

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

<i>Романов О. Н., Оленин М. И., Бушуев С. В., Сприкут Р. В., Сорокин А. А., Зернов Э. А., Шахкян С. А.</i> Влияние модифицирования на процессы формирования зерна поковок из стали марки 10X16H25M2T-BИ	5
<i>Федосеева А. Э.</i> Влияние температуры испытания на сопротивление ползучести 9–12%-ных хромистых сталей	19
<i>Сыч О. В., Хлусова Е. И., Коротовская С. В.</i> Связь хладостойкости и трещиностойкости со структурой листового проката больших толщин из судостроительных сталей различных уровней прочности	31
<i>Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Баклушина И. В., Юрьев А. Б., Литовченко И. Ю., Чапайкин А. С.</i> Структура и свойства интерфейса системы плазменное покрытие – подложка на примере быстрорежущей молибденовой и среднеуглеродистой стали	53
<i>Воробьев Е. В., Чуракова А. А.</i> Исследование влияния термообработки на микроструктуру и механическое поведение сплава $Ti_{49,0}Ni_{51,0}$ в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях	61
<i>Крылов П. С., Леонов В. П., Ртищева Л. П., Хлобыстов Д. О., Лапина Н. А., Лукин М. В., Негодин Д. А.</i> Исследование формирования мелкозернистой структуры в титановом сплаве ПТ-7М при изготовлении трубных заготовок методом горячего выдавливания с последующей холодной радиальной ковкой	69
<i>Осипович К. С., Чумаевский А. В., Семенчук В. М., Шамарин Н. Н., Колубаев Е. А., Кушнарев Ю. В.</i> Создание экспериментальных образцов из титановых сплавов с использованием проволоочной электронно-лучевой и электродуговой аддитивных технологий	81
<i>Золотуев К. В., Кравцова М. В., Цаплева А. С., Коновалова Н. В., Базалеева К. О., Железный М. В., Понкратова Ю. Ю.</i> Твердость и микроструктура сплавов ниобия, легированных танталом, иттрием, гафнием и цирконием, в зависимости от температуры отжига	92

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Шакиров Т. Р., Валеева А. Р., Дутова В. С., Готлиб Е. М.</i> Влияние степени дисперсности и фазового состава цеолитов на характеристики их пористой структуры	102
<i>Юсупов В. И., Минаева Е. Д., Попырина Т. Н., Лунёв И. В., Демина Т. С., Минаев Н. В.</i> Лазерное спекание полимерных микрочастиц полилактида: зависимость от увлажнения	109
<i>Богуш И. Ю., Плуготаренко Н. К., Мясоедова Т. Н., Новиков С. П.</i> Структурные и электрохимические характеристики углеродных кремнийсодержащих материалов: отбор электродов для применения в суперконденсаторах	119

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Антипов В. В., Оглодков М. С., Селиванов А. А., Самохвалов С. В., Нефедова Ю. Н.</i> Оценка стойкости слоистых алюмокомпозитов к ударным нагрузкам	130
<i>Ларионов И. С., Балькаев Д. А., Зимин К. С., Антипин И. С., Амирова Л. М., Волков В. В.</i> Влияние содержания дисперсного наполнителя в композите на основе полифениленсульфида на свойства образцов, полученных методом 3D-печати	143

Евдокимова К. С., Александрова Д. С., Егоров А. С., Храмов Н. Д., Андреичев А. Л., Веверис А. А., Делибалт А. А., Нечаева П. И., Кулёва А. Г., Цыпакин А. А., Капаева Е. А. Исследование совместимости суперконструкционных термопластов с аппретами на основе полиамидокислот	154
Дроздова Е. А., Рогачев Е. А., Кропотин О. В. Влияние сверхэлектропроводного технического углерода на структуру и свойства композиционных материалов на основе полиэтилена высокой плотности	166
Ермаков Б. С., Нечаев Д. В., Швецов О. В., Вологжанина С. А. Оценка применимости базальтопластиков для обустройства свайного фундамента в условиях Крайнего Севера	176
КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ	
Мушникова С. Ю., Парменова О. Н., Чайникова Д. Н., Ушанова Э. А., Созинов Д. С. Исследование стойкости к межкристаллитной коррозии образцов из нержавеющей аустенитных сталей, полученных методом селективного лазерного сплавления, после различных режимов термической обработки	188
РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
Марголин Б. З., Минкин А. И., Фоменко В. Н., Смирнов В. И., Пирогова Н. Е., Сорокин А. А. Особенности влияния температуры испытаний и нейтронной дозы на трещиностойкость при статическом и циклическом нагружении аустенитной стали, облученной в составе ВКУ ВВЭР в течение 45 лет	206
Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов	232

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.046.516.4

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗЕРНА ПОКОВОК ИЗ СТАЛИ МАРКИ 10X16H25M2T-BИ

О. Н. РОМАНОВ, канд. техн. наук, М. И. ОЛЕНИН, д-р техн. наук, С. В. БУШУЕВ, Р. В. СПРИКУТ, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук, Э. А. ЗЕРНОВ, С. А. ШАХКЯН
 НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
 ул. Шпалерная, 49. E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 27.03.2025

После доработки 28.05.2025

Принята к публикации 27.06.2025

Рассмотрено влияние модифицирования редкоземельными металлами и кальцием на литую структуру стали марки 10X16H25M2T-BИ. Показано, что введение в сталь редкоземельных металлов и кальция обеспечивает получение наибольшего количества рекристаллизованных зерен G₅ в результате проведения имитации операции осадки на установке Gleeble 3800 при температуре 1180°C со скоростью деформации 0,03 с⁻¹.

