М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. – С. 506–520.

10. Пегливанова М.М., Назарова Е.Д., Филин В. Ю. Сравнение оценок удлинения образцов на растяжение разной кратности // Доклады XXIII Зимней школы по механике сплошных сред, Пермь, 13-17 февраля 2023 г. – Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2023 г. – С. 264.

11. Shibamura, K., Yanagimoto, F., Namegawa, T., Suzuki, K., Aihara, S., Brittle crack propagation/arrest behavior in steel plate. Part I: Model formulation // Engineering Fracture Mechanics. – 2016. – N 162. – P. 324–340. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.02.054>.

УДК 620.17.08

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

М. М. ПЕГЛИВАНОВА<sup>1,2</sup>, В. Д. ЮНЁВ<sup>2</sup>, В. Ю. ФИЛИН<sup>1</sup>, д-р техн. наук

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

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

Поступила в редакцию 11.12.2023

После доработки 29.03.2024

Принята к публикации 2.04.2024

Понимание точности, с которой определяются специальные механические характеристики материалов, является неотъемлемой частью системы контроля их качества, обеспечивающей безопасность эксплуатации современных конструкций в экстремальных климатических условиях в местах, где любые аварийно-восстановительные работы затруднены. В отсутствие априори известных значений таких характеристик необходимо развитие методической базы расчетов неопределенности. Актуальность проблемы подтверждается требованием Росаккредитации к испытательным лабораториям о наличии и грамотном использовании соответствующих методик как для непосредственно измеряемых параметров, так и для значений параметров, вычисляемых с использованием результатов испытаний. Предложены процедуры расчетов неопределенности, на основе которых разработано специализированное программное обеспечение.

**Ключевые слова:** конструкционные стали, механические испытания, расчет неопределенности, средства измерения, специализированное программное обеспечение

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-154-165

### ЛИТЕРАТУРА

1. Heisenberg W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. – Zeitschrift für Physik. – 1927. – V. 43. – P. 172–198. [Пер. на англ. в кн. Wheeler J. A., Zurek H. Quantum Theory and Measurement. – Princeton Univ. Press. – 1983. – P. 62–84].

2. РМГ 29–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 60 с.

3. ГОСТ 34100.1–2017. Неопределенность измерения. Ч. 1: Введение в руководства по выражению неопределенности измерения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 28 с.

4. ГОСТ 34100.3.1–2017. Неопределенность измерения. Ч. 3: Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1 Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. М.: Стандартиформ, 2018. – 84 с.
5. НД № 2-020101-174. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XIII: «Материалы». – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2023. – 270 с.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610366 от 10 января 2024 г. «Promtest uncertainty – расчет неопределенности измерений значений характеристик механических свойств конструкционных сталей».
7. Походун А. И. Экспериментальные методы исследований. Погрешности и неопределенности измерений. Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 112 с.
8. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. – СПб: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. – 134 с.
9. Амос Гилат. MATLAB. Теория и практика. Изд. 5-е / Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 416 с.
10. Bell S. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement, 1999. – 41p.
11. Ильин А. В., Филин В. Ю., Гусев М. А., Маркадеева А. Ю., Юрков М. Е. Практика аттестационных испытаний высокопрочных хладостойких судостроительных сталей для получения свидетельства Российского морского регистра судоходства // Сб. материалов 6-й Международной научно-технической конференции «Судометрика-2016», 11–13 октября 2016 г., Санкт-Петербург. – С. 111–118.

УДК 621.039.531:539.422.22

**РАДИАЦИОННОЕ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ КОРПУСНЫХ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ:  
СВЯЗЬ МЕХАНИЗМОВ ОХРУПЧИВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ  
ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН. Часть 3. Моделирование хрупкого  
разрушения и анализ связи характеристик зарождения и распространения микротрещин с  
механизмами охрупчивания**

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

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

Поступила в редакцию 25.07.2023

После доработки 21.11.2023

Принята к публикации 22.11.2023

Радиационное и термическое охрупчивание корпусных реакторных сталей исследуется с точки зрения связи характеристик хрупкого разрушения на микро- и макроуровнях. Для прогнозирования характеристик хрупкого разрушения на макроуровне (таких как трещиностойкость и разрушающее напряжение) и определения критических параметров, контролирующих зарождение и распространение микротрещин, используется вероятностная модель хрупкого разрушения Prometey.

Экспериментальные и расчетные исследования выполнены для сталей 15X2НМФА и А533, которые используются для корпусов реакторов типа ВВЭР и PWR. Эти материалы исследованы в следующих состояниях: 1) исходном (состояние поставки); 2) термически охрупченном, которое моделирует упрочняющий механизм охрупчивания; 3) термически охрупченном, которое моделирует неупрочняющий механизм охрупчивания; 4) облученном. Представлены результаты испытаний в температурном диапазоне хрупкого разрушения образцов разной геометрии (цилиндрических гладких образцов, цилиндрических образцов с кольцевым надрезом, образцов с трещиной) из корпусных реакторных материалов в различных состояниях и результаты прогнозирования на основе модели Prometey. Установлена связь механизмов охрупчивания и мод разрушения с локальными характеристиками зарождения и распространения микротрещин.

*Ключевые слова:* хрупкое разрушение, локальный подход, вероятностная модель, радиационное охрупчивание, корпусные реакторные стали

ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И. Швецова В. А. Дальнейшее развитие модели Prometey и метода Unified Curve. Часть 1. Развитие модели Prometey // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4 (88). – С. 120–150.
2. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М., Metallurgia, 1986. – 224 с.
3. Mudry F. A local approach to cleavage fracture // Nuclear Engineering and Design. – 1987. – N 105. – С. 65–76.
4. Margolin B. Z., Shvetsova V. A. Local criterion for cleavage fracture: structural and mechanical approach // J. Phys. IV. – 1996. – N 6. – С6-225–34.
5. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels. // Fatigue Frac. Engng. Mater. Struc. – 2006. – N 29(9). – P. 697–713.
6. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Николаев В. А., Рядков Л. Н. Новый инженерный метод для прогнозирования температурной зависимости трещиностойкости сталей для сосудов давления // Проблемы прочности. – 2003. – N5. – С. 12–35.
7. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И. Дальнейшее развитие модели Prometey и метода Unified Curve. Часть 2. Развитие метода Unified Curve // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4(88). – С. 151–178.
8. Margolin B. Z., Fomenko V. N., Gulenko A. G., Kostylev V. I., Shvetsova V. A. On issue of comparison of the Unified Curve and Master Curve methods and application for RPV structural integrity assessment // Strength of Materials. – 2016. – N 48 (2). – P. 227–250.
9. Margolin B. Z., Yurchenko E. V., Morozov A. M., Pirogova N. E., Brumovsky M. Analysis of a link of embrittlement mechanisms and neutron flux effect as applied to reactor pressure vessel materials of WWER // J. Nucl. Mate. – 2013. – N 434. – P. 347–356.
10. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G. Radiation embrittlement modelling in multi-scale approach to brittle fracture of RPV steels // Int. J. Fract. – 2013. – N 179. – P. 87–108.
11. Kandidis E., Marini B., Allais L., Pineau A. Validation of a statistical criterion for intergranular brittle fracture of a low alloy steel through uniaxial and biaxial (tension-torsion) tests // Int. J of Fracture. – 1994. – N 66. – P. 273–294.
12. Yahya O.M.L., Borit F.B., Piques R., Pineau A. Statistical modelling of intergranular brittle fracture in low alloy steel // F&F of EM& Structures. – 1998. – V. 21, Is. 12. – P. 1485–1502. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.1998.00126.x>
13. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Prometey local approach to brittle fracture: development and application // Eng. Fract. Mech. – 2008. – V. 75. – P. 3483–98.
14. Intergranular and intragranular phosphorus segregation in Russian pressure vessel steels due to neutron irradiation / B. A. Gurovich, E. A. Kuleshova, Y. I. Shtrombakh et al. // J. Nucl. Mate. – 2000. – N 279. – P. 259–272.
15. Хоуторн Дж. Р. Радиационное охрупчивание // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Под ред. К. Л. Брейента, С. К. Бенерджи / Пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1988. – С. 423–479.

УДК 621.039.531:669.15–194.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ  
ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ И АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ ОБЛУЧЕНИЯ  
В ИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ. Часть 1. Разработка методологии выбора режима ионного  
облучения ферритно-мартенситных сталей**

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук, Л. А. БЕЛЯЕВА, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 2.10.2023  
После доработки 19.12.2023  
Принята к публикации 22.12.2023

Разработана и экспериментально обоснована методология выбора режима облучения ферритно-мартенситных сталей в ионном ускорителе, обеспечивающего радиационное упрочнение этих сталей, идентичное реализующемуся при нейтронном облучении. В качестве меры радиационного упрочнения используется изменение микротвердости по Виккерсу. Проведено исследование радиационно-индуцированного изменения микротвердости ферритно-мартенситных сталей 07X12НМФБ и ЭП-823 после нейтронного и ионного облучения до повреждающих доз 10–30 сна в интервале температур 350–600°C. Указанные материалы облучались нейтронами в реакторах БОР-60, БН-600 и в ионном ускорителе АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» ионами Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>4+</sup> и ионами He<sup>+</sup> до концентраций 0,2 и 4 аррт/сна. Установлена функция перехода, связывающая температуры облучения при нейтронном и ионном облучении при заданной повреждающей дозе с целью обеспечения одинакового радиационного упрочнения аустенитных сталей.

*Ключевые слова:* ферритно-мартенситные стали, нейтронное и ионное облучение, микротвердость по Виккерсу, инструментальное индентирование, радиационно-индуцированное упрочнение

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-187-211

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленский В. Ф., Неклюдов И. М., Черняева Т. П. Радиационные дефекты и набухание металлов. – Киев: Наук. думка, 1988.
2. Was G. S. Fundamentals of Radiation Materials Science. – Berlin: Springer-Verlag, 2007.
3. Accelerator simulation and theoretical modelling of radiation effects in structural materials // IAEA Nuclear Energy Series. – 2018. – N NF-T-2.2. – Vienna: IAEA.
4. Was G. S. et al. High Fidelity Ion Beam Simulation of High Dose Neutron Irradiation // Simulation of Neutron Damage for High Dose Exposure of Advanced Reactor Materials: Program IRP-RC. URL: <https://neup.inl.gov/SiteAssets/FY%202013%20Abstracts/IRP/IRP-University%20of%20Michigan.pdf>
5. Was G. S., Jiao Z., Getto E., Sun K., Monterrosa A. M., Maloy S. A., Anderoglu O., Sencer B. H., Hackett M. Emulation of reactor irradiation damage using ion beams // Scr. Mater. – 2014. – V. 88. – P. 33–36.
6. Zinkle S. J., Snead L. L. Opportunities and limitations for ion beams in radiation effects studies: Bridging critical gaps between charged particle and neutron irradiations // Scr. Mater. – 2018. – V. 143. – P. 154–160.
7. Taller S., Coevering G. V., Wirth B. D., Was G. S. Predicting structural material degradation in advanced nuclear reactors with ion irradiation // Scientific Reports. – 2021. – N 11. – C. 2949.
8. Рогожкин С. В., Никитин А. А., Хомич А. А. и др. Имитационные эксперименты на пучках тяжелых ионов для моделирования радиационных повреждений конструкционных материалов активной зоны ядерных и термоядерных энергетических установок // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 245–258.
9. Грудзевич О. Т., Печенкин В. А., Кобец У. А. и др. Исследования радиационной стойкости конструкционных материалов на ускорителях ионов // ВАИТ, Серия: ядерно-реакторные константы. – 2022. – Вып. 3. – С. 127–145.
10. Standard Practice for Neutron Radiation Damage Simulation by Charged-Particle Irradiation, ASTM E521-96, 2017
11. Taller S., Jiao Z., Field K., Was G. S. Emulation of Fast Reactor Irradiated T91 Using Duallon Beam Irradiation // J. Nucl. Mater. – 2019. – V. 527, N 151831. – P. 1–14.
12. Phythian W. J., English C. A. Microstructural evolution in reactor pressure vessel steels // Journal of Nuclear Materials. – 1993. – N 205. – P. 162–177.
13. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Prometey local approach to brittle fracture: development and application // Eng. Fracture Mech. – 2008. – V. 75. – P. 3483–3498.
14. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G. Radiation embrittlement modeling in multiscale approach to brittle fracture of RPV steel // Int. J. of Fracture. – 2013. – V. 179, Is. 1–2. – P. 87–108.

15. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Пирогова Н. Е. Анализ эффекта флакса нейтронов применительно к радиационному охрупчиванию материалов корпусов реакторов ВВЭР // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2(70). – С. 177–196.
16. Amaev A. D., Gorynin I. V., Nikolaev V. A. Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels (Russian Materials Monograph Series, 2) // Am. Nucl. Soc. – 1997. – 282 p.
17. Margolin B., Fomenko V., Shvetsova V., Yurchenko E. On the link of the embrittlement mechanisms and microcrack nucleation and propagation properties for RPV steels. Part II. Fracture properties and modelling // Eng. Fracture Mech. – 2022. – V. 270. – P. 108556.
18. PERFECT (prediction of irradiation damage effects on reactor components): progress with multi-scale modelling in RPV mechanics sub-project / D. Lidbury, S. Bugat, O. Diard, et al. / Editors: J. Besson, D. Moirerau, D. Steglich // Local approach to fracture. – Paris: Ecole des Mines de Paris; 2006. – P. 459–464.
19. Eason E. D., Odette G. R., Nanstad R. K., Yamamoto T. A Physically Based Correlation of Irradiation-Induced Transition Temperature Shifts for RPV Steels. – ORNL/TM-2006/530, November 2007.
20. Kirk M. Assessment of flux effect exhibited by IVAR database // Proc. of the IAEA Technical Meeting on Radiation embrittlement and Life Management of Reactor Pressure Vessels, Znojmo, Czech Republic, 18–22 October, 2010.
21. Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов / А. Д. Амаев, А. М. Крюков, И. М. Неклюдов и др. / Под ред. А. М. Паршина и П. А. Платонова. – СПб.: Политехника, 1997. – 312 с. ил.
22. Марголин Б.З., Юрченко Е.В., Морозов А.М., Варовин А.Я., Рогожкин С.В., Никитин А.А. Исследование влияния пострадиационного отжига на восстановление свойств материалов опорных конструкций корпусов реакторов ВВЭР-440. Ч. 2: Анализ особенностей влияния отжига материала после низкотемпературного облучения // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 1(109). – С. 184–198.
23. ГОСТ Р 70431–2022/ Национальный стандарт Российской Федерации. Материалы оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения ударной вязкости и критической температуры хрупкости по результатам испытаний на ударный изгиб.
24. ASTM E 1921-22a. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T<sub>0</sub>, for Ferritic Steels in the Transition Range // Annual Book of ASTM Standards. – 2022. – V. 03.01.
25. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Nikolaev V. A., Ryadkov L. N. A new engineering method for prediction of the fracture toughness temperature dependence for RPV steels // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 2003. – N 80. – P. 17–829.
26. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Fomenko V. N., Kostylev V. I. Further Improvement of the Prometey Model and Unified Curve Method. Part 2: Improvement of the Unified Curve Method // Eng. Fract. Mech. – 2018. – V. 191. – P. 383–402.
27. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М. Пороговые и предельные значения концентраций примесных элементов в материале корпусов реакторов типа ВВЭР // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 2 (86). – С. 152–163.
28. Busby J. T., Hash M. C., Was G. S. The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels // Journ. Nucl. Materials. – 2005. – N 336. – P. 267–278.
29. Gorynin I. V., Nesterova E. V., Nikolaev V. A., Rybin V. V. Microstructure and Mechanical Properties of WWER-440 Reactor Vessel Metal After Service Life Expiration and Recovery Anneal // 17th International Symposium “Effects of Radiation on Materials”, ASTM STR 1270, American Society for Testing and Materials, 1996. – P. 248–259.
30. Lucas G. E., Odette G. R., Maiti R., Shekherd J.W. Tensile Properties of Irradiated Pressure Vessel Steels // Influence of Radiation on Material Properties: 13th International Symposium (Part 2). – ASTM STP 956, 1987. – P. 379–394.
31. Higgy H. R., Hammad F. H. Effect of fast neutron irradiation on mechanical properties of stainless steels: AISI types 304, 316 and 347 // J. Nucl. Mater. – 1975. – V. 55, Is. 2. – P. 177–186.
32. Хоуторн Дж. Р. Радиационное охрупчивание // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Под ред. К. Л. Брейента, С. К. Бенерджи / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1988. – С. 423–479.

33. Jones R., Williams T. The Dependence of Radiation Hardening and Embrittlement on Irradiation Temperature. – ASTM STP1270-EB. Paper ID: STP16495S.
34. Марголин Б. З., Юрченко Е. В. Дозовые зависимости для материалов корпусов реакторов ВВЭР и их опорных конструкций // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 2(114). – С. 166–194.
35. Gaganidze E., Petersen C., Aktaa J. Study of helium embrittlement in boron doped EUROFER97 steels // J. Nucl. Mater. – 2009. – V. 386–388. – P. 349–352.
36. Lysova G. V., Birzhevoy G. A. Kinetics of the radiation-induced hardening of EP-823 steel after Ni<sup>++</sup> ion irradiation, annealing and re-irradiation // Journal of surface investigation, X-ray, synchrotron and neutron techniques. – 2012. – V. 6, N 2.
37. Maloy J., Henry S.A. Irradiation-resistant ferritic and martensitic steels as core materials for Generation IV nuclear reactors. Chapter 9 // Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors. – 2017. – P. 329–355.
38. Иванов А.А., Шулепин С.В., Дворяшин А.М., Конобеев Ю.В., Иванов С.Н., Алексеев Ю.В., Поролло С.И. Структура и механические свойства стали ЭП-823, 20Х12МН и опытных вариантов 12%-ных хромистых сталей после нейтронного облучения в реакторе БН-350 // Сб. докл. IX Российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 2009. – С. 560–573.
39. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – С. 302.
40. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. – М.: Машиностроение, 2009. – С. 312.
41. Plastic zone size for nanoindentation of irradiated Fe–9%Cr ODS / C. K. Dolph et al. // J. Nucl. Mat. – 2016. – V. 481. – P. 33–45.
42. Xiazhi Xiao, Long Yu. Nano-indentation of ion-irradiated nuclear structural materials: A review // Nucl. Mater. Energy. Elsevier. – 2020. – V. 22. – Art. 100721.
43. ISO 14577-4. Metallic Materials – Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters – Part 4: Test Method for Metallic and Nonmetallic Coatings. ISO 14577-4, 2016 (E).
44. Wilkinson A. J., Ben T. Britton. Strains, planes, and EBSD in materials science // Materials today. – 2012. – V. 15, Is. 9. – P. 366–376.
45. Gusev M. N., De Bellefon G. M., Rosseel T. M. Analysis of Localized Deformation Processes in Highly Irradiated Austenitic Stainless Steel through In Situ Techniques // Report of Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (United States), 2019, ORNL/TM-2019/1274. – P. 36.
46. Thermal annealing as a method to predict results of high temperature irradiation embrittlement / A. M. Kryukov, L. Debarberis, P. Hähner et al. // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 432. – P. 501–504.
47. ГОСТ Р 8.748–2011. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании, 2013. – 22 с.

УДК 621.039.531:669.15–194.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ  
ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ И АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ ОБЛУЧЕНИЯ  
В ИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ. Часть 2. Разработка методологии выбора режима ионного  
облучения аустенитных сталей**

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук, Л. А. БЕЛЯЕВА, 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 5.12.2023

После доработки 8.12.2023

Принята к публикации 22.12.2023

Разработана и экспериментально обоснована методология выбора режима облучения аустенитных сталей в ионном ускорителе, обеспечивающего радиационное упрочнение этих сталей, идентичное реализующемуся при нейтронном облучении. В качестве критерия радиационного

упрочнения используется изменение микротвердости по Виккерсу. Представлены результаты исследования радиационно-индуцированного изменения микротвердости аустенитных сталей 08X18H10T и 08X16H20M2T, облученных в реакторах СМ-3, ВВЭР-440, БОР-60, СМ-3 + БОР-60 до повреждающих доз 10,2–33,7 сна в интервале температур от 60 до 500°C. Для исследования радиационно-индуцированного изменения микротвердости в более широком интервале температур облучения проведены пострадиационные отжиги облученных сталей в интервале от 400 до 600°C, имитирующие облучение при температурах, равных температурам отжига. Представлены данные радиационно-индуцированного изменения микротвердости после облучения в ионном ускорителе АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» ионами Ni<sup>4+</sup> и ионами He<sup>+</sup> до концентраций от 0 до 7 аррт/сна при повреждающих дозах 13–30 сна и температурах 300–650°C. Установлена функция перехода, связывающая температуры облучения при нейтронном и ионном облучении при заданной повреждающей дозе с целью обеспечения одинакового радиационного упрочнения аустенитных сталей.

*Ключевые слова:* аустенитные стали, нейтронное и ионное облучение, микротвердость по Виккерсу, инструментальное индентирование, радиационно-индуцированное упрочнение.

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-212-232

1. Физическое материаловедение: Учебник для вузов. Т. 4: Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование / Под общей ред. Б. А. Калина. – М.: МИФИ, 2008. – 696 с.

2. Garner F. A. Radiation Damage in Austenitic Steels // Comprehensive Nuclear Materials. V. 4. – Amsterdam: Elsevier, 2012. – P. 33–95.

3. Вас Гэри С. Основы радиационного материаловедения. Металлы и сплавы. – М.: Техносфера, 2014. – 992 с.

4. Fukuya K. Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2013. – № 50(3). – P. 213–254.

5. Курсевич И. П., Марголин Б. З., Прокошев О. Ю., Кохонов В. И. Механические свойства аустенитных сталей при нейтронном облучении: влияние различных факторов // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 4 (48). – С. 55–68.

6. Сорокин А. А., Марголин Б. З., Курсевич И. П., Минкин А. И., Неустроев В. С., Белозеров С. В. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 2 (66). – С. 131–152.

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

8. Влияние радиационного набухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть 1. Пластичность и трещиностойкость / Б. З. Марголин, А. А. Сорокин, В. А. Швецова и др. // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3(87). – С. 159–191.

9. К вопросу о радиационном набухании и радиационном охрупчивании аустенитных сталей. Часть II. Физические и механические закономерности охрупчивания // Б. З. Марголин, И. П. Курсевич, А. А. Сорокин и др. // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 2(58). – С. 99–111.

10. Марголин Б. З., Пирогова Н. Е., Сорокин А. А., Кохонов В. И. Исследование механизмов коррозионного растрескивания под напряжением облученных аустенитных хромоникелевых сталей, используемых для внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР и PWR // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 2 (102). – С. 174–199.

11. Модель коррозионного растрескивания облученных аустенитных сталей Часть 1. Анализ механизмов повреждения и формулировка определяющих уравнений / Б. З. Марголин, А. А. Сорокин, Н. Е. Пирогова и др. // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 2(98). – С. 154–177.

12. Logan H. L. Stress Corrosion of Metals. – John Wiley & Sons Inc., 1967.

13. Характеристики и механизмы разрушения облученных аустенитных сталей в области повышенных температур и формулировка критерия разрушения. Часть 1. Экспериментальные исследования / Б. З. Марголин, А. А. Сорокин, А. А. Бучатский и др. // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 2(110). – С. 185–202.

14. Характеристики и механизмы разрушения облученных аустенитных сталей в области повышенных температур и формулировка критерия разрушения. Часть 2. Критерий и модель разрушения / Марголин Б. З., Сорокин А. А., Бучатский А.А. и др. // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 2(110). – С. 203–217.
15. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет. Часть 1. Программа исследований и вырезка трепанов из ВКУ / Б. З. Марголин, А. Я. Варовин, А. И. Минкин и др. // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3(103). – С. 135–143.
16. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет. Часть 2. Расчетно-экспериментальное определение флюенса быстрых нейтронов и повреждающей дозы / Н. Е. Пирогова, А. Д. Джаландинов, Б. З. Марголин и др. // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3(103). – С. 144–156.
17. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет. Часть 4. Характеристики прочности и пластичности и механизмы разрушения / Б. З. Марголин, В. А. Швецова, А. А. Сорокин и др. // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 1(105). – С. 116–144.
18. Thermal annealing as a method to predict results of high temperature irradiation embrittlement / Kryukov, L. Debarberis, P. Hähner et al. // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 432, – P. 501–504.
19. Alekseenko N.N., Amaev A.D., Gorynin I.V., Nikolaev V.A. Radiation damage of nuclear power plant pressure vessel steels // A. Nucl. Soc. – La Grange Park, Illin, USA, 1997.
20. Belozеров S.V., Neustroyev V.S., Shamardin V.K. Studying helium accumulation in austenitic steels for evaluating radiation damage in internals of water-moderated water-cooled power reactors // Phys. Met. Metallogr. – 2008. – V. 106. – P. 503–509.
21. ГОСТ Р 8.748–2011. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании, 2013. – 22 с.
22. Гусев М. Н., Максимкин О. П., Токтогулова Д. А. Новое физическое явление в высокооблученных нержавеющей сталях – «волны пластической деформации» – и его практическое использование // Вестник НЯЦ РК. – 2008. – Вып. 4. – С. 27–33.
23. Gusev M. N., Maksimkin F. A., Garner O. P. Peculiarities of plastic flow involving “deformation waves” observed during low-temperature tensile tests of highly irradiated 12Cr18Ni10Ti and 08Cr16Ni11Mo3 steels // J. Nucl. Mater. – 2010. – V. 403, N 1–3 – P. 121–125.
24. Gussev M. N., Field K. G., Busby J. T. Strain-induced phase transformation at the surface of an AISI-304 stainless steel irradiated to 4.4 dpa and deformed to 0.8% strain // J. Nucl. Mater. – 2014. – V. 446, N 1–3 – P. 187–192.
25. Investigation of high temperature annealing effectiveness for recovery of radiation-induced structural changes and properties of 18Cr10NiTi austenitic stainless steels / B.A. Gurovich, E.A. Kuleshova, A. S. Frolov et al. // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 465. – P. 565–581.
26. Busby J. T., Hash M. C., Was G. S. The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels // Journ. Nucl. Materials. – 2005. – V. 336. – P. 267–278.
27. Zinkle S. J., Maziasz P. J., Stoller R. E. Dose Dependence of the Microstructural Evolution in Neutron Irradiated Steel // J. Nucl. Mater. – 1993. – V. 206. – P. 266–286.

## CONTENTS

### METALS SCIENCE. METALLURGY

- Zisman A.A., Kurteva K.Y., Novoskoltsev N.S., Petrov S.N., Khlusova E.I., Yakovleva E.A. Textural index for martensitic and bainitic steels to assess influence of hot rolling mode on parent austenite structure before quenching ..... 5
- Kozlova I. R., Vasilieva E.A., Markova Yu.M. Regularities of decomposition of metastable phases in titanium pseudo- $\beta$ -alloys ..... 17
- Oryshchenko A.S., Kashtanov A.D., Blank E.D., Gerasimov V.A., Ikonnikov V.K. Creating pyrolysis reactor for disposal of municipal solid waste ..... 28

### FUNCTIONAL MATERIALS

- Maletskii A.V., Volkova G.K., Konstantinova T.E., Belichko D.R., Nosolev I.K., Doroshkevich A.S., Mezentseva Zh.V., Oksengendler B.L., Teofilović V., Ersceg T., Ristić I. He influence of the  $Y_3Al_5O_{12}$  on the structure formation and properties of ceramics of the  $Al_2O_3 - Y_2O_3$  system ..... 33
- Krasikov A.V., Merkulova M.V., Mikhailov M.S., Petrov S.N. Nanostructure of galvanic Ni–W coatings annealed at different temperatures ..... 46
- Krasikov A.V. Structural features of composite electrochemical coatings nickel – diamond ..... 55
- Bobkova T.I., Vasiliev A.F., Margolin V.I., Serdyuk N.A., Tupik V.A., Farmakovskiy B.V., Khromenkov M.V. Study of electrical strength and electrical resistance of cast microwires in glass insulation ..... 62
- Knyazyuk T.V., Mukhamedzyanova L.V., Yakovleva N.V., Manninen S.A., Zhukov A.S., Bobyr V.V., Kuznetsov P.A. Influence of heat treatment on phase and structure formation and magnetic properties of soft magnetic alloy 80NKHS manufactured by additive technology ..... 73
- Bystrov R.Yu., Gerashchenkov D.A., Gerashchenkova E.Yu., Kashirina A.A., Barkovskaya E.N. Producing antifriction babbitt B83 layer by gas-dynamic cold spraying ..... 78

### POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

- Dvoryantsev D.D., Lishevich I.V., Sargsyan A.S., Savelov A.S., Sharko E.A. On the physical-mechanical and tribotechnical properties of antifriction carbon fiber based on a modified thermosetting matrix ..... 91

### WELDING, WELDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES

- Startsev E.A., Grigoriev V.V., Bakhmatov P.V. Structure and properties of the welded joint during arc welding of low-carbon steel under a layer of flux obtained from metallurgical slag of electric steelmaking ..... 104

### STRUCTURAL INTEGRITY AND SERVICEABILITY OF MATERIALS

- Smirnov V.I., Minkin A.I., Margolin B.Z. Method for determining crack resistance of structural materials at quasi-brittle fracture after stable crack growth ..... 122
- Filin V.Yu., Mizetsky A.V., Barakov D.R., Peglivanova M.M. Experimental STUDIES and calculation of crack propagation at the nil ductility temperature of shipbuilding steel ..... 144
- Peglivanova M.M., Yunev V.D., Filin V.Yu. Development of calculation methods for the uncertainty of special mechanical characteristics of structural steel ..... 154

### RADIATION MATERIALS SCIENCE

- Margolin B. Z., Fomenko V.N., Shvetsova V.A., Yurchenko E.V. Radiation and thermal embrittlement of RPV steels: the links of embrittlement mechanisms, fracture modes and microcrack nucleation and propagation properties. Part 3: Brittle fracture modelling and analysis of the link of microcrack nucleation and propagation properties and embrittlement mechanisms ..... 166
- Margolin B. Z., Sorokin A.A., Belyaeva L.A. Simulation of stainless ferritic-martensitic and austenitic steel hardening after irradiation in ion accelerator. Part 1. Development of a methodology for determining the ion mode irradiation of ferritic-martensitic steels ..... 187

Margolin B. Z., Sorokin A.A., Belyaeva L.A. Simulation of stainless ferritic-martensitic and austenitic steel hardening after irradiation in ion accelerator. Part 2. Development of a methodology for determining the ion mode irradiation of austenitic steels ..... 212

**Guidelines for authors of the scientific and technical journal “Voprosy Materialovedeniya”. Manuscript requirements** ..... 233

UDC 669.15–194:539.22:621.771.016.2

## **TEXTURAL INDEX FOR MARTENSITIC AND BAINITIC STEELS TO ASSESS INFLUENCE OF HOT ROLLING MODE ON PARENT AUSTENITE STRUCTURE BEFORE QUENCHING**

A.A. ZISMAN, Dr Sc. (Phys-Math), K.Y. KURTEVA, N.S. NOVOSKOLTSEV,  
S.N. PETROV, Dr. Sc. (Eng), E.I. KHLUSOVA, Dr. Sc. (Eng), E.A. YAKOVLEVA, Cand Sc. (Eng)

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpaleynaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received October 19, 2023

Revised December 4, 2023

Accepted December 8, 2024

**Abstract**—To assess a state of parent austenite before the steel quenching, a scalar textural index for martensite and bainite is introduced in terms of EBSD orientation data. Deformed and recrystallized states of the parent phase are discriminated by the sign of this index, whereas its magnitude in each of the two reflects the texture sharpness depending on the hot rolling mode. Accordingly, in a virtual case of randomly distributed orientations the considered parameter vanishes. Performance of the proposed approach is demonstrated on medium carbon martensitic steel hot rolled at laboratory conditions and on industrial rolled plates of low carbon bainitic steel.

**Keywords:** martensite, bainite, high strength steel, parent austenite, phase transformation, EBSD, texture

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-05-16

### **ACKNOWLEDGMENTS**

*Experimental studies were performed on the equipment of the Center for Collective Use “Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials” of the NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”.*

*Computer processing of the obtained DSE data was carried out at the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “St Petersburg Polytechnic University” using the MTEX program with the financial support of the Russian Science Foundation, project No 22-19-00627.*

### **REFERENCES**

1. Bernier, N., Bracke, L., Malet, L., Godet, S., Crystallographic reconstruction of the effect of finish hot rolling temperature on the variant selection during bainite transformation in C–Mn high-strength steels, *Metall. Mater. Trans.*, 2014, 45A, pp. 5937–5955. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2553-1>.
2. Zhao, H., Palmiere, E.J., Influence of cooling rate on the grain-refining effect of austenite deformation in a HSLA steel, *Mater. Charact.*, 2019, V. 158, p. 109990. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109990>.
3. Guo, H., Feng, X., Zhao, A., Li, Q., Chai, M., Effects of ausforming temperature on bainite transformation kinetics, microstructures and mechanical properties in ultra-fine bainitic steel, *J. Mater. Res. Technol.*, 2020, V. 9, pp. 1593–1605. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.085>.
4. Mirzaei, A., Ghaderi, R., Hodgson, P.D., Ma, X., Rohrer, G.S., Beladi, H., The influence of parent austenite characteristics on the interviant boundary network in a lath martensitic steel, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2022, N 57, pp. 8904–8923. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07204-w>.
5. Kurteva, K.Yu., Yakovleva, E.A., Fedoseev, M.L., Zisman, A.A., Hlusova, E.I., Vliyanie rezhima goryachej deformacii na teksturu, mikrostrukturu i mekhanicheskie svoystva bejnitnoj stali posle zakalki s prokatnog nagreva s otpuskom [The effect of the hot deformation mode on the texture, microstructure and

mechanical properties of bainite steel after quenching from rolling heating with tempering], *Voprosy materialovedeniya*, 2023, No 4 (116), pp. 20–31.

6. Miyamoto, G., Iwata, N., Takayama, N., Furuhashi, T., Reconstruction of parent austenite grain structure based on crystal orientation map of bainite with and without ausforming, *ISIJ Int.*, 2011, No 51, pp. 1174–1178. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1174>.

7. Abbasi, M., Nelson, T.W., Sorensen, C.D., Wei, L., An approach to prior austenite reconstruction, *Mater. Charact.*, 2012, No 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2012.01.010>.

8. Abbasi, M., Dong-Ik Kim, Nelson, T.W., EBSD and reconstruction of pre-transformation microstructures, examples and complexities in steels, *Mater. Charact.*, 2014, No 95, pp. 219–231. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.06.023>.

9. Huang, C.Y., Ni, H.C., Yen, H.W., New protocol for orientation reconstruction from martensite to austenite in steels, *Materialia*, 2020, No 9, p. 100554. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100554>.

10. Hielscher, R., Nyssönen, T., Niessen, F., Gazder, A.A., The variant graph approach to improved parent grain reconstruction, *Materialia*, 2022, V. 22, p. 101399. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101399>.

11. Kumar, S., Manda, S., Giri, S.K., Kundu, S., Karagadde, S., Balamuralikrishnan, R., Murty, S.V.S.N., Anoop, C.R., Samajdar, I., Relating martensite variant selection with prior austenite microstructure: A coupled study of experiments and pixel-by-pixel reconstruction, *Mater. Charact.*, 2023, V. 199, p. 112822. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112822>.

12. Kurdjumov, G., Sachs, Z., Über den Mechanismus der Stahlhärtung, *Zeitschrift für Physik.*, 1930., No 64, pp. 325–343.

13. Greninger, A.B., Troyano, A.R., The mechanism of martensite formation, *Metals Trans.*, 1949, No 185, pp. 590–598.

14. Nishiyama, Z., Lattice distortion and atomic displacements during the fcc/bcc martensitic transformation, *Sci. Rep. Tohoku Imper. Univ.*, 1934, V. 23, pp. 637–644.

15. Zolotarevsky, N.Y., Panpurin, S.N., Zisman, A.A., Petrov, S.N., Effect of ausforming and cooling condition on the orientation relationship in martensite and bainite of low carbon steels // *Mater. Charact.*, 2015, V. 107, pp. 278–282. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.07.023>.

16. Nyssönen, T., Isakov, M., Peura, P., Kuokkala, V.T., Iterative determination of the orientation relationship between austenite and martensite from a large amount of grain pair misorientations, *Metall. Mater. Trans.*, 2016, V. 47A, pp. 2587–2590. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3462-2>.

17. Brust, A.F., Payton, E.J., Sinha, V., Yardley, V.A., Niezgodna, S.R., Characterization of martensite orientation relationships in steels and ferrous alloys from EBSD data using bayesian inference, *Metall. Mater. Trans.*, 2020, V. 51A, pp. 142–143. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05514-4>.