Ключевые слова: рекристаллизация, дендриты, структура, неоднородность, модифицирование, зерно, редкоземельные и щелочноземельные металлы

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-5-18

ЛИТЕРАТУРА

© 2025

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
 «Вопросы материаловедения»

1. Курсевич И. П., Карзов Г. П., Марголин Б. З., Сорокин А. А., Теплухина И. В. Принципы легирования новой радиационно-стойкой аустенитной стали для ВКУ ВВЭР-1200, обеспечивающей их безопасную эксплуатацию не менее 60 лет // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 3 (71) – С. 140–154.
2. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация слитка. – М.: Metallurgy, 1974. – 552 с.
3. Мовчан Б. А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах. – Киев: Гос. изд-во технической литературы УССР, 1962. – 340 с.
4. Голубцов В. А. Теория и практика введения добавок вне печи. – Челябинск, 2006. – 423 с.
5. Гольдштейн Я. Е., Мурзин В. Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. – М.: Metallurgy, 1986. – 271 с.
6. Скок Ю. Я. Кристаллизация переохлажденных металлов и сплавов. Физико-химические и теплофизические процессы кристаллизации стальных слитков // Труды 5-й конференции по слитку «Проблемы стального слитка». – М.: Metallurgy, 1974. – С. 110–115.
7. Каменецкая Л. С. О влиянии примесей на кристаллизацию стального слитка. Затвердевание металлов // Труды 2-го совещания по теории литейных процессов. – М.: Metallurgy, 1958. – С. 299–309.
8. Жидкая сталь / Баум В. А., Хасин Г. А., Тягунов Г. Е. и др. – М.: Metallurgy, 1984. – 208 с.
9. Применение монокристаллических комплексных модификаторов для внепечной обработки стали. Часть 1. Роль неметаллических включений в формировании качества стали / В. А. Голубцов, И. В. Рябчиков, И. В. Бакин, А. Я. Дынин, О. Н. Романов и др. // Бюлл. ин-та «Черметинформация». Черная металлургия. – 2021. – № 3. – С. 295–309.
10. Применение монокристаллических комплексных модификаторов для внепечной обработки стали. Часть 2. Результаты разработки технологии стали широкого ассортимента / В. А. Голубцов, И. В. Рябчиков, И. В. Бакин, А. Я. Дынин, О. Н. Романов и др. // Бюлл. ин-та «Черметинформация». Черная металлургия. – 2021. – № 4. – С. 418–431.
11. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. – М.: Metallurgy, 1986. – 688 с.
12. Онищенко А. К., Беклемишев Н. Н. Теория промышленнойковки сталей и сплавов. – М.: Изд-во «Спутник +», 2011. – 245 с.
13. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 2005. – 431 с.
14. Рудской А. И., Варгасов Н. Р., Барахтин Б. К., Термопластическое деформирование металлов. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2018. – 287 с.
15. Рудской А.И. Научные основы управления структурой и свойствами сталей в процессах термомеханической обработки. – М.: Изд-во РАН, 2019. – 276 с.
16. Голиков И. Н., Масленков С. Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. – М.: Metallurgy, 1977. – С. 223.
17. Нури Ё. Влияние добавок РЗМ на микроструктуру затвердевания стальных слитков и непрерывнолитых слэбов // Тэцу то хаганэ. – 1980. – Т. 66, № 6. – С. 618–627.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ 9–12%-НЫХ ХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ

А. Э. ФЕДОСЕЕВА, д-р техн. наук

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», 308015, Белгород, ул. Победы, 85. E-mail: fedoseeva@bsuedu.ru

Поступила в редакцию 18.08.2025

После доработки 11.09.2025

Принята к публикации 15.09.2025

Высокохромистые стали мартенситного класса выступают перспективным материалом для изготовления элементов энергоблоков тепловых электростанций, способных работать при суперсверхкритических параметрах пара (температура 600–620°C, давление 25–30 МПа). Для оценки характеристик длительной прочности таких материалов требуются достаточно продолжительные испытания, временные рамки которых могут достигать нескольких десятков лет. В настоящем исследовании поднимается вопрос о целесообразности и допустимости повышения температуры испытаний на ползучесть в лабораторных исследованиях для адекватного прогнозирования длительных свойств при более низких температурах на примере 12%-ной хромистой стали с низким содержанием азота и высоким содержанием бора. Оценка допустимости повышения температуры испытания до 675°C исходила из постулата о сохранении механизма деформации при ползучести, механизма разрушения и закономерностей эволюции структуры и фазового состава по сравнению с результатами испытаний при более низкой температуре (650°C). Анализ полученных данных выявил, что при повышении температуры испытания до 675°C основной механизм деформации при ползучести – высокотемпературное переползание дислокаций посредством объемной диффузии – и внутризеренный вязкий механизм разрушения сохраняются, как при 650°C, несмотря на появление переломов на кривых длительной прочности. Анализ микроструктуры после испытаний на ползучесть также показал, что основные температурно-временные зависимости роста ширины реек и среднего размера частиц вторичных фаз могут быть описаны кривыми с одинаковыми коэффициентами для различных температур испытания. Следовательно, температуру 675°C можно рекомендовать для ускорения лабораторных испытаний на ползучесть высокохромистых сталей.

Ключевые слова: высокохромистые стали, ползучесть, возврат, укрупнение частиц, разрушение

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-19-30

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 24-79-10112).

Автор выражает благодарность Центру коллективного пользования «Технологии и материалы НИУ «БелГУ» за предоставленное оборудование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abe F. Creep of Power Plant Steels, in Encyclopedia of Materials // Metals and Alloys. – 2022. – V. 1. – P. 485–493. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.12069-7>