18. Brown, E.L., Deardo, A.J., On the origin of equiaxed austenite grains that result from the hot rolling of steel, *Metall. Trans.*, 1981, V. 12A, pp. 39–47. <https://doi.org/10.1007/BF02648506>.

19. Jonas, J.J., Transformation textures associated with steel processing // *Microstructure and texture in steels*, Haldar, A., Suwas, S. (Ed.), Springer, New York, 2009, pp. 3–16.

20. Eres-Castellanos, A., Morales-Rivas, L., Jimenez, J.A., Caballero, F.G., Garsia-Mateo, C., Effect of ausforming on the macro- and micro-texture of bainitic microstructures, *Metall. Mater. Trans.*, 2021, No 52A, pp. 4033–4052. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06363-w>.

21. Winkelmann, A., Nolze, G., Cios, G., Tokarski, T., Bala, P., Refined calibration model for improving the orientation precision of electron backscatter diffraction maps, *Materials*, 2020, No 13, p. 2816. <https://doi.org/10.3390/ma13122816>.

22. Bain, E.C., The nature of martensite, *Trans. AIME*, 1924, No 70, pp. 25–46.

23. Morsdorf, L., Tasan, C.C., Ponge, D., Raabe, D., 3D structural and atomic-scale analysis of lath martensite: Effect of the transformation sequence, *Acta Mater.*, 2015, No 95, pp. 366–377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2015.05.023>.

24. Chakraborty, A., Webster, R.F., Primig, S., Lath martensite substructure evolution in low-carbon microalloyed steels, *J. Mater. Sci.*, 2022, V. 57, pp. 10359–10378. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07275-9>.

25. Shibata, A., Miyamoto, G., Morito, Sh., Nakamura, A., Moronaga, T., Kitano, H., Gutierrez-Urrutia, I., Hara, T., Tsuzaki, K., Substructure and crystallography of lath martensite in as-quenched interstitial-free steel and low-carbon steel, *Acta Mater.*, 2023, No 246, p. 118675. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118675>.

26. Cayron, C., Baur, A., Logé, R., Intricate morphologies of laths and blocks in low-carbon martensitic steels, *Materials and Design.*, 2018, No 154, pp. 81–95. <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>.

27. Knyazyuk, T.V., Novoskol'cev, N.S., Zisman, A.A., Hlusova, E.I., Vliyanie mikrolegirovaniya niobiem na kinetiku staticheskoy i dinamicheskoy rekristallizacii pri goryachej prokatke sred-neuglerodistykh vysokoprochnykh stalej [The effect of niobium microalloying on the kinetics of static and dynamic recrystallization during hot rolling of medium-carbon high-strength steels], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, No 1 (101), pp. 5–15.

28. Engler, O., Randle, V., *Introduction to texture analysis: Macrotecture, microtexture, and orientation mapping*, Taylor and Francis group, Abingdon-on-Thames, 2010, 488 p. <https://doi.org/10.1201/9781420063660>.

29. Bernshtejn, M.L., *Termomekhanicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Thermomechanical processing of metals and alloys], Moscow: Metallurgiya, 1968.

UDC 669.295:621.78

## REGULARITIES OF DECOMPOSITION OF METASTABLE PHASES IN TITANIUM PSEUDO- $\beta$ -ALLOYS

I. R. KOZLOVA, Cand Sc. (Eng), E.A. VASILIEVA, Yu.M. MARKOVA

*NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received January 19, 2024

Revised February 6, 2024

Accepted February 13, 2024

**Abstract**—The results of a study of metastable phase decomposition in a titanium pseudo- $\beta$ -alloy are presented. The paper considers main patterns of evolution of the structure and phase composition of a high-alloy titanium grades with a thermally unstable  $\beta$ -phase depending on the heat treatment mode. The influence of the isothermal holding temperature on the morphology and degree of recrystallization of the precipitating phase is shown. The results of the study indicate that low-temperature decomposition of the metastable  $\beta$ -phase in the alloy leads to its embrittlement.

**Keywords:** high-strength titanium pseudo- $\beta$ -alloy, hardening heat treatment, structure, microhardness, equilibrium state, welding thermal cycle

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-17-27

### ACKNOWLEDGMENTS

*Experimental studies were performed on the equipment of the Center for Collective Use "Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials" of the NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey".*

### REFERENCES

1. Nosova, G.I., *Fazovye prevrashcheniya v splavakh titana* [Phase transformations in titanium alloys], Moscow: Metallurgiya, 1968.

2. Glazunov, S.G., Moiseev, V.N., *Titanovye splavy. Konstruktsionnye titanovye splavy* [Titanium alloys. Structural titanium alloys], Moscow: Metallurgiya, 1974.

3. Polkin, I.S., *Uprochnyayushchaya termicheskaya obrabotka titanovykh splavov* [Hardening heat treatment of titanium alloys], Moscow: Metallurgiya, 1984.

4. Kasparova, O.V., Gelman, A.A., Polkin, I.S., Kolodkin, N.I., Kornilova, L.S., *Termicheskaya obrabotka splava VT22* [Heat treatment of VT22 alloy], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1980, No 6, pp. 102–105.

5. Moiseev, V.N., Kulikov, F.R., Kirillov, Yu.G., Sholokhova, L.V., Vaskin, Yu.V., *Svarnye soedineniya titanovykh splavov* (struktura i svoystva) [Welded joints of titanium alloys (structure and properties)], Moscow: Metallurgiya, 1978.

6. Mikhailov, V.I., Kozlova, I.R., Kuznetsov, S.V., Markova, Yu.M., Vasilieva, E.A., *Strukturno-fazovye prevrashcheniya pri svarke vysokolegirovannogo splava titana* [Structural and phase transformations during welding of high-alloy titanium alloy], *Voprosy Materialovedeniya*, 2021, No 3 (107), pp. 63–81.

7. Aleksandrov, V.K., Anoshkin, N.F., Bochvar, G.A. et al., *Polufabrikaty iz titanovykh splavov* [Semi-finished products made of titanium alloys], Moscow: Metallurgiya, 1979.

8. Khorev, A.I., *Termicheskaya, termomekhanicheskaya obrabotka i teksturnoe uprochnenie svari-vaemykh titanovykh splavov* [Thermal, thermomechanical processing and textural hardening of welded titanium alloys], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, No 10, pp. 11–20.

9. Khorev, A.I., *Osnovy legirovaniya i termicheskoy obrabotki svarnykh soedinenii titanovykh beta-splavov* [Fundamentals of alloying and heat treatment of welded joints of titanium beta-alloys], 2012, No 3, pp. 31–39.

10. Shchetnikov, N.V., Savateeva, G.V., Illarionov, A.G., *Raspad metastabilnogo beta-tverdogo rastvora v vysokoprochnom titanovom splave pri starenii* [Decomposition of a metastable beta-solid solution in a high-strength titanium alloy during aging], *Sb. dokl. mezhdunar. konf. «Titan 2006 v SNG»*, Suzdal', 2006, pp. 224–229.

11. Chechulin, B.B., Ushakov, S.S., Razuvaeva, I.N., Gol'dfajn, V.N., *Titanovye splavy v mashinostroenii* [Titanium alloys in mechanical engineering], Leningrad: Mashinostroenie, 1977.

12. Semenova, N.M., *Elektronno-mikroskopicheskoe issledovanie struktury titanovykh splavov s metastabilnoi beta-fazoi* [Electron microscopic study of the structure of titanium alloys with a metastable beta phase]: thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), Moscow, 1972.

13. Shorshorov, M.H., Kulikov, F.R., Kirillov, Yu.G., Meshcheryakov, V.N., *Vliyanie svarki i termoobrabotki na strukturu i svoystva vysokoprochnykh splavov titana* [The effect of welding and heat treatment on the structure and properties of high-strength titanium alloys], *Splavy titana s osobymi svoystvami*, Moscow: Nauka, 1982, pp. 87–96.

14. Kozlova, I.R., Chudakov, E.V., Tretyakova, N.V., Markova, Yu.M., Vasilieva, E.A., *Vliyanie termicheskoy obrabotki na formirovanie struktury i uroven mekhanicheskikh svoystv vysokolegirovannogo splava titana* [The effect of heat treatment on the formation of the structure and the level of mechanical properties of a high-alloyed titanium], *Voprosy Materialovedeniya*, 2019, No 4 (100), pp. 28–41.

UDC 628.475.7

## CREATING PYROLYSIS REACTOR FOR DISPOSAL OF MUNICIPAL SOLID WASTE

A.S. ORYSHCHENKO<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng), A.D. KASHTANOV<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng), E.D. BLANK<sup>1</sup>, Cand Sc. (Eng),  
V.A. GERASIMOV<sup>1</sup>, V.K. IKONNIKOV<sup>2</sup>, Cand Sc. (Eng)

<sup>1</sup>NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)

<sup>2</sup>JSC “RRC Applied Chemistry” (GIPH), 26a Krylenko St, 193232 St Petersburg, Russian Federation.  
E-mail: [giph@giph.su](mailto:giph@giph.su)

Received December 22, 2023

Revised December 22, 2023

Accepted January 10, 2024

**Abstract**—In order to utilize municipal solid waste (MSW), a prototype reactor for thermal processing was created using materials developed at the National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural materials “Prometey”, the technology for decomposing MSW in the reactor was developed, and its tests were carried out. The test results allowed us to conclude that the use of pyrolysis reactors for recycling ensures the environmental safety of the process and produces high-temperature gas (1000–1200°C) suitable for further use in power plants. Technical requirements were determined for the development of an industrial reactor for the disposal of solid waste with a productivity of up to 10 t/h, taking into account the shortcomings identified during testing of the prototype.

**Keywords:** solid municipal waste, recycling, pyrolysis reactor, thermal processing, high-temperature gas, technical requirements

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-28-32

## REFERENCES

1. *Informatsionno-tehnichesky spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Obezvrezhivanie otkhodov termicheskim sposobom (szhiganie otkhodov)* [An information and technical guide to the best available technologies. Waste disposal by thermal method (waste incineration)], Moscow: Federalnoe Agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii, 2015.
2. Ikonnikov, V.K., *Experimental studies of pyrolysis and gasification of solid waste of various morphological compositions, including chlorine and sulfur-containing components, using the method of thermobarochemical destruction*, Russian Scientific Center "Applied Chemistry", Petersburg, 2014, p. 133.
3. Ikonnikov, V.K., Gorkov, V.M., *Avtonomnye transportnye modulnye energoustanovki dlya pererabotki tverdykh bytovykh otkhodov (TBO)* [Autonomous modular transport power plants for the processing of solid household waste (MSW)], *Collection of documents of the VIII Nevsky International Ecological Congress*, Additional materials, St Petersburg, 2017, pp. 84–90.
4. Oryshchenko, A.S., Utkin, Yu.A., *Struktura i mekhanicheskie svoystva zharostoikogo splava 45Kh26N33S2B2 i metalla ego svarnykh soedinenii pri vysokikh temperaturakh* [Structure and mechanical properties of heat-resistant alloy 45Kh26H33X2B2 and metal of its welded joints at high temperatures], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2006, No 6, pp. 19–25.
5. Oryshchenko, A.S., *Konstruksionnye materialy dlya radiantnykh zmeevikov* [Construction materials for radiant coils], *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2007, No 5, pp. 44–47.

UDC 666.3–187:661.862'022

## THE INFLUENCE OF THE $Y_3Al_5O_{12}$ ON THE STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES OF CERAMICS OF THE $Al_2O_3 - Y_2O_3$ SYSTEM

A.V. MALETSKII<sup>1,2</sup>, G.K. VOLKOVA<sup>1</sup>, T.E. KONSTANTINOVA<sup>1</sup>, Dr Sc. (Phys-Math), D.R. BELICHKO<sup>1</sup>, I.K. NOSOLEV<sup>1</sup>, A.S. DOROSHKEVICH<sup>2,3</sup>, Zh.V. MEZENTSEVA<sup>2</sup>, B.L. OKSENGENDLER<sup>4</sup>, V. TEOFILOVIĆ<sup>5</sup>, T. ERSCEG<sup>5</sup>, I. RISTIĆ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>A.A. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, 72 Rozy Lyuksemburg St, 83114 Donetsk, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Moscow Region, Russia

<sup>3</sup>Dubna State University, 19 University St, 141982, Dubna, Moscow Region, Russia

<sup>4</sup>Physics and Technology Institute NPO Physics-Sun, st. Chingiz Aitmatov 2B, 100084 Tashkent, Uzbekistan

<sup>5</sup>University of Novi Sad, Faculty of Technology Novi Sad, 21000 Novi Sad, Serbia

Received December 5, 2023

Revised December 8, 2023

Accepted December 22, 2023

**Abstract**—The results of the study of the structure and physico-mechanical properties of ceramics composites  $\alpha-Al_2O_3 + n Y_2O_3$  ( $n = 0; 0.5; 1; 1.5; 2; 3; 4; 5$  wt.%) based on the basis of polymorphic modifications  $\gamma + \theta-Al_2O_3$  depending on the concentration of the  $Y_2O_3$  doping impurity and the annealing temperature of the powder mixtures (800 and 900°C) are presented. The effect of mutual protection against crystallization was discovered, which results in mutual inhibition of crystallization processes in  $Al_2O_3-Y_2O_3$  powder systems. By X-ray diffraction analysis, the formation of a phase of yttrium-aluminum garnet  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG) in ceramics has been established. The dependence of the mechanical characteristics of the materials under study on the amount and size of the formed phase YAG has been revealed.

**Keywords:** aluminum oxide, yttrium oxide, polymorphic modifications, yttrium-aluminum granet, structure, physico-mechanical characteristics

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-117-1-33-45

## ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out under cooperation projects Serbia – Joint Institute for Nuclear Research No 50, 2024, paragraphs 7 and 8, Serbia – Joint Institute for Nuclear Research No 51, paragraphs 4 and 5, Belarus – Joint Institute for Nuclear Research No 130 p. 7 and 8, cooperation program Bulgaria – Joint Institute for Nuclear Research No 366/2021, paragraph 84.

## REFERENCES

1. Bordina, G.E., Lopina, N.P., Nekrasova, E.G., Bigina, Yu.V., Suhareva, D.D., *Materialy budushchego* [Materials of the future], 2018, No 2 (68), pp. 11–12.
2. Kant, T., Shrivastava, K., Dewangan, K., Kumar, A., Jaiswal, N.K., Deb, M.K., Pervez, S., Design and development of conductive nanomaterials for electrochemical sensors: a modern approach, *Materials Today Chemistry*, 2022, V. 24. DOI.org/10.1016/j.mtchem.2021.100769.
3. Zhu, C.Zh., Yang, G.H., Li, H., Du, D., Lin, Y., Electrochemical Sensors and Biosensors Based on Nanomaterials and Nanostructures, *Analytical Chemistry*, 2015, No 87 (1), pp. 230–249. DOI: 10.1021/ac5039863.
4. Luo, X., Morrin, A., Killard, A.J., Smyth, M.R., *Application of Nanoparticles in Electrochemical Sensors and Biosensors*, 2006, No 18 (4), pp. 319–326. DOI:10.1002/elan.200503415.
5. Shrivastava, K., Ghosale, A., Bajpai, P.K., Kant, T., Dewangan, K., Shankar, R., Advances in flexible electronics and electrochemical sensors using conducting nanomaterials: A review, *Microchemical Journal*, 2020, V. 156. DOI.org/10.1016/j.microc.2020.104944.
6. Baig, N., Kammakam, I., Falath, W., Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges, *Materials Advances*, 2021, No 2. DOI: 10.1039/d0ma00807a.
7. Wahsh, M.M.S., Khattab, R.M., Awaad, M., Thermo-mechanical properties of mullite/zirconia reinforced alumina ceramic composites, *Materials & Design*, 2012, V. 41, pp. 31–36. DOI.org/10.1016/j.matdes.2012.04.040.
8. García Ferré, F., Mairov, A., Ceseracciu, L., Serruys, Y., Trocellier, P., Baumier, C., Kařtasov, O., Brescia, R., Gastaldi, D., Vena, P., Beghi, M.G., Beck, L., Sridharan, K., Di Fonzo, F., *Radiation endurance in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoceramics*, Scientific Reports 6. DOI:10.1038/srep33478.
9. Maletskiy, A.V., Belichko, D.R., Konstantinova, T.E., Volkova, G.K., Doroshkevich, A.S., Lyubchik, A.I., Burkhovetskiy, V.V., Aleksandrov, V.A., Mardare, D., Mita, C., Chicea, D., Khiem, L.H., Structure formation and properties of corundum ceramics based on metastable aluminium oxide doped with stabilized zirconium dioxide, *Ceramics International*, 2021, V. 47, Is. 14, pp. 19489–19495. DOI:10.1016/j.ceramint.2021.03.286.
10. Maletskiy, A.V., Konstantinova, T.E., Volkova, G.K., Belichko, D.R., Doroshkevich, A.S., Popov, E., Cornei, N., Jasinska, B., Mezentseva, Zh.V., Tatarinova, A.A., Mirzayev, M.N., Khiem, L.H., Ristić, I., Teofilović, V., Balvanović, R., High hydrostatic pressure influence on the properties and tendency to agglomeration of ZrO<sub>2</sub> grains of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–YSZ composite ceramics system, *Ceramics International*, 2023, V 49, Is. 10, pp. 16044–16052. DOI.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.202.
11. Green, D.J., Transformation toughening and grain size control in  $\beta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> composites, *J. Mater. Sci.*, 1985, No 20, pp. 2639–2646. DOI.org/10.1007/BF00556096.
12. Azar, M., Palmero, P., Lombardi, M., Garnier, V., Montanaro, L., Fantozzi, G., Chevalier, J., Effect of initial particle packing on the sintering of nanostructured transition alumina, *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, V. 28, Is. 6, pp. 1121–1128. DOI.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.10.003.
13. Vovk, O., Siryk, Y., Nizhankovskiy, S., Fedorov, A., Mateichenko, P., Morphology and microstructure of crystalline YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites grown by the horizontal directional crystallization, *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, V. 934. DOI.org/10.1016/j.jallcom.2022.168004.
14. Li, L., Xie, F., Wu, X., He, J., Li, Sh., Microstructure and phase formation of atmospheric plasma sprayed YAG coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2023, V. 466. DOI.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129614.
15. Glushkova, V.B., Krzhizhanovskaya, V.A., Egorova, O.N., Udalov, Yu.P., Kachalova, V.P., Vzaimodejstvie oksidov itriya i alyuminiya [Interaction of yttrium and aluminum oxides], *Izv. AN SSSR. Neorganicheskie materialy*, 1983, V. 19, No 1, pp. 95–99.