2. Dong Z., Chen L., Xiang Z. Design of a new 11Cr martensitic steel and evaluation of its long-term creep rupture strengths // J. Mater. Res. Technol. – 2022. – V. 20. – P. 3450–3455. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.116>
3. Kaybyshev R. O., Skorobogatykh V. N., Shchenkova I. A. New martensitic steels for fossil power plant: Creep resistance // Phys. Metals Metallogr. – 2010. – V. 109. – P. 186–200. URL: <https://doi.org/10.1134/S0031918X10020110>.
4. Rojas D., Garcia J., Prat O., Sauthoff G., Kaysser-Pyzalla A. R. 9%Cr heat resistant steels: Alloy design, microstructure evolution and creep response at 650°C // Mater. Sci. Eng. A. – 2011. – V. 528. – P. 5164–5176. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.037>
5. Tamura M., Abe F. Analysis of the Degradation in the Creep Strength of High-Cr Martensitic Steels // J. Mater. Sci. Res. – 2021. – V. 10. – P. 1–70. URL: <https://doi.org/10.5539/jmsr.v10n2p1>
6. Abe F., Tabuchi M., Tsukamoto S. Alloy Design of MARBN for Boiler and Turbine Applications at 650°C // Mater. at High Temp. – 2021. – V. 38. – P. 306–321. URL: <http://doi.org/10.1080/09603409.2021.1963393>
7. Detrois M., Hawk J. A., Jablonski P. D. Creep-Resistant Ferritic-Martensitic Steels for Power Plant Applications // J. of Materi Eng. and Perform. – 2024. – V. 33. – P. 1–42. URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08566-1>
8. Precipitate Characteristic of T91 Ferritic/Martensitic Steel During Short-Term Creep / Li H., Huang M., Liang N., et al. // Metall. Mater. Trans. A. – 2024. – V. 55. – P. 607–622. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-023-07272-w>
9. Dudova N. 9–12% Cr Heat-Resistant Martensitic Steels with Increased Boron and Decreased Nitrogen Contents // Metals. – 2022. – V. 12. – P. 1119. URL: <https://doi.org/10.3390/met12071119>
10. Fedoseeva A., Klauz A., Kaibyshev R. Improved creep strength of 10% Cr steels with low N and high B content via increasing quenching temperature // Materials Characterization. – 2024. – V. 212. – P. 113957. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113957>
11. Maruyama K., Abe F., Sato H., Shimojo J., Sekido N., Yoshimi K. On the physical basis of a Larson-Miller constant of 20 // J. Press. Ves. Pip. – 2028. – V. 159. – P. 93–100. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.11.013>
12. Nikitin I., Fedoseeva A., Kaibyshev R. Strengthening mechanisms of creep-resistant 12%Cr–3%Co steel with low N and high B contents // J Mater. Sci. – 2020. – V. 55. – P. 7530–7545. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04508-7>
13. Fedoseeva A., Nikitin I., Tkachev E., Mishnev R., Dudova N., Kaibyshev R. Effect of alloying on the nucleation and growth of Laves phase in the 9–10%Cr–3%Co martensitic steels during creep // Metals. – 2021. – V. 11. – P. 60. URL: <https://doi.org/10.3390/met11010060>
14. 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. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07275-9>.
15. Maruyama K., Sekido N., Yoshimi K. Changes in strengthening mechanisms in creep of 9Cr–1.8W–0.5Mo–VNb steel tested over wide ranges of creep conditions // Int. J. Press. Vessels Pip. – 2021. – V. 190. – P. 104312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104312>.

16. Abe F. Analysis of creep rates of tempered martensitic 9%Cr steel based on microstructure evolution // Mater. Sci. Eng. A. – 2012. – V. 534. – P. 632–639. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.118>.
17. Mechanisms of Creep, and Creep-Resistant Materials // Engineering Materials: An Introduction to Properties, Applications and Design / Ed. by Jones D. R. H., Ashby M. F. – Cambridge, US: Elsevier, 2019. – 5th ed. – Ch. 23. – P. 381–394.
18. Fedoseeva A., Tkachev E., Kaibyshev R. Advanced heat-resistant martensitic steels: long-term creep deformation and fracture mechanisms // Mater. Sci. Eng. A. – 2023. – V. 862. – P. 144438. URL : <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144438>
19. Dudko V., Belyakov A., Kaibyshev R. Evolution of lath substructure and internal stresses in a 9% Cr steel during creep // ISIJ Int. – 2017. – No 57. – P. 540–549. URL: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-334>
20. Dudova N., Mishnev R., Kaibyshev R. Creep behavior of a 10%Cr heat-resistant martensitic steel with low nitrogen and high boron contents at 650 °C. Mater. Sci. Eng. A. – 2019. – V. 766. – P. 138353. URL : <http://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138353>
21. Xiao B., Xu L., Cayron C., Xue J., Sha G., Loge R. Solute-dislocation interactions and creep-enhanced Cu precipitation in a novel ferritic-martensitic steel // Acta Mater. – 2020. – No 195. – P. 199–208. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.05.054>
22. Xiao B., Haokai D., Tao Y., Shaofei L., et al. Creep-Induced Heterogeneous Precipitation of Laves Phase with Two Morphologies in Tempered Martensite Ferritic Steels // Materials Research Letters. – 2023. – V. 11. – P. 630–637. URL: <https://doi.org/10.1080/21663831.2023.2208613>
23. Abe F. Effect of boron on microstructure and creep strength of advanced ferritic power plant steels // Procedia Eng. – 2011. – V. 10. – P. 94–99. URL: <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.04.018>
24. Liu Z., Wang X., et al. Effect of boron on G115 martensitic heat resistant steel during aging at 650°C // Mater. Sci. Eng. A. – 2020. – V. 787. – P. 139529. URL : <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139529>

УДК669.14.018.41:539.421:621.771.23

СВЯЗЬ ХЛАДОСТОЙКОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СО СТРУКТУРОЙ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА БОЛЬШИХ ТОЛЩИН ИЗ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ ПРОЧНОСТИ

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

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

Поступила в редакцию 1.04.2025

После доработки 11.08 .2025

Принята к публикации 23.08.2025

Исследована структура листового проката из хладостойких судостроительных сталей повышенной и высокой прочности, широко востребованных для строительства морской техники арктического применения, в первую очередь мощных атомных ледоколов. Для исследования структуры использованы современные методики количественной оценки параметров структуры с помощью оптической металлографии, дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD-анализа) и просвечивающей электронной микроскопии. Показаны основные структурные особенности, оказывающие влияние на характеристики работоспособности листового проката в зависимости от уровня прочности и технологии производства. Установлена взаимосвязь хладостойкости и трещиностойкости со структурой листового проката больших толщин из судостроительных сталей различных уровней прочности.

Ключевые слова: хладостойкая судостроительная сталь, характеристики работоспособности, хладостойкость, трещиностойкость, температура $T_{кб}$, температура NDT, критическое раскрытие вершины трещины CTOD, структура, размер структурного элемента.
DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-31-52

ЛИТЕРАТУРА

1. Филин В. Ю. Контроль качества сталей для крупногабаритных сварных конструкций Арктического шельфа. Применение российских и зарубежных требований // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 2 (98). – С. 136–153.
2. Давиденков Н. Н. Динамическая прочность и хрупкость металлов. Т. 1 – Киев: Наукова думка, 1981. – 704 с.
3. Мешков Ю. Я., Пахаренко Г. А. Структура металла и хрупкость стальных изделий. – Киев: Наукова думка, 1985. – 268 с.
4. Трефилов В. И., Мильман Ю. В., Фирстов С. А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. – Киев: Наукова думка, 1975. – 316 с.
5. Pickering F. B., Gladman T. Metallurgical developments in carbon steels // The Journal of the Iron and Steel Institute. – 1963. – N 81. – P. 10–25.
6. Mintz B., Peterson G., Nassar A. Structure-property relationships in ferrite-pearlite steels // Ironmaking and Steelmaking. – 1994. – N 21. – P. 215–222.
7. Hanamura T., Yin F., Nagai K. Ductile-brittle transition temperature of ultrafine ferrite/cementite microstructure in a low carbon steel controlled by effective grain size // The Iron and Steel Institute of Japan. – 2004. – N 44. – P. 610–617.
8. Wang C., Wang M., Shi J., Hui W., Dong H. Effect of microstructural refinement on the toughness of low carbon martensitic steel // Scripta Materialia. – 2008. – N 58. – P. 492–495.
9. Morris Jr. J. W. On the ductile-brittle transition in lath martensitic steel // The Iron and Steel Institute of Japan. – 2011. – N 51. – P. 1569–1575.
10. Bhattacharjee D., Knott J. F., Davis C. L. Charpy-impact-toughness prediction using an 'effective' grain size for thermomechanically controlled rolled microalloyed steels // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2004. – N 35. – P. 121–130.
11. Kaijalainen A. J., Suikkanen P. P., Limnell T. J., Karjalainen L. P., Kömi J. I., Porter D. A. Effect of austenite grain structure on the strength and toughness of direct-quenched martensite // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – N 577. – P. 642–648.

12. Isasti N., Jorge-Badiola D., Taheri M. L., Uranga P. Microstructural features controlling mechanical properties in Nb–Mo microalloyed steels. Part II: impact toughness // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2014. – N 45. – P. 4972–4982.
13. Jia T., Zhou Y., Jia X., Wang Z. Effects of microstructure on CVN impact toughness in thermomechanically processed high strength microalloyed steel // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2016. – N 48. – P. 685–696.
14. Han J., Da Silva A. K., Ponge D., Raabe D., Lee S.-M., Lee Y.-K., Lee S.-I., Hwang B. The effects of prior austenite grain boundaries and microstructural morphology on the impact toughness of intercritically annealed medium Mn steel // *Acta Materialia* – 2017. – N 122. – P. 199–206.
15. Лаврентьев А. А., Голосиенко С. А., Ильин А. В., Михайлов М. С., Мотовилина Г. Д., Петров С. Н., Садкин К. Е. Сопротивление хрупкому разрушению высокопрочной среднелегированной стали и его связь с параметрами структурного состояния // *Вопросы материаловедения*. – 2019. – № 3(99). – С. 128–147.
16. 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 1. Стратегия, программа и методы экспериментальных и расчетных исследований // *Вопросы материаловедения*. – 2024. – № 1 (117). – С. 173–194.
17. 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 2. Характеристики прочности и пластичности // *Вопросы материаловедения*. – 2024. – № 1 (117). – С. 195–209.
18. 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 // *Вопросы материаловедения*. – 2024. – № 2 (118). – С. 166–186.
19. Бернштейн М. Л., Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия. – 1977. – 432 с.
20. Рыбин В. В., Вергазов А. Н. Торможение микротрещины в субзеренной структуре // *Физика металлов и металловедение*. – 1975. – № 41. – С. 220–223.
21. Нестерова Е. В., Золоторевский Н. Ю., Титовец Ю. Ф., Хлусова Е. И. Наследование разориентаций и модель формирования структуры бейнита в низкоуглеродистых сталях под влиянием деформации аустенита // *Вопросы материаловедения*. – 2011. – № 4 (68). – С. 17–26.
22. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
23. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Данилов В. И. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука, 1990. – 225 с.
24. Takayama N., Miyamoto G., Furuhashi T. Effects of transformation temperature on variant pairing of bainitic ferrite in low carbon steel // *Acta Materialia*. – 2012. – Vol. 60. – Pp. 2387–2396.