16. Lukin, E.S., *Sovremennaya vysokoplotnaya oksidnaya keramika s reguliruemoy strukturoj* [Modern high-density oxide ceramics with adjustable structure], *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 1997, No 9, pp. 13–18.
17. Danilenko, I., Prokhorenko, S., Konstantinova, T., Ahkozov, L., Burkhovetski, V., Glazunova, V., Effect of small amount of alumina on structure, wear and mechanical properties of 3Y–TZP ceramics, *World Journal of Engineering*, 2014, V. 11, pp. 9–16.
18. Strekalovskij, V.N., Polezhaev, Yu.M., Pal'guev, S.F., *Oksidy s primesnoj razupor-yadochennost'yu: sostav, struktura, fazovye prevrashcheniya* [Oxides with impurity disorder: composition, structure, phase transformations], A. D. Neujmin (Ed.), Moscow: Nauka, 1987.
19. Priluckaya, E.V., Protasov, A.S., Senina, M.O., Lemeshev, D.O., Fazovye perekhody v sisteme ittrij-aluminievyy granat – oksid skandiya i perspektivy polucheniya vysokoplotnoj keramiki [Phase transitions in the yttrium-aluminum garnet– scandium oxide system and prospects for obtaining high-density ceramics], *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii*, 2022, V. 36, No 3 (252), pp. 127–129.
20. Bondar, I.A., Koroleva, L.N., Bezruk, E.T., Physicochemical properties of yttrium aluminates and gallates, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorg. Mater.*, 1984, V. 20, No 2, pp. 257–261.
21. Ermolenko, N.F., Efros, M.D., Ermolenko, E.N., Vliyanie soosazhdeniya gelej na strukturu i sorbicionnye svojstva poluchaemykh iz nih oksidnykh katalizatorov [The effect of co-deposition of gels on the structure and sorption properties of the oxide catalysts obtained from them], *Izv. AN BSSR. Seriya tekhnicheskikh nauk*, 1968, No 1, pp. 1678–1687.
22. Anderson, Dzh., *Struktura metallicheskih katalizatorov* [Structure of metal catalysts], Moscow: Mir, 1973.

UDC 621.793.3:621.357

## NANOSTRUCTURE OF GALVANIC NI–W COATINGS ANNEALED AT DIFFERENT TEMPERATURES

A.V. KRASIKOV, Cand Sc. (Chem), M.V. MERKULOVA, M.S. MIKHAILOV, S.N. PETROV, Dr Sc. (Eng)

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received May 6, 2024

Revised May 21, 2024

Accepted May 22, 2024

**Abstract**—Transmission electron microscopy was used to study crystallization during heat treatment of intermetallic phases in a coating of the Ni–W system with 44 wt.% tungsten. Amorphous in the initial state, the coating crystallizes by various mechanisms depending on temperature. The structure of the resulting coatings is close to the structure of classical composite electrochemical coatings. The study of the structure of coatings annealed under various conditions made it possible to establish heat treatment modes for the formation of a structure that provides maximum microhardness.

**Keywords:** Ni–W coating, heat treatment, electroplating, intermetallic compounds, nanostructure, transmission electron microscopy, composite electrochemical coatings

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-46-54

## REFERENCES

1. Maslov, A.L., Polushin, N.I., Ovchinnikova, M.S., Kuchina, I.Yu., Issledovanie nanoalmaznogo poroshka i kompozitsionnykh elektrokhimicheskikh pokryty, uprochnennykh nanodispersnymi almazami [Investigation of nanodiamond powder and composite electrochemical coatings reinforced with nanodisperse diamonds], *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2015, V. 58, No 5, pp. 65–68.
2. Shi, L., Sun, Ch., Gao, P., Zhou, F., Li, W., Mechanical properties and wear and corrosion resistance of electrodeposited Ni–Co/SiC nanocomposite coating, *Applied surface science*, 2006, V. 252, Is. 10, pp. 3591–3599.
3. Garcia, I., Fransaer, J., Celis, J.P., Electrodeposition and sliding wear resistance of nickel composite coatings containing micron and submicron SiC particles, *Surface and Coatings Technology*, 2001, V. 148, No 2–3, pp. 171–178.

4. Younes, O., Zhu, L., Rosenberg, Y., Shacham-Diamand, Y., Gileadi, E., Electroplating of Amorphous Thin Films of Tungsten/Nickel Alloys, *Langmuir*, 2001, No 17, pp. 8270–8275.
5. Younes-Metzler, O., Zhu, L., Gileadi, E., The anomalous codeposition of tungsten in the presence of nickel, *Electrochimica Acta*, 2003, No 48, pp. 2551–2562.
6. Trelewicz, J.R., Schuh, C.A., Hot Nanoindentation of Nanocrystalline Ni–W Alloys, *Scripta Materialia*, 2009, V. 61, pp. 1056–1059.
7. Tsyntsaru, N., Cesiulis, H., Donten, M., Sort, J., Pellicer, E., Podlaha-Murphy, E.J., Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2012, V. 48, No 6, pp. 491–520.
8. Eliaz, N., Gileadi, E., Induced Codeposition of Alloys of Tungsten, Molybdenum and Rhenium with Transition Metals, *Modern Aspects of Electrochemistry*, 2008, No 42, pp. 191–301.
9. Younes, O., Gileadi, E., Electrodeposition of High Tungsten Content Ni/W Alloys, *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2000, V. 12, No 3, pp. 543–545.
10. Oue, S., Nakano, H., Kobayashi, S., Fukushima, H., Structure and Codeposition Behavior of Ni–W Alloys Electrodeposited from Ammoniacal Citrate Solutions, *J. Electrochem. Soc.*, 2009, V. 156, pp. D17–D22.
11. Brenner, A., Burkhead, P., Seegmiller, E., Electrodeposition of tungsten alloys containing iron, nickel and cobalt, *Journal of research of the national bureau of standards*, 1947, V. 39, pp. 351–383.
12. Vasko, A.T., *Elektrokhimiya molibdena i volframa* [Electrochemistry of molybdenum and tungsten], Kiev: Naukova dumka, 1977.
13. Allahyazadeh, M.H., Aliofkhazraei, M., Rezvanian, A.R., Torabinejad, V., Sabour Rouhaghdam, A.R., Ni–W electrodeposited coatings: Characterization, properties and applications, *Surface & Coatings Technology*, 2016, No 307, pp. 978–1010.
14. Merkulova, M.V., Krasikov, A.V., Mikhailov, M.S., Vliyanie rezhimov termoobrabotki na strukturu i mikrotverdst nanokompozitsionnogo pokrytiya Ni–W [The effect of heat treatment modes on the structure and microhardness of the Ni–W nanocomposite coating], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, No 4 (112), pp. 182–190.
15. Schlossmacher, P., Yamasaki, T., Structural Analysis of Electroplated Amorphous-Nanocrystalline Ni–W, *Microchim. Acta*, 2000, No 132, pp. 309–313.

UDC 621.793.3:[669. 248+666.233]:666.792

## STRUCTURAL FEATURES OF COMPOSITE ELECTROCHEMICAL COATINGS NICKEL – DIAMOND

A.V. KRASIKOV, Cand Sc. (Chem)

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received January 31, 2023

Revised February 6, 2024

Accepted February 13, 2024

**Abstract**—The paper studies the structure of nickel-diamond composite electrochemical coatings obtained from the suspension electrolyte with ASM 7/5 powder. When the content of diamond powder in the electrolyte is 10 g/l, coatings are deposited with a uniform distribution of the reinforcing phase and a diamond volume fraction of up to 20%. Studies of the structure of the nickel coating matrix have revealed that, in comparison with standard galvanic nickel, which has a pronounced texture, the composite coating matrix has a finely dispersed structure with random grain orientation. Comparative measurements of nanohardness made it possible to record the strengthening of composite coatings matrix compared to galvanic nickel. Along with the high hardness of the reinforcing component and the relatively large particle size, this determines the high microhardness of the composite coating, which averages 860 HV.

**Keywords:** composite electrochemical coatings, nickel – diamond, electrolyte suspension, structure studies, nanohardness

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-55-61

## ACKNOWLEDGMENTS

Experimental studies were performed on the equipment of the Center for Collective Use “Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials” of the NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”.

The author expresses special gratitude to the engineer 2<sup>nd</sup> category of the Center for Collective Use of Scientific Equipment M.V. Staritsyn for his contribution to the study of the structure of coatings and engineer 1<sup>st</sup> category A.A. Kashirina for assistance in researching the properties of coatings.

## REFERENCES

1. Huang, Ch. A., Yang, Sh. W., Shen, Ch. H., Cheng, K. Ch., Wang, H., Lai P. L., Fabrication and evaluation of electroplated Ni – diamond and Ni – B-diamond milling tools with a high density of diamond particles, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, V. 104, pp. 2981–2989.
2. Yaskelchik, V.V., Zharsky, I.M., Burkat, G.K., Chernik, A.A., Mikhedova, E.V., Poluchenie i svoistva mednykh pokryty iz tsitratnogo elektrolita v prisutstvii ultradispersnykhalmazov [Preparation and properties of copper coatings from citrate electrolyte in the presence of ultrafine diamonds], *Izvestiya SPbGTI (TU)*, 2015, No 28, pp. 25–28.
3. Isaev, A.V., Zhirnova, T.A., Mikhaleiko, M.G., Isaev, V.V., Bakaev, V.V., Vliyanie ultradispersnykhalmazov na katodnoe osazhdenie serebra [The effect of ultrafine diamonds on the cathodic deposition of silver], *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva*, 2014, No 2 (104), pp. 231–240.
4. Kuzmar, I.I., Vakulchik, V.A., Kushner, L.K., Khmyl, A.A., Optimizatsiya uslovy elektroosazhdeniya kompozitsionnykh pokryty olovo – ultradispersnyalmaz [Optimization of electrodeposition conditions of tin – ultrafine diamond composite coatings], *Doklady BGUIR*, 2011, No 6 (60), pp. 34–38.
5. Galevsky, G.V., Rudneva, V.V., Garbuzova, A.K., Elektroosazhdenie, struktura i svoistva kompozitsionnogo pokrytiya nikel – karbid titana [Electrodeposition, structure and properties of a composite coating of nickel – titanium carbide], *Materialovedenie. Energetika*, 2015, No 1 (214), pp. 154–164.
6. Wang, Sh.-Ch., Wei, W.-Ch. J., Kinetics of electroplating process of nanosized ceramic particle/Ni composite, *Materials Chemistry and Physics*, 2003, V. 78, pp. 574–580.
7. Fink, C.G., Prince, J.D., The codeposition of copper and graphite, *Trans. Am. Electrochem. Soc.*, 1928, V. 54, pp. 315–321.
8. Krasikov, A.V., Agafonov, D.V., Markov, M.A., Belyakov, A.N., Kravchenko, I.N., Galinovskiy, A.L., Kuznetsov, Yu.A., Electrodeposition of Ni–SiC composite coating from a vibration-stabilized electrolyte-suspension, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, V. 2023, No 6, pp. 796–802.
9. Krasikov, A.V., Markov, M.A., Krasikov, V.L., Kravchenko, I.N., Staritsyn, M.V., Bykova, A.D., Belyakov, A.N., Influence of vibration parameters during electrodeposition of Ni–SiC composite coatings from a vibration stabilized suspension, *Journal of machinery manufacture and reliability*, 2022, V. 51, No 4, pp. 300–305.
10. Krasikov, A.V., Krasikov, V.L., Markov, M.A., Kravchenko, I.N., Galinovskiy, A.L., Belyakov, A.N., Staritsyn, M.V., Bykova, A.D., Influence of vibration parameters on the composition of an electrochemical nickel-submicron silicon carbide composite coating, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, V. 2023, No 6, pp. 803–808.

UDC 621.762.5:621.318.13:621.785.3

## INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON PHASE AND STRUCTURE FORMATION AND MAGNETIC PROPERTIES OF SOFT MAGNETIC ALLOY 80NKHS MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGY

T.V. KNYAZYUK, Cand Sc. (Eng), L.V. MUKHAMEDZYANOVA, N.V. YAKOVLEVA, S.A. MANNINEN, A.S. ZHUKOV, V.V. BOBYR, P.A. KUZNETSOV, Dr Sc (Eng)

NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)

Received October 22, 2023

Revised January 22, 2024

Accepted January 23, 2024

**Abstract**—The evolution of the structure and phase composition of the soft magnetic alloy 80NKhS, produced by selective laser melting and annealed at different temperatures, was studied by light and electron microscopy, X-ray spectral and X-ray structural analyses. It has been established that a weakening of structural anisotropy and an increase in the average grain size occurs only at temperatures of 1250°C, associated with the oxides of Al, Ti, Si, Mn, Cr and nickel silicide previously formed during additive alloying. These phases have high thermal stability and inhibit grain growth, limiting the magnetic permeability of the alloy. To achieve the required level of magnetic properties, the soft magnetic alloy 80NKhS, manufactured by the additive method, must be annealed at higher temperatures than specified in GOST 10160–75.

**Keywords:** additive technologies, heat treatment, selective laser alloying, grain size, phase composition, metal powder, soft magnetic alloy, 80NKhS, magnetic properties, structure

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-62-72

#### ACKNOWLEDGMENTS

*Experimental studies were performed on the equipment of the Center for Collective Use “Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials” of the NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey” with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the RF, Agreement 13.TsKP.21.0014 (075-11-2021-068), unique identifier RF–2296.61321X0014.*

#### REFERENCES

1. Kasatkin, G.S., Fedotov, V.V., *Issledovanie svoystv magnitnykh materialov* [Investigation of the properties of magnetic materials], Moscow: MMIT, 2008.
2. GOST 10160–75: *Splavi pretsizionnie magnitno-myagkie. Tekhnicheskie usloviya* [Precision magnetically soft alloys. Technical conditions], Moscow: Izd-vo standartov, 1975.
3. Preobrazhensky, A.A., Bishard, Ye.G., *Magnitnie materialy i elementi* [Magnetic materials and elements]: study guide, Moscow: Vysshaya shkola, 1986.
4. Périgo, E.A., Jacimovic, J., García Ferré, F., Scherf, L.M., Additive Manufacturing of Magnetic Materials, *Additive Manufacturing*, 2019, V. 30, p. 100870. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100870>.
5. Goll, D., et al., Additive manufacturing of soft magnetic materials and components, *Additive Manufacturing*, 2019, V. 27, pp. 428–429. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.021>.
6. Mikler C., et al., Laser Additive Manufacturing of Magnetic Materials. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2017, V. 3, pp. 532–543. URL: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2257-2>.
7. Mikler, C., et al., Tuning the phase stability and magnetic properties of laser additively processed Fe–30%Ni soft magnetic alloys, *Materials Letters*, 2017, V. 199, pp. 88–92. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.04.054>.
8. Garibaldi, M., et al., Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted Fe–6.9%wt Si soft magnets, *Materials Characterization*, 2018, V. 143, pp. 144–151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.016>.
9. Shishkovsky, I.V., Peculiarities of selective laser melting process for permalloy powder, *Materials Letters*, 2006, V. 171, pp. 208–211. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.02.099>.
10. Zhang, B., Fenineche, N.E., Liao, H., Coddet, C., Magnetic properties of in-situ synthesized FeNi3 by selective laser melting Fe–80%Ni powders, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, V. 336, pp. 49–54. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.02.014>.
11. Zhang, B., Fenineche, N.E., Liao, H., Coddet, C., Microstructure and Magnetic Properties of Fe–Ni Alloy Fabricated by Selective Laser Melting Fe/Ni Mixed Powders, *JMST*, 2013, V. 29, Is. 8, pp. 757–760. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.05.001>.
12. Mazeeva, A.K., et al., Magnetic properties of Fe–Ni permalloy produced by selective laser, *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, V. 814, p. 152315. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152315>.
13. Staritsyn, M.V., Kuznetsov, P.A., Petrov, S.N., et al., Composite Structure as a Strengthening Factor of Stainless Austenitic Chromium–Nickel Additive Steel, *Phys. Metals Metallogr.*, 2020, No 121, pp. 337–343. URL: <https://doi.org/10.1134/S0031918X20040146>.

14. Saedi, K., Lofaj, F., Kevetkova, L., Shen, Z., Austenitic stainless steel strengthened by the in-situ formation of oxide nano inclusions, *RSC Adv.*, 2015, No 5, pp. 20747–20750.
15. Flemings, M.K., *Protsessi zatverdevaniya* [Solidification processes], Zhukov, A.A., Rabinovich, B.V. (Eds.), Moscow: Mir, 1977.
16. Sames, W.J., List, F.A., Pannala, S., Dehoff, R.R., Babu, S.S., The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *Int Mater Rev.*, 2016, No 61, pp. 315–360. URL: <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>.
17. Song, B., Dong, S., Liu, Q., Liao, H., Coddet, C., Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: Microstructure, residual stress and tensile behavior, *Mater Des.*, 2014, No 54, pp. 727–733. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.085>.
18. Kanagarajah, P., Brenne, F., Niendorf, T., Maier, H.J., Inconel 939 processed by selective laser melting: Effect of microstructure and temperature on the mechanical properties under static and cyclic loading, *Mater. Sci. Eng. A.*, 2013, No 588, pp. 188–195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.09.025>.
19. Hengsbach, F., Koppa, P., Duschik, K., Holzweissig, M.J., Burns, M., Nellesen, J., Tillmann, W., Tröster, T., Hoyer, K.-P., Schaper, M., Duplex stainless steel fabricated by selective laser melting. Microstructural and mechanical properties, *Mater Des.*, 2017, No 133, pp. 136–142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.046>.
20. Suzuki, H., Weldability of Modern Structural Steels in Japan, *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1983, No 23, pp. 189–204. URL: <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.189>.
21. Liu, F., Lin, X., Yang, G., Song, M., Chen, J., Huang, W., Microstructure and residual stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy, *Opt Laser Technol.*, 2011, No 43, pp. 208–213. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.06.015>.
22. Bertsch, K.M., De Bellefon, G.M., Kuehl, B., Thoma, D.J., Origin of dislocation structures in an additively manufactured austenitic stainless steel 316L, *Acta Materialia*, 2020, No 199, pp. 19–33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.07.063>.
23. Deng, P., Yin, H., Song, M., Li, D., Zheng, Yu., Prorok, B.C., Lou, X., On the Thermal Stability of Dislocation Cellular Structures in Additively Manufactured Austenitic Stainless Steels, *Roles of Heavy Element Segregation and Stacking Fault Energy. Jom.*, 2020, No 72, pp. 4232–4243. URL: <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04427-7>.
24. Zhukov, A.S., Manninen, S.A., Tit, M.A., Knyazyuk, T.V., Kuznetsov, P.A., Issledovanie struktury i magnitnikh svoystv additivnogo magnitomyagkogo splava 80NKhS [Investigation of the structure and magnetic properties of an additive soft magnetic alloy 80NKhS], *Fizika metallov i metalovedenie*, 2023, No 4, pp. 353–359.

UDC 621.74:621.316.9

## STUDY OF ELECTRICAL STRENGTH AND ELECTRICAL RESISTANCE OF CAST MICROWIRES IN GLASS INSULATION

T.I. BOBKOVA<sup>1</sup>, Cand Sc. (Eng), A.F. VASILIEV<sup>1</sup>, V.I. MARGOLIN<sup>2</sup>, Dr Sc. (Eng),  
N.A. SERDYUK<sup>1</sup>, Cand Sc. (Eng), V.A. TUPIK<sup>2</sup>, Dr Sc. (Eng), B.V. FARMAKOVSKY<sup>1</sup>, Cand Sc. (Eng),  
M.V. KHROMENKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)

<sup>2</sup> St Petersburg State Electrotechnical Univeristy “LETI”, 5 Professora Popova St, 197376 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [info@etu.ru](mailto:info@etu.ru)

Received December 21, 2023

Revised January 24, 2024

Accepted January 25, 2024

**Abstract**—The results of a comprehensive study of the electrical strength of glass insulation and the electrical resistance of cast microwires insulated with borosilicate glass in the temperature range from –60 to 155°C are presented.

**Keywords:** cast microwire, glass insulation, electrical strength, electrical resistance, breakdown voltage, positive temperatures, negative temperatures

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-73-77

#### ACKNOWLEDGMENTS

*Experimental studies were performed on the equipment of the Center for Collective Use “Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials” of the NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey” with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the RF, Agreement 13.TsKP.21.0014 (075-11-2021-068), unique identifier RF–2296.61321X0014.*

#### REFERENCES

1. Badinter, E.Ya., et al., *Litoy mikroprovod i ego svoystva* [Cast microwire and its properties], Kishinev: Shtiintsa, 1973.
2. *Litoy mikroprovod i ego primeneniye v nauke i tekhnike* [Cast microwire and its application in science and technology], Gitsu, D.V. (Ed.), Kishinev: Shtiintsa, 1988.
3. Masailo, D.V., Kuznetsov, P.A., Farmakovskiy, B.V., Vysokoprochnyye litye mikroprovoda dlya armirovaniya konstruktsionnykh kompozitov [High-strength cast microwires for reinforcing structural composites], *Metalloobrabotka*, 2012, No 4, pp. 23–27.
4. Gorynin, I.V., Farmakovskiy, B.V., Dlinnomernyye litye mikroprovoda v steklyannoy izolyatsii s zhilkoi iz intermetallicheskiykh soedineniy [Long-length cast microwires in glass insulation with a vein of intermetallic compounds], *Voprosy Materialovedeniya*, 2015, No 4(84), pp. 58–61.
5. Bataev, A.A., *Kompozitsionnyye materialy: stroeniye, polucheniyey, primeneniye* [Composite materials: structure, preparation, application], Moscow: Logos, 2006.
6. Mileiko, S.T., Tony Kelly i kompozity segodnya. Ch. 2: Kompozity s metallicheskoj matritsey [Anthony Kelly and Composites Today. Part 2: Composites with a metal matrix], *Kompozity i nanostruktury*, 2021, V. 13, No 3–4 (51–52), pp. 59–107.
7. Burkhanov, G.S., Burkhanov, Yu.S., Sovremennyye podkhody k sozdaniyu funktsionalnykh materialov [Modern approaches to the creation of functional materials], *Materialovedeniye*, 2008, No 3, pp. 184–190.

UDC 621.793.7:669.65.018.24

#### PRODUCING ANTIFRICTION BABBITT B83 LAYER BY GAS-DYNAMIC COLD SPRAYING

R.Yu. BYSTROV, D.A. GERASHCHENKOV, Dr Sc (Eng), E.Yu. GERASHCHENKOVA,  
A.A. KASHIRINA, E.N. BARKOVSKAYA

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received January 31, 2023

Revised February 6, 2024

Accepted February 13, 2024

**Abstract**—The technological processing of antifriction layer from Babbitt by gas-dynamic cold spraying was carried out on the DIMET-403. The coating was sprayed on plain bearings for marine low- and medium-speed diesel engines, turbines, and shaft lines. Technical requirements for antifriction layer materials, standard technological processes of preparation, spraying, heat treatment, and quality control are also considered.

**Keywords:** cold gas-dynamic spraying, microhardness, adhesion, babbitt, plain bearings

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-78-90

#### ACKNOWLEDGMENTS

*The work was carried out with the support of the world-class scientific and educational center “Russian Arctic: new materials, technologies and research methods”.*

*Experimental studies were carried out on the equipment of the Center for the collective use of scientific equipment “Composition, structure and properties of structural and functional materials” of the National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of CM “Prometey” with financial support*

## REFERENCES

1. Alifanov, A.V., Razrabotka i issledovanie modifitsirovannogo babbittovogo materiala s tselyu ispolzovaniya ego pri remonte tyazhelonagruzhennykh podshipnikov skolzheniya [Development and research of modified Babbitt material for the purpose of using it in the repair of heavily loaded plain bearings], *Litie i metallurgiya*, 2012, No 3 (66), pp. 83–86.
2. 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, No 7 (6), pp. 863–867. URL: <https://doi.org/10.1134/S2075113316060125>.
3. Gerashchenkov, D.A., Farmakovskiy, 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, No 60 (9–10), pp. 1103–1112. URL: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0413-0>.
4. Gerashchenkov, D.A., Vasiliev, A.F., Farmakovskiy, B.V., Mashek, A.Ch., Issledovanie temperatury potoka v protsesse kholodnogo gazodinamicheskogo napyleniya funktsionalnykh pokryty [Study of the flow temperature in the process of cold gas-dynamic spraying of functional coatings], *Voprosy Materialovedeniya*, 2014, No 1 (77), pp. 87–96.
5. Bystrov, R.Yu., Gerashchenkov, D.A., Coating of a multicomponent system Al–Cr–Ni–Co–Fe on a steel substrate obtained by laser, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2022, December, No 13, pp. 1569–1574. DOI: 10.1134/S2075113322060065.
6. Chudina, O.V., *Kombinirovannyye tekhnologii poverkhnostnogo uprochneniya konstruktsionnykh staley* [Combined technologies of surface hardening of structural steels]: thesis for the degree of Dr of Sciences (Eng), Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy avtomobilno-dorozhnyy institut, 2003.

UDC 678.067:620.17

## ON THE PHYSICAL-MECHANICAL AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF ANTIFRICTION CARBON FIBER BASED ON A MODIFIED THERMOSETTING MATRIX

D.D. DVORYANTSEV, I.V. LISHEVICH, Cand Sc. (Eng), A.S. SARGSYAN, Cand Sc. (Eng),  
A.S. SAVELOV, Cand Sc. (Eng), E.A. SHARKO

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received November 29, 2023

Revised December 20, 2023

Accepted December 22, 2023

**Abstract**—The physical-mechanical and tribological properties of anti-friction carbon fiber plastic UGET based on low-modulus carbon fabric “Ural T-15R” have been studied in order to increase the magnitude of the ultimate deformation and reduce the elastic modulus through the use of a modified thermosetting matrix ET-4 instead of the traditionally used ET-2.

Modes of polymerization and of heat treatment of epoxy binders were selected considering the results of the experiments. Prototypes of prepregs were obtained by solution impregnation on the UPST-1000M line and then processed into PCM by hot pressing. Laboratory samples were made and physical and mechanical tests were carried out to determine the ultimate strength under compression, shear and bending stress under destruction, as well as Charpy impact strength. Steel 20Kh13 and oxidized titanium alloy PT-3V were used as counter body rollers to determine carbon fiber tribosets.

It was shown that carbon fiber samples based on chemically modified binder ET-4 with two-stage polymerization and heat treatment mode in the range of 90°C to 180°C both have better physical-mechanical and tribotechnical properties, in contrast with the analogue with a three-stage mode and carbon fiber carbon heat at friction over 20Kh13 steel and oxidized titanium alloy PT-3V.

*Keywords:* modified epoxy binder, antifriction carbon plastic, friction, wear

## REFERENCES

1. Bakhareva, V.E., *Sovremennye mashinostroitelnye materialy. Nemetallicheskie materialy* [Modern engineering materials. Non-metallic materials]: reference book, I.V. Gorynin (Ed.), St Petersburg: Professional, 2014, pp. 79–133.
2. Dvoryantsev, D.D., Lishevich, I.V., Sargsyan, A.S., Morozov, D.L., Sharko, E.A., Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh i tribotekhnicheskikh svoystv antifriktsionnogo ugleplastika na osnove modifitsirovannoi termoreaktivnoi matritsy [Investigation of the physico-mechanical and tribotechnical properties of antifriction carbon fiber based on a modified thermosetting matrix], *Tezisy k dokladu 20-i konferentsii molodykh uchennykh i spetsialistov "Novye materialy i tekhnologii" (KMUS-2023)*, Kurchatovskiy institut – CRISM "Prometey", 2023.
3. Nikolaev, G.I., Bakhareva, V.E., Vlasov, V.A., Lobyntseva, I.V., Anisimov, A.V., Petrova, L.V., Zimina, V.N., Primenenie antifriktsionnykh ugleplastikov v podshipnikakh skolzheniya [The use of antifriction carbon fiber plastics in sliding bearings], *Voprosy Materialovedeniya*, 2006, No 2 (46), pp. 7–21.
4. Bakhareva, V.E., Nikolaev, G.I., Anisimov, A.V., Uluchshenie funktsionalnykh svoystv antifriktsionnykh polimernykh kompozitov dlya uzlov treniya skolzheniya [Improving the functional properties of antifriction polymer composites for sliding friction units], *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2009, V. 53, No 4, pp. 4–18.
5. Mustafa, L.M., Ismailov, M.B., Ermakhanova, A.M., Sanin, A.F., Issledovanie vliyaniya plastifikatorov i termoplastov na mekhanicheskie svoystva epoksidnoi smoly i ugleplastika [Investigation of the effect of plasticizers and thermoplastics on the mechanical properties of epoxy resin and carbon fiber]: review, *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syrya*, 2019, No 4 (311), pp. 48–56. URL: <https://doi.org/10.31643/2019/6445.37>.
6. Kuznetsov, A.V., Petrov, V.V., Metod khimicheskoi modifikatsii epoksidnykh kompozitsy [Method of chemical modification of epoxy compositions], *Inzhenerny vestnik Dona*, 2019, No 6, pp. 1–9.
7. Kuperman, A.M., Zelenskiy, E.S., Kerber, M.L., Stekloplastiki na osnove matrits, sovmeshchayushchikh termo- i reaktoplasty [Fiberglass based on matrices combining thermo- and reactoplastics], *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1996, V. 32, No 1, pp. 111–117.
8. Patent RF 2153107 C1: *Antifriktsionnaya kompozitsiya* [Antifriction composition]. Priority date 15.07.1999. Publ. 20.07.2000.
9. *Antifriktsionnye uglerodnye materialy* [Antifriction carbon materials], Kleimenov, S.M. (Ed.), Moscow, 1973.
10. Chursova, L.V., Panina, N.N., Grebeneva, T.A., Kutergina, I.Yu., *Epoksidnye smoly, otverditeli, modifikatory i svyazuyushchie na ikh osnove* [Epoxy resins, hardeners, modifiers and binders based on them], St Petersburg: Professiya, 2020.
11. Perepelkin, K.E., *Armiryushchie volokna i voloknistye polimernye kompozity* [Reinforcing fibers and fibrous polymer composites], St Petersburg: Nauchnye osnovy tekhnologii, 2009.
12. Ginzburg, B.M., Tochilnikov, D.G., Bakhareva, V.E., Anisimov, A.V., Kireenko, O.F., Polimernye materialy dlya podshipnikov skolzheniya, smazyvaemykh vodoi [Polymer materials for water lubricated plain bearings]: review, *Zhurnal prikladnoi khimii*, 2006, V. 79, No 5, pp. 705–716.
13. Tochilnikov, D.G., Ginzburg, B.M., Tekhnologiya tribotekhnicheskikh ekspress-ispytany antifriktsionnykh polimerov [Tribotechnical rapid testing technology for antifriction polymers], *Voprosy Materialovedeniya*, 2002, No 3 (31), pp. 39–48.
14. Plasticizers, *Khimicheskaya entsiklopediya*, URL: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3395.html> (reference date 25.08.2019).
15. Mostovoi, A.S., Retsepturnaya modifikatsiya epoksidnykh smol s primeneniem novykh vysokoeffektivnykh plastifikatorov [Prescription modification of epoxy resins using new highly effective plasticizers], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2015, No 7, pp. 66–70.
16. Marakhovskiy, K.M., Osipchik, V.S., Modifikatsiya epoksidnogo svyazuyushchego s povyshennymi kharakteristikami dlya polucheniya kompozitsionnykh materialov [Modification of an epoxy binder with

enhanced characteristics for the production of composite materials], *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2016, V. 30, No 10, pp. 56–58.

17. Zagora, A.G., Tkachuk, A.I., Terekhov, I.V., Mukhametov, R.R., Metody khimicheskoi modifikatsii epoksidnykh oligomerov [Methods of chemical modification of epoxy oligomers]: review, *Trudy VIAM*, 2021, No 7(101). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-73-85.

18. Bartenev, G.M., Lavrentiev, V.V., *Trenie i iznos polimerov* [Friction and wear of polymers], Leningrad: Khimiya, 1972.

UDC 621.791.048:669.15–194

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE WELDED JOINT DURING ARC WELDING OF LOW-CARBON STEEL UNDER A LAYER OF FLUX OBTAINED FROM METALLURGICAL SLAG OF ELECTRIC STEELMAKING

E.A. STARTSEV, V.V. GRIGORIEV, Cand Sc. (Eng), P.V. BAKHMATOV, Cand Sc. (Eng)

*Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Street, 681013.*

*E-mail: [egorstarts@inbox.ru](mailto:egorstarts@inbox.ru)*

Received December 27, 2023

Revised January 9, 2024

Accepted January 10, 2024

**Abstract**—The results of the study of the influence of the thermophysical properties of the welding flux obtained by processing man-made waste of electric steelmaking (metallurgical slag) on the structure and properties of welded butt joints of thin-sheet low-carbon steel, with automatic arc welding on ceramic linings, are presented. Welding modes have been established using the developed flux, contributing to the achievement of seam sizes according to GOST8713–79, C4 joints, compliance with the mechanical properties of joints close to the base metal and ensuring a minimum level of welding deformations and stresses.

*Keywords:* welding flux, structure and properties of welded joints, weld, welding modes, submerged welding, low-carbon steel, stress-strain state

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-104-121

## REFERENCES

1. Verhoturov, A.D., Babenko, E.G., Makienko, V.M., *Metodologiya sozdaniya svarochnykh materialov* [Methodology of welding materials creation], chl.-korr. RAN B. A. Voronov (Ed.), Habarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2009.

2. Sviridova, T.V., et al., Evaluation of the influence of slag heaps on the state of the urban residential area, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, V. 537, No 6. doi:10.1088/1757-899X/537/6/062009.

3. Hamatova, A.R., Hohryakov, O.V., Elektrostaleplavil'nyj shlak OAO «Izhstal'» dlya cementov nizkoj vodopotrebnosti i betonov na ih osnove [Izhstal electric steelmaking slag for cements of low water demand and concretes based on them], *Izv. Kazanskogo gos. arhitekturno-stroitel'nogo un-ta*, 2016, No 2, pp. 221–227.

4. Tsakiridis, P.E., Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S., Koroneos, C., Utilization of steel slag for Portlandcement clinker production, *Journal of Hazardous Materials*, 2008, V. 152, Is. 2, pp. 805–811. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>.

5. Baryshnikov, V.G., Gorelov, A.M., Papkov, G.I., *Vtorichnye material'nye resursy chernoj metallurgii. Spravochnik* [Secondary material resources of ferrous metallurgy. Directory], Moscow: Ekonomika, 1986, V. 2.

6. Garabrina, L.A., Kurgan, T.A., Ignat'eva, N.S., *Pererabotka staleplavil'nykh shlakov v OAO «MMK»* [Processing of steelmaking slags at MMK OJSC], Moscow: Metallurg, 2000.

7. Golov, S.V., Pererabotka i ispol'zovanie tekhnogennykh othodov v OAO «NTMK» [Processing and use of man-made waste in JSC NTMK], S. V. Golov, S. M. Sitnikov, E. G. Kalimulinov, *Stal'*, 2002, No 5.