25. Зисман А. А., Золоторевский Н. Ю., Петров С. Н., Хлусова Е. И., Яшина Е. А. Панорамный кристаллографический анализ эволюции структуры при отпуске низкоуглеродистой мартенситной стали // *МиТОМ*. – 2018. – № 3 (753). – С. 10–17.
26. Miyamoto G., Iwata N., Takayama N., Furuhashi T. Quantitative analysis of variant selection in ausformed lath martensite // *Acta Mater.* – 2012. – V. 60. – P. 1139–1148.
27. Хлусова Е.И., Сыч О.В., Орлов В. В. Хладостойкие стали. Структура, свойства, технологии // *Физика металлов и металловедение*. – 2021. – Т. 122, № 6. – С. 621–657.
28. Пышминцев И. Ю., Смирнов М. А. Структура и свойства сталей для магистральных трубопроводов // Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2019. – 242 с.
29. Hu J., Du L. X., Zang M., Yin S. J., Wang Y. G., Qi, X. Y. Gao X. H., Misra R. D. K. On the determining role of acicular ferrite in V–N microalloyed steel in increasing strength-toughness combination // *Materials Characterization*. – 2016. – V. 118. – P. 446–453.
30. Kaijalainen A., Pallaspuro D., A. Porter S. Tempering of direct quenched low-alloy ultra-high-strength steel, Part I – microstructure // *Adv. Mater. Res.* – 2014. – N 922. – P. 316–321.
31. Pallaspuro S., Kaijalainen A., Mehtonen S., Kömi J., Zhang Z., Porter D. Effect of microstructure on the impact toughness transition temperature of direct-quenched steels // *Materials Science & Engineering*. – 2017. – N 12.
32. Lehto P., Remes H., Saukkonen T., Hänninen H., Romanoff J. Influence of grain size distribution on the Hall-Petch relationship of welded structural steel // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2014. – N 592. – P. 28–39.
33. Pineau A., Benzerga A., Pardoen T. Over view article failure of metals I–brittle and ductile fracture // *Acta Mater.* – 2016. – N 107. – P. 424–483.
34. НД № 2-020101-174. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XIII: Материалы. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2023. – 389 с.
35. МВИ № 304-19-10 (ФР.1.31.2010.07296). Определение доли, размера (в диапазоне 5–5000 нм) и углов разориентировки нанофрагментов в материалах, подвергнутых интенсивной пластической деформации, с помощью анализатора картин дифракции обратно отраженных электронов и метода одиночных рефлексов // *Методика выполнения измерений*. – СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2010. – 29 с.
36. Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Высокопрочные свариваемые улучшаемые стали. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2016. – 212 с.
37. Byoungchul Hwang, Chang Gil Lee, Sung-Joon Kim. Low-Temperature Toughening Mechanism in Thermo mechanically Processed High-Strength Low-Alloy Steels // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2011. – V. 42A. – P. 717.
38. Зисман А. А., Петров С. Н., Пташник А. В. Количественная аттестация бейнито-мартенситных структур высокопрочных легированных сталей методами сканирующей электронной микроскопии // *Металлург*. – 2014. – № 11. – С. 91–95.
39. Kang Jun-Yun, Do Hyun Kim, Sung-Il Baik, Tae-Hong Ahn, Young-Woon Kim, Heung Nam Han, Kyu Hwan Oh, Hu-Chul Lee and Seong Ho Han. Phase analysis of steels by averaged EBSD Functions // *ISI International*. – 2011. – V. 51, N 1 – P. 130–136.
40. Казаков А. А., Киселев Д. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И. Методика оценки микроструктурной неоднородности по толщине листового проката из хладостойкой низколегированной стали арктического применения // *Черные металлы*. – 2020. – № 9. – С. 11–19.

41. Казаков А. А., Киселев Д. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И. Количественная оценка структурной неоднородности в листовом прокате из хладостойкой низколегированной стали для интерпретации технологических особенностей его изготовления // Черные металлы. – 2020. – № 11. – С. 4–14.
42. Zisman A.A., Van Boxel S., Seefeldt M., Van Houtte P. Gradient matrix method to image crystal curvature by processing of EBSD data and trial recognition of low-angle boundaries in IF steel // Materials Science and Engineering-A. – 2008. – V. 474. – P. 165–172.
43. Margolin B. Z., Karzov G. P., Kostylev V. I., Shvetsova V. A. Modelling for transcrystalline and intercrystalline fracture by void nucleation and growth // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1998. – V. 21. – P. 123–137.
44. Марголин Б. З., Сорокин А. А. Прогнозирование влияния нейтронного облучения на характеристики вязкого разрушения аустенитных сталей // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 1 (69). – С. 126–147.

УДК 621.791.92:621.727:620.178

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИНТЕРФЕЙСА СИСТЕМЫ ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ – ПОДЛОЖКА НА ПРИМЕРЕ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ МОЛИБДЕНОВОЙ И СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Ю. Ф. ИВАНОВ¹, д-р физ.-мат. наук, В. Е. ГРОМОВ², д-р физ.-мат. наук, И. В. БАКЛУШИНА², А. Б. ЮРЬЕВ², д-р техн. наук, И. Ю. ЛИТОВЧЕНКО³, д-р физ.-мат. наук, А. С. ЧАПАЙКИН²

¹ ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН», 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3. E-mail: yufi55@mail.ru

² ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

³ ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: litovchenko@spti.tsu.ru

Поступила в редакцию 17.06.2025

После доработки 1.09.2025

Принята к публикации 2.09.2025

Методами современного физического материаловедения проведены исследования структурно-фазового состояния и элементного состава переходной зоны контакта системы плазменное покрытие (быстрорежущая молибденовая сталь) – подложка (среднеуглеродистая сталь). Установлено, что переходный слой толщиной ≈ 100 мкм содержит α -фазу, γ -фазу, карбиды сложного состава $Me_{23}C_6$, Me_6C , а также MoC и цементит. Структура переходного слоя представлена пакетным и пластинчатым мартенситом, прослойками аустенита и наноразмерными частицами цементита. Зона контакта покрытие – подложка не содержит микропор и микротрещин. Нанотвердость и модуль Юнга плавно изменяются при удалении от покрытия и подложки, формируя демпфирующий слой вдоль поверхности контакта, что позволяет говорить о высокой работоспособности системы плазменная наплавка – подложка.

Ключевые слова: быстрорежущая молибденовая сталь, плазменный метод, система покрытие – подложка, интерфейс, структура, фазовый состав, свойства