8. Danilov, E.V., Sovremennaya tekhnologiya utilizatsii staleplavil'nyh shlakov [Modern technology for recycling steelmaking slags], *Metallurg*, 2003, No 6, pp. 38–39.
9. Flejshanderl, A., Pesl, Dzh., Soert, F. Obrashchenie othodov v pribyl' [Turning waste into profit], *Novosti chernoj metallurgii za rubezhom*, 2002, No 2, pp. 3–6.
10. Igoshev, M.V., Shakurov, E.I., *Pererabotka staleplavil'nyh shlakov na kombinata «Severstal'»* [Processing of steelmaking slags at the Severstal Plant], Moscow: Metallurg, 2003.
11. Song, Q., Shen, B., Zhou, Z., Effect of blast furnace slag and steel slag on cement strength, pore structure and autoclave expansion, *Advanced Materials Research*, 2011, V. 168–170, pp. 17–20. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.17>.
12. Skaf, M., Manso, M.J., Aragon, A., Fuente-Alonso, J.A., Ortega López, V., EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use, *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, V. 120, pp. 176–185. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>.
13. *Enciklopediya tekhnologij. Evolyuciya i sravnitel'nyj analiz resursnoj effektivnosti promyshlennyh tekhnologij. Ch. 3: Razvitie tekhnologij pererabotki vtorichnyh resursov* [Encyclopedia of technologies. Evolution and comparative analysis of the resource efficiency of industrial technologies. Part 3: Development of technologies for processing secondary resources], D. O. Skobelev (Ed.), Moscow – St Petersburg: «Renome», 2019, 824 p. ISBN 978-5-00125-250-4.
14. Filipp, Yu.A., Sovremennoe sostoyanie i razvitie ohrany okruzhayushchej sredy chernoj metallurgii [The current state and development of environmental protection of ferrous metallurgy], *Chernye metally*, 2000, No 4, pp. 26–35.
15. Shul'c, L.A., Energoekologicheskie problemy sovremennogo metallurgicheskogo kombinata [Energy-ecological problems of a modern metallurgical plant], *Izv. vuzov. Cher. Metallurgiya*, 2002, No 11, pp. 65–70.
16. Granovskaya, N.V., Nastavkin, A.V., Meshchaninov, F.V., *Tekhnogennyye mestorozhdeniya poleznyh iskopaemyh* [Man-made mineral deposits], Rostov-na-Donu: YuFU, 2013.
17. Patent RF № 2793303 C1: *Sposob izgotovleniya svarochnogo flyusa iz tekhnogennyh othodov staleplavil'nogo proizvodstva* [A method for manufacturing welding flux from man-made waste from steelmaking], Bahmatov, P.V., Starcev, E.A., Gladovskij, R.E., Sobolev, B.M., Zayavl. 07.11.2022, opubl. 31.03.2023.
18. Yusfin, Yu.S., Leont'ev, L.I., Chernousov, P.I., *Promyshlennost' i okruzhayushchaya sreda* [Industry and the environment], Moscow: IKC «Akademkniga», 2002.
19. Zajcev, A.K., Pohvisnev, Yu.V., Ekologiya i resursosberezhenie v chernoj metallurgii [Ecology and resource conservation in ferrous metallurgy], *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*, 2001, V. 7, No 3, pp. 52–58.
20. Potapov, N.N., Konishchev, B.P., Kurlanov S.A., et al., *Zashchitnye gazy i svarochnyye flyusy. Spravochnoe posobie* [Protective gases and welding fluxes: reference book], Potapova, N.N. (Ed.), Moscow: Mashinostroenie, 1989.
21. Classification and symbolization of bare steel wire electrodes and fluxes for submerged arc welding of structural steel, *Welding World*, 1978, No 3–4, pp. 70–71.
22. Bahmatov, P.V., Starcev, E.A., Vliyanie rezhimov dugovoj svarki pod sloem eksperimental'nogo flyusa na raspredelenie vnutrennih napryazhenij v svarnyh obrazcah, vyyavlennyh metodom magnitnoj pamyati metallov [The effect of arc welding modes under a layer of experimental flux on the distribution of internal stresses in welded samples revealed by the method of magnetic memory of metals], *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2023, No 5(69), pp. 83–96. DOI 10.17084/20764359-2023-69-83.
23. Vasyutinskij, N.A., *Metallurgicheskie shlaki* [Metallurgical slags], Kiev: Tekhnika, 1990.
24. Haunstetter, J., Krüger, M., Zunft, M., Experimental Studies on Thermal Performance and Thermo-Structural Stability of Steelmaking Slag as Inventory Material for Thermal Energy Storage. *Applied Sciences*, 2020, No 10, p. 931. DOI 10.931.10.3390/app10030931.

**METHOD FOR DETERMINING CRACK RESISTANCE OF STRUCTURAL MATERIALS  
AT QUASI-BRITTLE FRACTURE AFTER STABLE CRACK GROWTH**

V.I. SMIRNOV, Cand Sc. (Eng), A.I. MINKIN, B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng)

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,  
Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received September 28, 2023

Revised January 19, 2024

Accepted January 19, 2024

**Abstract**— The cases in laboratory practice of experimental investigations of fracture toughness are considered, when as a result of the tests the determination characteristics of fracture toughness ( $K_{JC}$ ,  $J_C$ ,  $J_R$ -curves,  $\delta_R$ -curves) cannot be performed correctly in accordance with the requirements of existing standards. A simplified technique for constructing  $J_R$ -curves has been developed, allowing in these cases to obtain the necessary characteristics of crack resistance ( $J_R$ -curves,  $J_{1C}$ ,  $J_C$ ,  $\delta_R$ -curves) and thereby significantly increase the information content of the tests carried out. Methodological recommendations on conducting tests and processing of their results are given. Approbation and verification of the proposed method have been carried out.

**Keywords:** crack resistance, *secant line method*, *elastic-plastic compliance*, plasticity zone, effective crack length,  $J_R$ -curve

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-122-143

**REFERENCES**

1. ASTM E1820–22: Standard test method for measurement of fracture toughness, *Annual book of ASTM standards*, V. 03.01, pp. 809–839.
2. ISO 12135:2016(E): *Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness*.
3. BS 7448-4:1997: *Fracture Mechanics Toughness Tests. Part 4. Method for determination of fracture resistance curves and initiation values for stable crack extension in metallic materials*, The British Standards Institution, London.
4. JSME S001: *Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness  $J_{IC}$* . (in Japanese).
5. GOST 25.506–85: *Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytany metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoikosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhenii* [Calculations and tests for strength. Methods of mechanical tests of metals. Determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading].
6. GOST R 59115.6–2021: *Obosnovanie prochnosti oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Metody opredeleniya kharakteristik treshchinostoikosti konstruktsionnykh materialov* [Justification of Strength of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants. Methods of Determination of Fracture Resistance Characteristics of Structural Materials].
7. STO-07516250-233-2012: *Opredelenie parametrov vyazkosti razrusheniya treschinostoikosti, pri staticheskom nagruzhenii stali i svarnykh soedinenii. Metodika ispytanii* [Determination of fracture toughness parameters (crack resistance) under static loading of steel and welded joints. Test methods], St Petersburg: FGUP TsNII KM Prometey, 2012.
8. ASTM E 1921–23: Standard test method for determination of reference temperature,  $T_0$ , for ferritic steels in the transition range, *Annual Book of ASTM Standards*, Section 3, V. 03.01, pp. 1068–1084.
9. Landes, J.D., Zhou, Z., Lee, K., Herrera, R., Normalization Method for Developing J-R Curves with the LMN Function, *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, V. 19, No 4, July 1991, pp. 305–311.
10. Rybakina, O.G., Strogonova, O.A., A Method of the JR-curve Determination Using Linear Normalization, *Advances in Solid and Fracture Mechanics. Advanced Structured Materials*, 2022, V. 180, pp. 211–220.
11. ASTM E561-22: *Standard Test Method for K-R Curve Determination*.

12. Irwin, G.R., Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate, *Journal of Applied Mechanics*, 1957, No 24, pp. 361–364.
13. Tarnowski, K.M., *Measuring Crack Initiation and Growth in the Presence of Large Strains using the Potential Drop Technique*: Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Mech. Eng. Imperial College, London, 2016.
14. Kumar, J., Mukhopadhyay, C., Kumar, V., Monitoring of Elastoplastic Fracture Behavior of HSLA Steel Using Acoustic Emission Testing, *Materials Evaluation*, 2021, V. 79 (4), p. 383–390.
15. Lee, J.-H., Applicability of Ultrasonic Technique for Evaluation of Elastic Plastic Fracture Toughness of High Manganese Steel at Low Temperatures, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 1995, V. 9, No 1, pp. 1–7.
16. Henschel, S., Krüger, L., Temperature dependent crack initiation of 42CrMo4 steel at high loading rates, *EPJ Web of Conferences*, 2018, V. 183, DYMAT.
17. Certificate of authorship 1359706, USSR: Sposob opredeleniya treshchinostoikosti materialov, V.V. Kalaida, V.N. Krasiko, A.V. Naumov [Method for determination of fracture resistance of materials], *Otkrytiya. Izobreteniya*, 1987, No 46.
18. Vasnin, A.N., Shcherbinin, I.N., Registratsiya nachala dvizheniya treshchiny pri ispytanii obraztsov na treshchinostoikost [Registration of crack initiation in crack resistance testing of specimens], *Zavodskaya laboratoriya*, 1990, No 4, pp. 54–57.
19. Vodopyanov, V.I., Metod eksperimentalnogo opredeleniya momenta starta treshchiny. [Experimental method for determining the crack initiation moment], *Zavodskaya laboratoriya*, 1996, No 8, pp. 44–46.
20. Smirnov, V.I., Ob opredelenii momenta stragivaniya treshchiny pri ispytaniyah na vyazkost razrusheniya konstruktsionnykh materialov [On Determination of the Crack initiation Moment in Fracture Toughness Tests of Structural Materials], *Zavodskaya laboratoriya*, 2004, No 9, pp. 42–47.
21. Landes, J.D., J Calculation from Front Face Displacement Measurements of a Compact Specimen, *International Journal of Fracture*, 1980, V. 16, pp. R183–86.
22. Veerman, C.C., Muller, T., The location of the apparent rotation axis in notched bend testing, *Engineering Fracture Mechanics*, 1972, V. 4, pp. 25–32.
23. Kalna, K., Utochnenny metod rascheta kriticheskogo raskrytiya treshchiny. [Improved method for calculating the critical crack opening], *Problemy prochnosti*, 1975, No 11, pp. 19–24.
24. Rybalov, Yu.P., Koshelev, P.F., Vasilchenko, G.S., Berezin, A.B., Merinov, G.N., Issledovanie so- protivleniya razrusheniyu nizkolegirovannoi stali pri razlichnykh vidakh nagruzheniya. [Study of fracture resistance of low-alloy steel under different types of loading], *Problemy prochnosti*, 1976, No 11, pp. 28–34.
25. Smirnov, V.I., Metodicheskie osobennosti opredeleniya kriticheskogo koeffitsienta intensivnosti napryazheny i kriticheskogo raskrytiya treshchiny pri ispytaniyakh na vyazkost razrusheniya [Methodical features of determining the critical stress intensity coefficient and critical crack opening in fracture toughness tests], *Voprosy sudostroeniya: Ser. Svarka*, 1977, Is. 24, pp. 18–25.
26. Kolednik, O., Plastic and overall rotational factors in bend and CT-specimens, *International Journal of Fracture*, 1989, V. 39, Is. 4, pp. 269–286.
27. Yongning, L., Crack opening and rotation factor, *International Journal of Fracture*, 1994, V. 66, pp. R39–R42.
28. Mills, W.J., Heat-to-Heat variations in the Fracture Toughness of Austenitic Stainless Steels, *Engineering Fracture Mechanics*, 1988, V. 30, pp. 469–492.
29. Volkov, G.S., Naumenko, V.P., K opredeleniyu treshchinostoikosti konstruktsionnykh materialov [To the determination of crack resistance of structural materials], *Problemy prochnosti*, 1979, No 8, pp. 64–67.
30. Hellman, K., *Vvedenie v mekhaniku razrusheniya* [Introduction to Fracture Mechanics], Moscow: Mir, 1988.
31. Saxena, A., Hudak, S.J. Jr., Review and extension of compliance information for common crack growth specimens, *International Journal of Fracture*, 1978, V. 14, pp. 455–468.
32. ASTM E3076–18: *Standard Practice for Determination of the Slope in the Linear Region of a Test Record*.

33. Weidner, T., Mottitschka, T., H. Biermann, S. Henkel, S., Determination of stretch zone width and height by powerful 3D SEM imaging technology, *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, V. 108, pp. 294–304.
34. Saxena, S., Ramakrishnan, N., Dutta, B.K., Determination of Stretch Zone Width Using FEM, *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, V. 76, pp. 911–920.
35. Roos, E., Otremba, F., Eisele, U., *Fracture Mechanics Material Characteristics for a simplified Safety Analysis*, Transactions SMiRT-16, Washington DC, August, 2001.
36. Ilyin, A.V., Leonov, V.P., Osobennosti ispolzovaniya parametra CTOD kak kharakteristiki perekhoda ot rezhima stabilnogo rosta treshchiny k nestabilnomu razrusheniyu v konstruksionnykh nizkolegirovannykh stalyakh [Peculiarities of using the CTOD parameter as a characteristic of transition from the mode of stable crack growth to unstable fracture in structural low-alloy steels], *Zavodskaya laboratoriya*, 2002, No 2, pp. 28–36.
37. Eisele, U., Schiedermaier, J., Application of ductile fracture assessment methods for the assessment of pressure vessels from high strength steels (HSS), *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, V. 81, pp. 879–887.
38. Green, G., Knott, J.F., On effects of thickness on ductile crack growth in mild steel, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1975, V.23, No 2, pp. 167–172.
39. Bansal, S., Nath, S.K., Ghosh, P.K., Ray, S., Stretched zone width and blunting line equation for determination of initiation fracture toughness in low carbon highly ductile steels, *International Journal of Fracture*, 2009, V. 159, pp. 43–50.
40. Taira, S., Tanaka, K., Thickness effect of notched metal sheets on deformation and fracture under tension, *Engineering Fracture Mechanics*, 1979, V. 11, No 2, pp. 231–249.
41. Kishkina, S.I., Starova, E.N., Yamilinec, V.F., Ostatochnaya prochnost i soprotivlenie stragivaniyu treshchiny alyuminievyykh splavov [Residual strength and crack initiation resistance of aluminum alloys], *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*, 1981, No 3, pp. 3–11.
42. Fadeev, Yu.I., Bartenev, O.A., Uproshchennyi sposob opredeleniya J-integrala s primeneniem akusticheskoi emissii [A simplified method for determining the J-integral using acoustic emission], *Zavodskaya laboratoriya*, 1989, No 5, pp. 54–57.
43. Otsuka, A., Miyata, T., Nishimura, S., Kashiwagi, Y., Crack initiation from a sharp notch and stretched zone, *Engineering Fracture Mechanics*, 1975, V.7, No 3, pp. 419–428.
44. Rozanov, M.P., Smirnov, V.I., Issledovanie vliyaniya razmerov obraztsov i temperatury ispytaniya na kharakteristiki vyazkosti razrusheniya konstruksionnykh staley [Study of the effect of specimen size and test temperature on the fracture toughness characteristics of structural steels], *Trudy Vsesoyuznogo Simpoziuma po mekhanike razrusheniya*, Kiev: Naukova Dumka, 1980, pp. 181–188.
45. Caislmayer, H.-Hr., *Statische prochnost i mekhanika razrusheniya staley* [Static strength and Fracture Mechanics of Steels], Moscow: Metallurgiya, 1986, pp. 332–342.
46. Karzov, G.P., Smirnov, V.I., Timofeev, B.T., Ob opredelenii kriticheskikh temperatur khрупkosti pri ispytaniyakh na vyazkost razrusheniya [On the determination of critical brittleness temperatures in fracture toughness tests], *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*, 1989, No 5, pp. 54–59.
47. Lucon, E., ASTM E08.07.09: Analytical Round-Robin on the Use of DC Electrical Potential Difference for the Measurement of Crack Size in Ductile Fracture Testing, *Materials Performance and Characterization*, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2018.
48. Landes, J.D., The blunting line in elastic-plastic fracture, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1995, V. 18, No 11, pp. 1289–1297.
49. Schwalbeb, K.-H., Hayes, B., Baustiana, K., Cornec, A., Gordon, R., Homayun, M., Voss, B., Validation of the fracture mechanics test method EGF P1-87D (ESIS P1-90, 1ESIS P1-92), *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1993, V. 16, No 11, pp. 1231–128.
50. Argon, A.S., Im, J., Safoglu, R., Cavity Formation from in Ductile Fracture inclusions in Ductile Fracture, *Metallurgical Transaction*, 1975, V. 6A, No 4, pp. 825–837.
51. Zheng, G.O., Radom, J.C., *The formation of voids in the ductile fracture of a low-alloy steel*, Proceeding ICF, International Symposium of Fracture Mechanics, Beijing, 22–25, Nov., 1983, Beijing, pp. 118–125.

52. ESIS P3-05D: *Draft Unified Procedure for Determining the Fracture Behavior of Materials*, ESIS European Structural Integrity Society, Torino, 2005.

53. Karzov, G.P., Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., *Fiziko-mekhanicheskoe modelirovanie protsessov razrusheniya* [Physical and mechanical modeling of fracture processes], St Peterburg: Politekhnik, 1993.

54. Spitzig, W.A., Correlations between fractographic features and plane-strain fracture toughness in an ultrahigh-strength steel, *Symp. on Electron Microfractography*, ASTM STP 453, 1969, pp. 98–110.

55. Krasowsky, J., Vainshtok, V.A., On a relationship between stretched zone parameters and fracture toughness of ductile structural steels, *International Journal of Fracture*, 1981, V. 17, No 4, pp. 579–592.

56. Kolednik, O., Stuwe, H.P., The stereophotogrammetric determination of the critical crack tip opening displacement, *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, V. 21, No. 1, pp. 145–155.

57. Baron, A.A., On a Relationship Between Fracture Toughness, Stretched Zone Width and Mechanical Properties in Tensile Test, *Engineering Fracture Mechanics*, 1994, V. 49, pp. 445–450.

58. Zhong-Xin, G., De-Ming, W., Nan-Sheng, Y., Deformation analysis of the local field in the vicinity of a stably growing crack-tip, *Engineering Fracture Mechanics*, 1988, V. 30, No 4, pp. 415–43.

UDC 539.421.5:620.178.2:669.15–194.2

## EXPERIMENTAL STUDIES AND CALCULATION OF CRACK PROPAGATION AT THE NIL DUCTILITY TEMPERATURE OF SHIPBUILDING STEEL

V.Yu. FILIN, Dr. Sc. (Eng), A.V. MIZETSKY, D.R. BARAKOV, M.M. PEGLIVANOVA

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received November 23, 2023

Revised February 29, 2024

Accepted March 4, 2024

**Abstract**—Resistance to crack propagation in low-alloyed steels is verified by the experimental evaluation of ductile-to-brittle transition temperatures. Though, correlations of test results obtained according to used methods with the minimum design temperature of marine structures should be substantiated. The paper suggests a fracture mechanics based formula for the required nil ductility temperature (NDT). An original FEM simulation method with uniform mesh size is applied.

**Keywords:** marine structures, requirements for materials, nil ductility temperature (NDT), brittle crack arrest

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-144-153

## REFERENCES

1. *Crack arrest methodology and application: ASTM STP 711*, Hahn, G.T., Kanninen, M.F. (Eds.), Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 1980.

2. Tagawa, T., Handa, T., Tajika, H., Nanno, S., Matsumoto, K., Kawabata, T., Brittle crack arrest behavior and its interpretation in an isothermal crack arrest test, *Engineering Fracture Mechanics* 2020, No 235, p. 107130.

3. Filin, V.Yu., Ilyin, A.V., Mizetsky, A.V., Crack arrest simulation in steel in account of competing ductile and cleavage fracture, *Procedia Structural Integrity*, 2020, No 28, pp. 3–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.002>.