ЛИТЕРАТУРА

1. Kremnev L. S. From High-Speed Tungsten Steel to High-Temperature Molybdenum Steel: A Century of High-Speed Steel // Steel in Translation. – 2009. – V. 39, N 12. – P. 1111–1118.
2. Кремнев Л. С., Онегина А. К., Виноградова Л. А. Особенности превращений, структуры и свойств молибденовых быстрорежущих сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – № 12 (654). – С. 13–19. EDN: KZSBKP
3. Кремнев Л. С. Теория легирования и создание на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов // МиТОМ. – 2008. – № 11. – С. 18–28. EDN: KVXKKF
4. Купалова И. К. Фазовый анализ и фазовый состав быстрорежущих сталей (обзор) // Заводская лаборатория. – 1983. – № 1. – С. 27–40.
5. Вострецов Г. Н. Деформационная способность наплавленного теплостойкого металла типа P2M8 при мартенситном превращении // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2012. – № 1. – С. 7–10.
6. Darmawan W., Quesada J., Marchal R. Characteristics of laser melted AISI-T1 high speed steel and its wear resistance // Surf. Eng. – 2007. – V. 23, N 2. – P. 112 – 119.
7. Emelyushin A. N., Petrochenko E. V., Nefediev S. P. Investigation of the structure and impact-abrasive resistance of coatings of the Fe–C–Cr–Mn–Si system, additionally alloyed with nitrogen // Welding International. – 2013. – V. 27, N 2. – P. 150–153.
8. Нефедьев С. П., Емельюшин А. Н. Влияние азота на формирование структуры и свойств плазменных покрытий типа 10P6M5 // Вестник Югорского государственного университета. – 2021. – № 3 (62). – С. 33–45. DOI: 10.17816/byusu20210233-45
9. Мозговой И. В., Шнейдер Е. А. Наплавка быстрорежущей стали. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. – 200 с.
10. Ivanov Yu. F., Gromov V. E., Potekaev A. I., Guseva T. P., Chapaikin A. S., Vashchuk E. S., Romanov D. A. Structure and properties of R18U surfacing of high-speed steel after its high tempering // Russian Physics Journal. – 2023. – V. 66, N 7. – P. 731–739. DOI: 10.1007/s11182-023-02999-w
11. Rakhadilov B. K., Zhurerova L. G., Scheffler M., Khassenov A. K. Change in high temperature wear resistance of high speed steel by plasma nitriding // Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. – 2018. – V. 3 (91). – P. 59–65. EDN: KJWHYN
12. Громов В. Е., Юрьев А. Б., Иванов Ю. Ф., Миненко С. С., Коновалов С. В. Электронно-микроскопическое исследование зоны контакта наплавка (быстрорежущая сталь P2M9) – подложка (сталь 30ХГСА) // Вестник СибГИУ. – 2025. – № 2 (52). – С. 3–8.
13. Potekaev A. I., Gromov V. E., Yuriev A. B., Ivanov Yu. F., Konovalov S. V., Minenko S. S., Semin A. P., Chapaikin A. S., Litovchenko I. Yu. Transition zone structure in the fast-cutting surfaced layer – substrate system // Russian Physics Journal. – 2024. – V. 67, N 8. – P. 1107–1113.
14. Egerton F. R. Physical Principles of Electron Microscopy. – Basel: Springer International Publishing, 2016. – 196 p.

15. Kumar Ch. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. – New York: Springer, 2014. – 717 p.
16. Carter C. B., Williams D. B. Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
17. Курдюмов В. Г., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 236 с.

УДК 539.25

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА $Ti_{49,0}Ni_{51,0}$ В КРУПНОЗЕРНИСТОМ И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ СОСТОЯНИЯХ

Е. В. ВОРОБЬЕВ¹, А. А. ЧУРАКОВА^{1,2}, канд. физ.-мат. наук

¹ ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», 450076, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Заки Валиди, 32. E-mail: z.vorobyov@mail.ru

² ФГБНУ «Институт физики молекул и кристаллов – обособленное структурное подразделение УФИЦ РАН», 450075, Уфа, Республика Башкортостан, пр. Октября, 151. E-mail: churakova_a@mail.ru

Поступила в редакцию 2.09.2025

После доработки 6.10.2025

Принята к публикации 7.10.2025

Объектом исследования является изучение влияния температуры отжига на механические свойства сплава $Ti_{49,0}Ni_{51,0}$ в крупнозернистом и ультрамелкозернистом (УМЗ-1 и УМЗ-2) состояниях. В ходе исследования были выявлены зависимости влияния исходной структуры сплава $Ti_{49,0}Ni_{51,0}$ и структуры сформировавшейся в процессе старения в широком диапазоне температур, на механические характеристики сплава. Были проведены исследования с целью изучения зависимости свойств от вида обработки. Были исследованы микроструктура с помощью оптической и просвечивающей микроскопии, механические свойства, а также проведен фрактографический анализ. Установлено, что температура отжига в значительной степени влияет на механические характеристики сплава $Ti_{49,0}Ni_{51,0}$. При проведении отжига в диапазоне температур старения и при более высоких температурах наблюдается снижение предела прочности и повышение пластичности. Проведение интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования позволило достичь высоких значений предела прочности и предела текучести без снижения пластичности.

Ключевые слова: TiNi, функциональные свойства, механические свойства, отжиг, микроструктура, интенсивная пластическая деформация

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-61-68

ЛИТЕРАТУРА

1. Мухаметжанов Х., Бекарисов О. С., Мухаметжанов Д. Ж., Карибаев Б. М., Дюсенбаев Н. Н., Жанаспаев Т. М. Научное обоснование использования биокомпозитного материала из гранул пористого никелида титана, обогащенного

тромбоцитарной массой для костной пластики // Traumatology and Orthopaedics of Kazakhstan. – 2021. – № 4 (60). – С 10–30.

2. Марченко Е. С., Гордиенко И. И., Козулин А. А., Байгонакова Г. А., Борисов С. А., Гарин А. С., Черный С. П., Чойнзонов Е. Л., Кульбакин Д. Е. Исследование биосовместимости пористых 3D TiNi имплантатов в условиях in vivo // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. – 2024. – № 39 (1). – С. 184–193.

3. Jani J. M., Leary M., Subic A., Gibson M. A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // Materials & Design (1980–2015). – 2014. – V. 56. – P. 1078–1113.

4. Валиев Р. З., Александров И. В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.

5. Churakova A., Gunderov D., Kayumova E. The Investigation of Microstructure and Mechanical Behavior and the Fractographic Analysis of the Ti_{49.1}Ni_{50.9} Alloy in States with Different Activation Deformation Volumes // Appl. Sci. – 2021. – V. 11. – P. 3052.

6. Kuranova N. N., Makarov V. V., Pushin V. G., Ustyugov Y. M. Influence of Heat Treatment and Deformation on the Structure, Phase Transformation, and Mechanical Behavior of Bulk TiNi-Based Alloys // Metals. – 2022. – V. 12. – P. 2188.

7. Komarov V., Karelin R., Cherkasov V., Postnikov I., Korpala G., Khmelevskaya I., Yusupov V., Kawalla R., Pahl U., Prokoshkin S. Deformation Behavior of NiTi Shape Memory Alloy Subjected to Severe Torsion Deformation // Procedia Structural Integrity. – 2025. – V. 69. – P. 76–79.

8. Karelin R., Komarov V., Khmelevskaya I., Andreev V., Yusupov V., Prokoshkin S. Structure and properties of TiNi shape memory alloy after low-temperature ECAP in shells // Materials Science and Engineering: A. – 2023. – V. 872. – P. 144960.

9. Khmelevskaya I. Yu., Prokoshkin S. D., Trubitsyna I. B., Belousov M. N., Dobatkin S. V., Tatyannin E. V., Korotitskiy A. V., Brailovski V., Stolyarov V. V., Prokofiev E. A. Structure and properties of Ti–Ni-based alloys after equal channel angular pressing and high-pressure torsion // Materials Science and Engineering A. – 2008. – V. 481–482. – P. 119–122.

10. Лотков А. И., Гришков В. Н., Дударев Е. Ф. и др. Формирование ультрамелкозернистого состояния, мартенситные превращения и неупругие свойства никелида титана после «abc»-прессования // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 1 (53). – С. 161–165.

11. Huang J., Xu Z. Evolution mechanism of grain refinement based on dynamic recrystallization in multiaxially forged austenite // Materials Letters. – 2006. – V. 60. – P. 1854–1858.

12. Столяров В. В., Прокофьев Е. А., Прокошкин С. Д., Добаткин С. В., Трубицына И. Ю., Хмелевская И. Б., Пушин В. Г., Валиев Р. З. Структурные особенности, механические свойства и эффект памяти формы в сплавах TiNi, подвергнутых равноканальному угловому прессованию // Физика металлов и металловедение. – 2005. – Т. 100, № 6. – С. 91–102.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ПТ-7М ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ХОЛОДНОЙ РАДИАЛЬНОЙ КОВКОЙ

П. С. КРЫЛОВ¹, В. П. ЛЕОНОВ¹, д-р техн. наук, Л. П. РТИЩЕВА¹, Д. О. ХЛОБЫСТОВ²,
Н. А. ЛАПИНА², М. В. ЛУКИН², Д. А. НЕГОДИН²

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 49. E-mail: pavelkriil@mail.ru

² АО «Чепецкий механический завод», 427622, г. Глазов, ул. Белова, д. 7.

E-mail: dokhlobystov@rosatom.ru

Поступила в редакцию 31.07.2025

После доработки 6.10.2025

Принята к публикации 24.10.2025

Исследовано влияние интенсивной пластической деформации при выдавливании титанового сплава ПТ-7М с последующей холодной радиальной ковкой на формирование структуры материала. Определены оптимальные режимы термической обработки для формирования регламентированной мелкозернистой структуры в материале. Показано, что радиальная ковка горячепрессованной заготовки позволяет сформировать однородную мелкозернистую заготовку.

Ключевые слова: титановые сплавы, интенсивная пластическая деформация, радиальная ковка, термическая обработка, мелкозернистая структура

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-69-80

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В., Ушков С. С. Титановые сплавы для морской техники. – СПб.: Политехника, 2007. – 387 с.
2. Валиев Р. З., Александров И. В. Объемные наноструктурные металлические материалы. Получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
3. Полякова В. В. Особенности структуры и механические свойства ультрамелкозернистого сплава Ti–6Al–7Nb для медицинских применений // Дис. ... канд. техн. наук, Уфа, 2015.
4. Гатина С. А. Фазовые превращения и механические свойства псевдо-β-сплава Ti–15Mo, подвергнутого интенсивной пластической деформации // Дис. ... канд. техн. наук, Уфа, 2016.
5. Александров И. В. Эволюция кристаллографической текстуры в технически чистом титане, подвергнутом равноканальному угловому прессованию // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 76–82.
6. Семенова И. П. Эволюция структуры сплава ВТ6, подвергнутого равноканальному угловому прессованию // Физика металлов и металловедение. – 2005. – Т. 100, № 1. – С. 53–61.
7. Кашин О. А. Деформационное поведение и разрушение при циклическом нагружении титановых сплавов, подвергнутых равноканальному угловому прессованию // Физическая мезомеханика. – 2004. – № 7 (спец. выпуск, ч. 2). – С. 130–134.
8. Поляков А. В. Эволюция микроструктуры титана Grade 4 с изменением степени деформации при РКУП–CONFORM // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 1. – С. 95–100.