4. Filin, V.Yu., Mizetsky, A.V., Nazarova, E.D., Opredelenie kriticheskikh temperatur khрупkosti stali na baze chislennogo modelirovaniya ispytany obraztsov Charpy [Evaluation of the critical temperatures of brittleness for steel based on numerical simulation of the test with Charpy specimens], *Physical-mechanical tests, strength, reliability of modern structural and functional materials: Proceedings of 14th All-Russian conference on testing and investigation of material properties*, Moscow, 25 march 2022, NRC Kurchatov institute – VIAM, 2022, pp. 320–332.

5. ND No 2-020101-174-E: *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Ch. 13: Materialy* [Rules for the classification and construction of sea-going ships. Part 13: "Materials"], Russian Maritime Register of Shipping, St Petersburg, 2023.

6. Filin, V.Yu., Ilyin, A.V., Larionov, A.V., Mizetsky, A.V., Nazarova, E.D., Peglivanova, M.M., Kolichestvennye otsenki soprotivleniya rasprostraneniya razruscheniya sudostroitelnykh i trubnykh staley [Quantitative estimates of fracture propagation resistance of hull and pipe steels], *Safety and monitoring of natural and man-made systems: materials and reports: 8th All-Russian conference*, Krasnoyarsk, 16–20 September 2023, Moskvichev, V.V. (Ed.), Novosibirsk: FIC IVT, 2023, pp. 83–88.

7. Pellini, W.S., Puzak, P.P., *Fracture Analysis Diagram Procedures for the Fracture-Safe Engineering Design of Steels Structures*, 1963, No 15.

8. Ilyin, A.V., Artemiev, D.M., Filin, V.Yu., Modelirovanie MKE rasprostraneniya i tormozheniya khрупkogo razrusheniya v plastinakh s ishkodnoy treschinoy [Simulation of the propagation and arrest of the brittle fracture in steel plates with initial crack using finite element method], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2018, V. 84, No 1 (I), pp. 56–65.

9. Larionov, A.V., Filin, V.Yu., Ilyin, A.V., Otsenka svyazi soprotivleniya materiala vjazkomu razrusheniju s pogloschennoj energiej pri ispytaniyakh padayuschim gruzom [On the correlation of shear fracture resistance of metal with the absorbed energy at drop weight tear test], *Physical-mechanical tests, strength, reliability of modern structural and functional materials: Proceedings of 14th All-Russian conference on testing and investigation of material properties*, Moscow, 25 March 2022, Kurchatov institute – VIAM Publ. 2022, pp. 506–520.

10. Peglivanova, M.M., Nazarova, E.D., Filin, V.Yu., Sravnenie otsenok udlineniya obrastsov na rastiashenie raznoi kratnosti [Comparison of elongation estimates with tensile specimens of different length to test section ratios], *Reports thesis of the 22nd Winter School on the mechanics of solids*, Perm, 13–17 Feb. 2023, URO RAN, 2023.

11. Shibamura, K., Yanagimoto, F., Namegawa, T., Suzuki, K., Aihara, S., Brittle crack propagation / arrest behavior in steel plate, Part 1: Model formulation, *Engineering Fracture Mechanics* 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.02.054>.

UDC 620.17.08

## DEVELOPMENT OF CALCULATION METHODS FOR THE UNCERTAINTY OF SPECIAL MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL STEEL

M.M. PEGLIVANOVA, V.D. YUNEV, V.Yu. FILIN, Dr Sc. (Eng)

*NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received December 11, 2023

Revised March 29, 2024

Accepted April 2, 2024

**Abstract**—Understanding of an accuracy related to the evaluation of special mechanical performances of materials is an essential part of the quality control system providing for safe operation of modern structures in severe climatic conditions in far locations where any emergency and repair activities are hindered. In absence of a priori known values of such performances the methodic basis of uncertainty calculation procedures should be developed. Relevance of the problem is supported by the requirement of Russian Accreditation Agency regarding the availability and due application of the corresponding methods in test laboratories as for directly measured parameters as for ones calculated from the test results. Uncertainty calculation procedures are suggested as a background for the developed specialized software.

**Keywords:** structural steel, mechanical tests, uncertainty, measuring appliances

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-154-165

## REFERENCES

1. Heisenberg, W., Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, *Zeitschrift für Physik*, 1927, V. 43, pp. 172–198 (English translation in the book: Wheeler, J.A., Zurek, H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton Univ. Press., 1983, pp. 62–84).

2. RMG 29–2013: *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya* [State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions], Moscow: Standardinform, 2014.
3. GOST 34100.1–2017: *Neopredelennost' izmereniya. Ch. 1: Vvedenie v rukovodstva po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya* [Uncertainty of measurement. Part 1. Introduction to guides on the expression of uncertainty in measurement], Moscow: Standardinform, 2018.
4. GOST 34100.3.1–2017: *Neopredelennost' izmereniya. Ch. 3: Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya. Dopolnenie 1. Transformirovanie raspredelenij s ispol'zovaniem metoda Monte-Karlo* [Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Supplement 1. Propagation of distributions using a Monte-Carlo method], Moscow: Standardinform, 2018.
5. ND No 2-020101-174-E: *Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Ch. XIII: Materialy* [Rules for the classification and construction of sea-going ships. P. XIII: Materials], Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2023.
6. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2024610366 ot 10 yanvarya 2024 g. Promtest uncertainty – raschet neopredelennosti izmerenij znachenij harakteristik mekhanicheskikh svoystv konstrukcionnykh stalej* [«Promtest uncertainty» – Uncertainty calculation of the measured values of structural steel mechanical performances. Certificate of software state registration No 2024610366 dated January 10, 2024].
7. Pokhodun, A.I., *Eksperimentalnye metody issledovanij. Pogreshnosti i neopredelennosti izmerenij* [Experimental research methods. Errors and uncertainties of measurements]: study guide, St Petersburg, ITMO University, 2006.
8. *Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya* [Guide to express the uncertainty of measurements], St Petersburg: VNIIM by D. I. Mendeleev, 1999.
9. Gilat, A., *MATLAB: Teoriya i praktika* [MATLAB An introduction with Applications], 5th Edition. Moscow: DMK Press, 2016.
10. Bell, S., *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*, Crown Copyright, 1999.
11. Ilyin A.V., Filin V.Yu., Gusev M.A., Markadeeva A.Yu, Yurkov M.E. *Praktika attestacionnykh ispytanij vysokoprochnnykh stalej dlja poluchenija svidetel'stva Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* [Practice of certification tests of high-strength steel to get a Recognition certificate of the Russian Maritime Register of Shipping], Proceedings of the 6th International Scientific-Technical Conference “Sudometrika-2016”, pp. 111–118.

UDC 621.039.531:539.422.22

**RADIATION AND THERMAL EMBRITTLEMENT OF RPV STEELS: THE LINKS OF EMBRITTLEMENT MECHANISMS, FRACTURE MODES AND MICROCRACK NUCLEATION AND PROPAGATION PROPERTIES. PART 3: Brittle fracture modelling and analysis of the link of microcrack nucleation and propagation properties and embrittlement mechanisms**

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), V.N. FOMENKO, Cand Sc. (Eng),  
V.A. SHVETSOVA, Cand Sc. (Phys-Math), E.V. YURCHENKO, Cand Sc. (Eng)

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received September 28, 2023

Revised January 19, 2024

Accepted January 19, 2024

**Abstract**—Radiation and thermal embrittlement of RPV steels are studied from viewpoint of links of brittle fracture properties on micro- and macroscales. Brittle fracture properties on macroscale (such as fracture toughness and fracture stress) and the critical parameters controlling nucleation and propagation of microcracks are determined on the basis of the probabilistic brittle fracture model Prometey. The experimental and numerical investigations are performed for 2Cr-Ni-Mo-V steel and A533 steel used for RPVs of WWER and PWR types. RPV steels are studied in the following states: (1) the initial (as-produced) state; (2) the thermally-embrittled state modelling hardening mechanism of embrittlement; (3) the thermally-embrittled state modelling non-hardening mechanism of embrittlement; (4) the irradiated state. The test results of

various specimens (smooth and notched round bars and cracked compact tension specimens) from the investigated steels in various states are represented over brittle fracture temperature range. Brittle fracture modelling is performed with the Prometey model for all the above specimens, and the experimental and numerical results are compared. On the basis of the obtained results the links between embrittlement mechanisms, fracture modes and microcrack nucleation and propagation properties are found.

**Keywords:** brittle fracture, local approach, probabilistic model, radiation embrittlement, RPV steels

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-166-186

## REFERENCES

1. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Shvetsova, V.A., Dalneishee razvitie modeli Prometey i metoda Unified Curve. Ch. 1. Razvitie modeli Prometey [Further development of the Prometey model and the Unified Curve method. Part 1: Development of the Prometey model], *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, No 4 (88), pp. 120–150.
2. Rybin, V.V., *Bolshie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov* [Large plastic deformations and destruction of metals], Moscow: Metallurgiya, 1986.
3. Mudry, F., A local approach to cleavage fracture, *Nuclear Engineering and Design*, 1987, No 105, pp. 65–76.
4. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Local criterion for cleavage fracture: structural and mechanical approach, *J. Phys. IV*, 1996, No 6, C6-225–234.
5. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels, *Fatigue & Frac. of Engng. Mater. & Struc.*, 2006, No 29 (9), pp. 697–713.
6. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Nikolaev, V.A., Ryadkov, L.N., Novy inzhenernyy metod dlya prognozirovaniya temperaturnoi zavisimosti treshchinostoikosti stalei dlya sudov davleniya [A new engineering method for predicting the temperature dependence of the crack resistance of steels for pressure vessels], *Problemy prochnosti*, 2003, No 5, pp. 12–35.
7. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Dalneishee razvitie modeli Prometey i metoda Unified Curve. Ch. 2. Razvitie metoda Unified Curve [Further development of the Prometey model and the Unified Curve method. Part 2. Development of the Unified Curve method], *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, No 4 (88), pp. 151–178.
8. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Shvetsova, V.A., On issue of comparison of the Unified Curve and Master Curve methods and application for RPV structural integrity assessment, *Strength of Materials*, 2016, No 48 (2), pp. 227–250.
9. Margolin, B.Z., Yurchenko, E.V., Morozov, A.M., Pirogova, N.E., Brumovsky, M., Analysis of a link of embrittlement mechanisms and neutron flux effect as applied to reactor pressure vessel materials of WWER, *J. Nucl. Mater.*, 2013, No 434, pp. 347–356.
10. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Radiation embrittlement modelling in multi-scale approach to brittle fracture of RPV steels, *Int. J. Fract.*, 2013, No 179, pp. 87–108.
11. Kandidis, E., Marini, B., Allais, L., Pineau, A., Validation of a statistical criterion for intergranular brittle fracture of a low alloy steel through uniaxial and biaxial (tension-torsion) tests, *Int. J. of Fracture*, 1994, No 66, pp. 273–294.
12. Yahya, O.M.L., Borit, F.B., Piques, R., Pineau, A., Statistical modelling of intergranular brittle fracture in low alloy steel, *Fat. & Fract. of Eng. Mater. & Struct.*, 1998, V. 21, Is. 12, pp. 1485–1502. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.1998.00126.x>.
13. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Prometey local approach to brittle fracture: development and application, *Eng. Fract. Mech.*, 2008, V. 75, pp. 3483–3498.
14. Gurovich, B.A., Kuleshova, E.A., Shtrombakh, Y.I., et al., Intergranular and intragranular phosphorus segregation in Russian pressure vessel steels due to neutron irradiation, *J. Nucl. Mater.*, 2000, No 279, pp. 259–272.
15. Houtorn, Dzh.R., Radiatsionnoe okhrupchivanie [Radiation embrittlement], *Okhrupchivanie konstruktsionnykh stalei i splavov*, Braient, K.L., Benerdzhii, S. K. (Eds.), Moscow: Metallurgiya, 1988.

**SIMULATION OF STAINLESS FERRITIC-MARTENSITIC AND AUSTENITIC STEEL HARDENING AFTER IRRADIATION IN ION ACCELERATOR. Part 1. Development of a methodology for determining the ion mode irradiation of ferritic-martensitic steels**

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), A.A. SOROKIN, Cand Sc. (Eng), L.A. BELYAEVA, Cand Sc. (Eng)

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)*

Received October 2, 2023

Revised December 19, 2023

Accepted December 22, 2023

**Abstract**—A methodology for determining the irradiation mode for ferritic-martensitic steels at ion accelerator has been developed and experimentally substantiated, providing radiation hardening of these steels, identical to that realized under neutron irradiation. The change in Vickers microhardness is used as a measure of radiation hardening. A study was carried out of radiation-induced changes in the microhardness of ferritic-martensitic steels 07Kh12NMFB and EP-823 after neutron and ion irradiation to damaging doses of 10–30 dpa in the temperature range 350–600°C. These materials were irradiated with neutrons in the reactors BOR-60, BN-600 and in the ion accelerator of the State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky (IPPE) with Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>4+</sup> ions and He<sup>+</sup> ions to concentrations of 0.2 and 4 appm/dpa. A transition function has been established that connects the irradiation temperatures for neutron and ion irradiation at a given damaging dose, ensuring the same radiation hardening.

**Keywords:** ferritic-martensitic steels, neutron and ion irradiation, Vickers microhardness, instrumental indentation, radiation-induced hardening

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-187-211

#### ACKNOWLEDGMENTS

*The work was carried out within the framework of the implementation of the state contract IGK 17706413348220001050.*

#### REFERENCES

1. Zelensky, V.F., Neklyudov, I.M., Chernyaeva, T.P., *Radiatsionnye defekty i raspukhanie metallov* [Radiation defects and swelling of metals], Kiev: Naukova dumka, 1988.
2. Was, G.S., *Fundamentals of Radiation Materials Science*, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
3. Accelerator simulation and theoretical modelling of radiation effects in structural materials, *IAEA Nuclear Energy Series*, 2018, No NF-T-2.2, Vienna: IAEA.
4. Was, G.S., et al., High Fidelity Ion Beam Simulation of High Dose Neutron Irradiation, *Simulation of Neutron Damage for High Dose Exposure of Advanced Reactor Materials: Program IRP-RC*. URL: <https://neup.inl.gov/SiteAssets/FY%202013%20Abstracts/IRP/IRP-University%20of%20Michigan.pdf>
5. Was, G.S., Jiao, Z., Getto, E., Sun, K., Monterrosa, A.M., Maloy, S.A., Anderoglu, O., Sencer, B.H., Hackett, M., Emulation of reactor irradiation damage using ion beams, *Scr. Mater.*, 2014, V. 88, pp. 33–36.
6. Zinkle, S.J., Snead, L.L., Opportunities and limitations for ion beams in radiation effects studies: Bridging critical gaps between charged particle and neutron irradiations, *Scr. Mater.*, 2018, V. 143, pp. 154–160.
7. Taller, S., Coevering, G.V., Wirth, B.D., Was, G.S., Predicting structural material degradation in advanced nuclear reactors with ion irradiation, *Scientific Reports*, 2021, No 11.
8. Rogozhkin, S.V., Nikitin, A.A., Khomich, A.A., et al., Imitatsionnye eksperimenty na puchkakh tyazhelykh ionov dlya modelirovaniya radiatsionnykh povrezhdeniy konstruktsionnykh materialov aktivnoi zony yadernykh i termoyadernykh energeticheskikh ustanovok [Simulation experiments on heavy ion beams to simulate radiation damage to structural materials of the core of nuclear and thermonuclear power plants], *Yadernaya fizika i inzhiniring*, 2018, V. 9, No 3, pp. 245–258.

9. Grudzevich, O.T., Pechenkin, V.A., Kobets, U.A., et al., Issledovaniya radiatsionnoi stoikosti konstruktsionnykh materialov na uskoritelyakh ionov [Studies of radiation resistance of structural materials on ion accelerators], *VANT, Ser.: Yaderno-reaktornye konstanty*, 2022, Is. 3, pp. 127–145.
10. ASTM E521-96: *Standard Practice for Neutron Radiation Damage Simulation by Charged-Particle Irradiation*, 2017.
11. Taller, S., Jiao, Z., Field, K., Was, G.S., Emulation of Fast Reactor Irradiated T91 Using Duallon Beam Irradiation, *J. Nucl. Mater.*, 2019, V. 527, No 151831, pp. 1–14.
12. Phythian, W.J., English, C.A., Microstructural evolution in reactor pressure vessel steels, *J. Nucl. Mater.*, 1993, No 205, pp. 162–177.
13. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Prometey local approach to brittle fracture: development and application, *Eng. Fracture Mech.*, 2008, V. 75, pp. 3483–3498.
14. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Radiation embrittlement modeling in multiscale approach to brittle fracture of RPV steel, *Int. J. of Fracture*, 2013, V. 179, Is. 1–2, pp. 87–108.
15. Margolin, B.Z., Yurchenko, E.V., Morozov, A.M., Pirogova, N.E., Analiz efekta flaksa neitronov primenitelno k radiatsionnomu okhrupchivaniyu materialov korpusov reaktorov VVER [Analysis of the neutron flux effect in relation to radiation embrittlement of VVER reactor vessel materials], *Voprosy Materialovedeniya*, 2012, No 2 (70), pp. 177–196.
16. Amaev, A.D., Gorynin, I.V., Nikolaev, V.A., *Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels* (Russian Materials Monograph Series, 2), Am. Nucl. Soc., 1997.
17. Margolin, B., Fomenko, V., Shvetsova, V., Yurchenko, E., On the link of the embrittlement mechanisms and microcrack nucleation and propagation properties for RPV steels. Part 2: Fracture properties and modelling, *Eng. Fracture Mech.*, 2022, V. 270.
18. Lidbury, D., Bugat, S., Diard, O., et al., PERFECT (prediction of irradiation damage effects on reactor components): progress with multiscale modelling in RPV mechanics subproject, *Local approach to fracture*, Besson, J., Moineau, D., Steglich, D. (Eds.), Paris: Ecole des Mines de Paris; 2006, pp. 459–464.
19. Eason, E.D., Odette, G.R., Nanstad, R.K., Yamamoto, T., *A Physically Based Correlation of Irradiation-Induced Transition Temperature Shifts for RPV Steels*, ORNL/TM-2006/530, November, 2007.
20. Kirk, M., Assessment of flux effect exhibited by IVAR database, *Proc. of the IAEA Technical Meeting on Radiation embrittlement and Life Management of Reactor Pressure Vessels*, Znojmo, Czech Republic, 18–22 October, 2010.
21. Amaev, A.D., Kryukov, A.M., Neklyudov, I.M., et al., *Radiatsionnaya povrezhdaemost i rabotosposobnost konstruktsionnykh materialov* [Radiation damage and operability of structural materials], Parshina, A., Platonova, P. (Eds.), St Petersburg: Politekhnik, 1997.
22. Margolin, B.Z., Yurchenko, E.V., Morozov, A.M., Varovin, A.Ya., Rogozhkin, S.V., Nikitin, A.A., Issledovanie vliyaniya postradiatsionnogo otzhiga na vosstanovlenie svoystv materialov opornykh konstruktsii korpusov reaktorov VVER-440. Ch. 2: Analiz osobennostei vliyaniya otzhiga materiala posle nizkotemperaturnogo oblucheniya [Investigation of the effect of radiation annealing on the restoration of the properties of the materials of the supporting structures of the VVER-440 reactor housings. Part 2: Analysis of the peculiarities of the effect of annealing of the material after low-temperature irradiation], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, No 1 (109), pp. 184–198.
23. GOST R 70431–2022: *Natsionalny standart Rossiiskoi Federatsii. Materialy oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Metody opredeleniya udarnoi vyazkosti i kriticheskoi temperatury khrupkosti po rezultatam ispytany na udarny izgib* [The national standard of the Russian Federation. Materials of equipment and pipelines of nuclear power plants. Methods for determining the impact strength and critical temperature of brittleness based on the results of impact bending tests].
24. ASTM E 1921-22a: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T<sub>0</sub>, for Ferritic Steels in the Transition Range, *Annual Book of ASTM Standards*, 2022, V. 03.01.
25. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Nikolaev, V.A., Ryadkov, L.N., A new engineering method for prediction of the fracture toughness temperature dependence for RPV steels, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, 2003, No 80, pp. 17–829.

26. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Fomenko, V.N., Kostylev, V.I., Further Improvement of the Prometey Model and Unified Curve Method. Part 2: Improvement of the Unified Curve Method, *Eng. Fract. Mech.*, 2018, V. 191, pp. 383–402.
27. Margolin, B.Z., Yurchenko, E.V., Morozov, A.M., Porogovye i predelnye znacheniya kontsentratsii primesnykh elementov v materiale korpusov reaktorov tipa VVER [Threshold and limit values of concentrations of impurity elements in the material of VVER reactor housings], *Voprosy Materialovedeniya*, 2013, No 2 (86), pp. 152–163.
28. Busby, J.T., Hash, M.C., Was, G.S., The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels, *Journ. Nucl. Materials*, 2005, No 336, pp. 267–278.
29. Gorynin, I.V., Nesterova, E.V., Nikolaev, V.A., Rybin, V.V. Microstructure and Mechanical Properties of WWER-440 Reactor Vessel Metal After Service Life Expiration and Recovery Anneal, 17th International Symposium “Effects of Radiation on Materials”, ASTM STR 1270, American Society for Testing and Materials, 1996, pp. 248–259.
30. Lucas, G.E., Odette, G.R., Maiti, R., Sheckherd, J.W., Tensile Properties of Irradiated Pressure Vessel Steels, *Influence of Radiation on Material Properties: 13th International Symposium (Part 2)*, ASTM STP 956, 1987, pp. 379–394.
31. Higgy, H.R., Hammad, F.H., Effect of fast neutron irradiation on mechanical properties of stainless steels: AISI types 304, 316 and 347, *J. Nucl. Mater.*, 1975, V. 55, Issue 2, pp. 177–186.
32. Hawthorne, J.R., Radiation embrittlement, *Embrittlement of Engineering Alloys*, Briant, C., Banerji, S., (Eds.), New York, 1983.
33. Jones, R., Williams, T., *The Dependence of Radiation Hardening and Embrittlement on Irradiation Temperature*, ASTM STP1270-EB, Paper ID: STP16495S.
34. Margolin, B.Z., Yurchenko, E.V., Dozovye zavisimosti dlya materialov korpusov reaktorov VVER i ikh opornykh konstruktsiy [Dose dependences for materials of VVER reactor housings and their supporting structures], *Voprosy Materialovedeniya*, 2023, No 2 (114), pp. 166–194.
35. Gaganidze, E., Petersen, C., Aktaa, J., Study of helium embrittlement in boron doped EUROFER97 steels, *J. Nucl. Mater.*, 2009, V. 386–388, pp. 349–352.
36. Lysova, G.V., Birzhevoy, G.A., Kinetics of the radiation-induced hardening of EP-823 steel after Ni<sup>2+</sup> ion irradiation, annealing and re-irradiation, *Journal of surface investigation, X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 2012, V. 6, No 2, pp. 326–329.
37. Maloy, S.A., Henry, J., Irradiation-resistant ferritic and martensitic steels as core materials for Generation IV nuclear reactors. Ch. 9, *Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors*, 2017, pp. 329–355.
38. Ivanov, A.A., Shulepin, S.V., Dvoryashin, A.M., Konobeev, Yu.V., Ivanov, S.N., Alekseev, Yu.V., Porollo, S.I., Struktura i mekhanicheskie svoystva stali EP-823, 20Kh12MN i opytnykh variantov 12%-nykh khromistykh staley posle neitronnogo oblucheniya v reaktore BN-350 [Structure and mechanical properties of EP-823, 20Kh12MN steel and experimental versions of 12% chromium steels after neutron irradiation in the BN-350 reactor], *Sb. dokl. IX Rossiiskoi konferentsii po reaktornomu materialovedeniyu*, Dimitrovgrad, 2009, pp. 560–573.
39. Grigorovich, V.K., *Tverdost i mikrotverdost metallov* [Hardness and microhardness of metals], Moscow: Nauka, 1976.
40. Golovin, Yu.I., *Nanoindentirovanie i ego vozmozhnosti* [Nanoindentation and its possibilities], Moscow: Mashinostroenie, 2009.
41. Dolph, C.K., et al., Plastic zone size for nanoindentation of irradiated Fe-9%Cr ODS, *J. Nucl. Mater.*, 2016, V. 481, pp. 33–45.
42. Xiao, X., Long, Yu., Nano-indentation of ion-irradiated nuclear structural materials: A review, *Nucl. Mater. Energy. Elsevier*, 2020, V. 22, Art. 100721.
43. ISO 14577-4: *Metallic Materials – Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters, Part 4: Test Method for Metallic and Nonmetallic Coatings*, 2016.
44. Wilkinson, A.J., Britton, B.T., Strains, planes, and EBSD in materials science, *Materials today*, 2012, V. 15, Is. 9, pp. 366–376.

45. Gusev, M.N., De Bellefon, G.M., Rosseel, T.M., *Analysis of Localized Deformation Processes in Highly Irradiated Austenitic Stainless Steel through In Situ Techniques: Report of Oak Ridge National Laboratory*, Oak Ridge, TN (United States), 2019, ORNL/TM-2019/1274.

46. Kryukov, A.M., Debarberis, L., Hähner, P., et al., Thermal annealing as a method to predict results of high temperature irradiation embrittlement, *J. Nucl. Mater.*, 2013, V. 432, pp. 501–504.

47. GOST R 8.748-2011: *Metally i splavy. Izmerenie tverdosti i drugikh kharakteristik materialov pri instrumentalnom indentirovanii* [Metals and alloys. Measurement of hardness and other characteristics of materials during instrumental indentation], 2013.

UDC 621.039.531:669.15–194.5

## **SIMULATION OF STAINLESS FERRITIC-MARTENSITIC AND AUSTENITIC STEEL HARDENING AFTER IRRADIATION IN ION ACCELERATOR. Part 2: Development of a methodology for determining the ion mode irradiation of austenitic steels**

B. Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), A. A. SOROKIN, Cand Sc. (Eng), L. A. BELYAEVA, Cand Sc. (Eng)

Received December 5, 2023

Revised December 8, 2023

Accepted December 22, 2023

**Abstract**—A methodology for determining the irradiation mode for ferritic-martensitic steels at ion accelerator has been developed and experimentally substantiated, providing radiation hardening of these steels, identical to that realized under neutron irradiation. The change in Vickers microhardness is used as a measure of radiation hardening. The paper presents the results of a study of radiation-induced changes in the microhardness of austenitic steels 08Kh18H10T and 08Kh16H20M2T irradiated in reactors SM-3, VVER-440, BOR-60, SM-3+BOR-60 to damaging doses of 10.2÷33.7 dpa in the interval of temperatures 60–500°C. A study of radiation-induced changes in microhardness in a wider range of irradiation temperatures, post-irradiation annealing of irradiated steels was carried out in the range from 400 to 600°C, simulating irradiation at temperatures equal to annealing temperatures. Data are presented on radiation-induced changes in microhardness after irradiation in the ion accelerator of the State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky (IPPE) with Ni<sup>4+</sup> ions and He<sup>+</sup> ions up to concentrations of 0–7 appm/dpa at damaging doses of 13÷30 dpa and temperatures of 300÷650°. A transition function has been established that connects the irradiation of temperatures during neutron and ion irradiation at a given damaging dose, ensuring the same radiation hardening of austenitic steels.

**Keywords:** austenitic steels, neutron and ion irradiation, Vickers microhardness, instrumental indentation, radiation-induced hardening

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2024-118-2-212-232

### ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out within the framework of the implementation of the state contract IGK 17706413348220001050.

### REFERENCES

1. *Fizicheskoe materialovedenie. Fizicheskie osnovy prochnosti. Radiatsionnaya fizika tverdogo tela. Kompyuternoe modelirovanie* [Physical materials science. Physical foundations of strength. Radiation physics of a solid body. Computer simulation]: study guide for universities, Kalina, B.A. (Ed.), Moscow: MIFI, 2008, V. 4.

2. Garner, F.A., Radiation Damage in Austenitic Steels, *Comprehensive Nuclear Materials*, Amsterdam: Elsevier, 2012, V. 4, pp. 33–95.

3. Vas Gary, S., *Osnovy radiatsionnogo materialovedeniya. Metally i splavy* [Fundamentals of radiation materials science. Metals and alloys], Moscow: Tekhnosfera, 2014.

4. Fukuya, K., Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2013, No 50 (3), pp. 213–254.

5. Kursevich, I.P., Margolin, B.Z., Prokoshev, O.Yu., Kokhonov, V.I., Mekhanicheskie svoystva austenitnykh staley pri neitronnom obluchenii: vliyaniye razlichnykh faktorov [Mechanical properties of austenitic steels under neutron irradiation: the influence of various factors], *Voprosy Materialovedeniya*, 2006, No 4 (48), pp. 55–68.
6. Sorokin, A.A., Margolin, B.Z., Kursevich, I.P., Minkin, A.I., Neustroev V.S., Belozarov, S.V., Vliyaniye neitronnogo oblucheniya na mekhanicheskie svoystva materialov vnutrikorpusnykh ustroystv reaktorov tipa VVER [The effect of neutron irradiation on the mechanical properties of materials of in-body devices of VVER type reactors], *Voprosy Materialovedeniya*, 2011, No 2 (66), pp. 131–152.
7. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Prognozirovaniye vliyaniya neitronnogo oblucheniya na kharakteristiki vyazkogo razrusheniya austenitnykh staley [Prediction of the effect of neutron irradiation on the characteristics of viscous fracture of austenitic steels], *Voprosy Materialovedeniya*, 2012, No 1 (69), pp. 126–147.
8. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Shvetsova, V.A., et al., Vliyaniye radiatsionnogo raspukhaniya i osobennosti deformirovaniya na protsessy razrusheniya obluchennykh austenitnykh staley pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhении. Ch. 1: Plastichnost i treshchinostoikost [The effect of radiation swelling and deformation features on the destruction processes of irradiated austenitic steels under static and cyclic loading. Part 1: Plasticity and crack resistance], *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, No 3 (87), pp. 159–191.
9. Margolin, B.Z., Kursevich, I.P., Sorokin, A.A., et al., K voprosu o radiatsionnom raspukhanii i radiatsionnom okhrupchivaniiy austenitnykh staley. Ch. 2: Fizicheskie i mekhanicheskie zakonomernosti okhrupchivaniya [On the issue of radiation swelling and radiation embrittlement of austenitic steels. Part 2: Physical and mechanical laws of embrittlement], *Voprosy Materialovedeniya*, 2009, No 2 (58), pp. 99–111.
10. Margolin, B.Z., Pirogova, N.E., Sorokin, A.A., Kokhonov, V.I., Issledovaniye mekhanizmov korroziionnogo rastreskivaniya pod napryazheniem obluchennykh austenitnykh khromonikelevykh staley, ispolzuemykh dlya vnutrikorpusnykh ustroystv reaktorov tipa VVER i PWR [Investigation of stress corrosion cracking mechanisms of irradiated austenitic chromium-nickel steels used for internal devices of VVER and PWR type reactors], *Voprosy Materialovedeniya*, 2020, No 2 (102), pp. 174–199.
11. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Pirogova, N.E., et al., Model korroziionnogo rastreskivaniya obluchennykh austenitnykh staley Ch. 1: Analiz mekhanizmov povrezhdeniya i formulirovka opredelyayushchikh uravnenii [Model of corrosion cracking of irradiated austenitic steels. Part 1: Analysis of damage mechanisms and formulation of defining equations], *Voprosy Materialovedeniya*, 2019, No 2 (98), pp. 154–177.
12. Logan, H.L., *Stress Corrosion of Metals*, John Wiley & Sons Inc., 1967.
13. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Buchatsky, A.A., et al., Kharakteristiki i mekhanizmy razrusheniya obluchennykh austenitnykh staley v oblasti povyshennykh temperatur i formulirovka kriteriya razrusheniya. Ch. 1: Eksperimentalnye issledovaniya [Characteristics and mechanisms of destruction of irradiated austenitic steels in the field of elevated temperatures and formulation of the fracture criterion. Part 1: Experimental research], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, No 2 (110), pp. 185–202.
14. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Buchatsky, A.A., et al., Kharakteristiki i mekhanizmy razrusheniya obluchennykh austenitnykh staley v oblasti povyshennykh temperatur i formulirovka kriteriya razrusheniya. Ch. 2: Kritery i model razrusheniya [Characteristics and mechanisms of destruction of irradiated austenitic steels in the field of elevated temperatures and formulation of the fracture criterion. Part 2: Criterion and model of destruction], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, No 2 (110), pp. 203–217.
15. Margolin, B.Z., Varovin, A.Ya., Minkin, A.I., et al., Issledovaniye sostoyaniya metalla vnutrikorpusnykh ustroystv reaktora VVER posle ekspluatatsii v techenie 45 let. Ch. 1: Programma issledovaniya i vrezka trepanov iz VKU [Investigation of the metal condition of the internal devices of the VVER reactor after operation for 45 years. Part 1: Research program and cutting of trepanns from the pressure vessel internals], *Voprosy Materialovedeniya*, 2020, No 3 (103), pp. 135–143.
16. Pirogova, N.E., Dzhalandinov, A.D., Margolin, B.Z., et al., Issledovaniye sostoyaniya metalla vnutrikorpusnykh ustroystv reaktora VVER posle ekspluatatsii v techenie 45 let. Ch. 2. Raschetno-eksperimentalnoe opredeleniye flyuensa bystrykh neitronov i povrezhdayushchei dozy [Investigation of the metal condition of the internal devices of the VVER reactor after operation for 45 years. Part 2: Computational and experimental determination of fast neutron fluence and damaging dose], *Voprosy Materialovedeniya*, 2020, No 3 (103), pp. 144–156.
17. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Sorokin, A.A., et al., Issledovaniye sostoyaniya metalla vnutrikorpusnykh ustroystv reaktora VVER posle ekspluatatsii v techenie 45 let. Ch. 4: Kharakteristiki prochnosti i plastichnosti i mekhanizmy razrusheniya [Investigation of the metal condition of the internal devices of the

VVER reactor after operation for 45 years. Part 4. Strength and ductility characteristics and fracture mechanisms], *Voprosy Materialovedeniya*, 2021, No 1 (105), pp. 116–144.

18. Kryukov, A., Debarberis, L., Hähner, P., et al., Thermal annealing as a method to predict results of high temperature irradiation embrittlement, *J. Nucl. Mater.*, 2013, V. 432, pp. 501–504.

19. Amaev, A.D., Gorynin, I.V., Nikolaev, V.A., Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels (Russian Materials Monograph Series, 2). – Am. Nucl. Soc., 1997.

20. Belozеров, S.V., Neustroev, V.S., Shamardin, V.K., Studying helium accumulation in austenitic steels for evaluating radiation damage in internals of water-moderated water-cooled power reactors, *Phys. Met. Metallogr.*, 2008, V. 106, pp. 503–509.

21. GOST R 8.748-2011: *Metally i splavy. Izmerenie tverdosti i drugikh kharakteristik materialov pri instrumentalnom indentirovanii* [Metals and alloys. Measurement of hardness and other characteristics of materials during instrumental indentation], 2013.

22. Gusev, M.N., Maksimkin, O.P., Toktogulova, D.A., Novoe fizicheskoe yavlenie v vysokooblu-chennykh nerzhavayushchikh stalyakh – volny plasticheskoi deformatsii – i ego prakticheskoe ispolzovanie [A new physical phenomenon in highly irradiated stainless steels – waves of plastic deformation – and its practical use], *Bulletin of the NNC of the Republic of Kazakhstan*, 2008, Is. 4, pp. 27–33.

23. Gusev, M.N., Maksimkin, F.A., Garner, O.P., Peculiarities of plastic flow involving “deformation waves” observed during low-temperature tensile tests of highly irradiated 12Cr18Ni10Ti and 08Cr16Ni11Mo3 steels, *J. Nucl. Mater.*, 2010, V. 403, No 1–3, pp. 121–125.

24. Gusev, M.N., Field, K.G., Busby, J.T., Strain-induced phase transformation at the surface of an AISI-304 stainless steel irradiated to 4.4 dpa and deformed to 0.8% strain, *J. Nucl. Mater.*, 2014, V. 446, No 1–3, pp. 187–192.

25. Gurovich, B.A., Kuleshova, E.A., Frolov, A.S., et al., Investigation of high temperature annealing effectiveness for recovery of radiation-induced structural changes and properties of 18Cr10NiTi austenitic stainless steels, *J. Nucl. Mater.*, 2015, V. 465, pp. 565–581.

26. Busby, J.T., Hash, M.C., Was, G.S., The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels, *J. Nucl. Mater.*, 2005, V. 336, pp. 267–278.

27. Zinkle, S.J., Maziasz, P.J., Stoller, R.E., Dose Dependence of the Microstructural Evolution in Neutron Irradiated Steel, *J. Nucl. Mater.*, 1993, V. 206, pp. 266–286.