9. Зарипова Р. Г. Влияние интенсивной пластической деформации и режимов обработки на структуру и механические свойства титанового сплава ВТ6 // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 7. – С. 17–24.
10. Бетехтин В. И. Механические свойства, плотность и дефектная структура микрокристаллического титана ВТ1-0, полученного после интенсивной пластической деформации при винтовой и продольной прокатках // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, вып. 11. – С. 58–63.
11. Дедюлина О. К. Формирование ультрамелкозернистой структуры в среднеуглеродистой стали 40ХГНМ ротационной ковкой и ее влияние на механические свойства // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1. – С. 701–706.
12. Балахнин А. Н. Формирование структуры и свойств закаленных конструкционных низкоуглеродистых сталей при холодной радиальной ковке и последующем термическом воздействии // Дис. ... канд. техн. наук: Спец 05.16.09, Пермь, 2015.
13. Шайманов Г. С. Особенности поверхности разрушения стали 09Г2С после холодной радиальнойковки // Вестник ПНИПУ. – 2016. – Т. 18, № 3. – С. 119–134.
14. Закарлюкин С. И. Применение радиально-ковочной машины SKK-14 для холодной и горячейковки труб // Сб. Южно-уральского федерального университета. Металлургия. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 106–114.
15. Мартыненко Н. С. Влияние ротационнойковки на структуру, текстуру и механические свойства промышленного магниевосплавa МА2-1пч // Технология легких сплавов. – 2016. – № 4.
16. Grosman F., Piela A. Metal flow in the deformation gap at primary swaging // J. Mater. Proc. Technol. – 1996. – V. 56. – P. 404–411.
17. Gan W. M. Microstructures and mechanical properties of pure Mg processed by rotary swaging // Mater. & Des. – 2014. – V. 63. – P. 83–88.
18. Gan W. M. Bulk and local textures of pure magnesium by rotary swaging // J. of Magnes. & Alloys. – 2013. – V. 1. – P. 341–345.
19. Заводчиков А. С. Структура и свойства трубных полуфабрикатов из циркониевого сплава Э110 после радиальнойковки // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Спец 05.16.09, Томск, 2011.
20. Жеребцов С. В. Влияние теплой ротационнойковки на структуру и свойства титановосплавa ВТ6 // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 7. – С. 30–34.
21. Klimova M., Zherebtsov S., Salishchev G. Ultrafine-grained structure formation in Ti–6Al–4V alloy via warm swaging // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 63. – Art. 012070.
22. Логинов Ю. Н. Прессование как метод интенсивной пластической деформации металлов и сплавов. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2016. – 158 с.
23. Логинов Ю. Н. Начальная стадия прессования трубной заготовки из титановосплавa: моделирование и эксперимент // Metallurg. – 2024. – № 7. – С. 47–52.
24. Смирнов В. Г. Формирование кристаллографической текстуры в горяче- и холоднодеформированных трубах из сплавов титана // Титан. – 2009. – № 4 – С. 19–28.

25. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.

УДК 669.295:621.762:621.791.927.5

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ И ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

К. С. ОСИПОВИЧ, канд. физ.-мат. наук, А. В. ЧУМАЕВСКИЙ, д-р тех. наук, В. М. СЕМЕНЧУК,
Н. Н. ШАМАРИН, Е. А. КОЛУБАЕВ, д-р тех. наук, Ю. В. КУШНАРЕВ
ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН»,
634055, Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: osipovich_k@ispms.ru

Поступила в редакцию 2.09.2025

После доработки 5.11.2025

Принята к публикации 14.11.2025

Представлены экспериментальные образцы из титановых сплавов, полученные методами проволочной электронно-лучевой и электродуговой аддитивных технологий. Кратко описаны некоторые методы управления процессом для контроля дефектов с точки зрения факторов, влияющих на динамику ванны расплава, включая контроль термических условий процесса во время 3D-печати. В рамках исследования проведен комплексный анализ результатов получения образцов для определения наиболее оптимального метода с точки зрения бездефектности, достижения подходящей структуры и оптимальных механических свойств образцов на основе титановых сплавов. Скорость изготовления образцов ЭДАП (электродуговое аддитивное производство) и средние значения механических свойств образцов ЭДАП почти в 1,5 раза выше, чем образцов ЭЛАП (электронно-лучевое аддитивное производство), однако боковая поверхность образцов ЭЛАП имеет более плоскую поверхность. Практическая значимость заключается в определении предпочтительного способа эффективного производства и повышения конкурентоспособности изделий на основе титановых сплавов.

Ключевые слова: аддитивное производство, проволочная электронно-лучевая аддитивная технология, электродуговая аддитивная технология, титан, макроструктура, механические свойства, тепло-вложение, стратегия печати

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-81-91

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20142 (URL: <https://rscf.ru/project/25-19-20142/>) и гранта в форме субсидии, выделяемого Департаментом по научно-технологическому развитию и инновационной деятельности Томской области (Соглашение № 02/5/2025).

ЛИТЕРАТУРА

1. Афонин В. К., Ермаков Б. С., Лебедев Е. Л., Пряхин Е. И., Самойлов Н. С., Солнцев Ю. П., Шипша В. Г. Металлы и сплавы: справочник. – СПб.: Профессионал, 2003. – 1090 с.
2. Чечулин Б. Б. Титановые сплавы в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.

3. Никитина Е. В., Фролов В. А., Степанов В. В., Предко П. Ю. Исследование структурной и химической неоднородности при сварке различных групп металлических материалов // Сварочное производство. – 2013. – № 10. – С. 4–9.
4. Патон Б. Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. – М.: Машиностроение, 1974. – 767 с.
5. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source // Weld World. – 2018. – V. 62. – P. 267–275. DOI: 10.1007/s40194-017-0537-7
6. Review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement / B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu et al. // J. Manuf. Process. – 2018. – V. 35. – P. 127–139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001
7. Gaspar B. Microstructural Characterization of Ti–6Al–4V and Its Relationship to Sample Geometry. – San Luis Obispo, CA, USA: Materials Engineering Department, Cal Poly, 2012. – 22 p.
8. Donachie M. J. Titanium: A Technical Guide. – Materials Park, OH, USA: ASM International, 2000.
9. Rafi H. K., Karthik N. V., Gong H., Starr T. L., Stucker B. E. Microstructure and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabrication by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting // J. Mater. Eng. Perform. – 2013. – V. 22. – P. 3872–3883.
10. Collins, P. Brice D., Samimi P., Ghamarian I., Fraser H. Microstructural control of additively manufactured metallic materials // Annu. Rev. Mater. Res. – 2016. – V. 46. – P. 63–91.
11. Mapping the geometry of Ti–6Al–4V: From martensite decomposition to localized spheroidization during selective laser melting / P. Barriobero-Vila, K. Artzt, A. Stark, N. Schell, M. Siggel, J. Gussone et al. // Scr. Mater. – 2020. – V. 182. – P. 48–52.
12. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel / S. Y. Tarasov, A. V. Filippov, N. L. Savchenko, S. V. Fortuna, V. E. Rubtsov, E. A. Kolubaev et al. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2018. – V. 99. – P. 2353–2363. DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0
13. Wang X., Gong X., Chou K. Scanning speed effect on mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy processed by electron beam additive manufacturing // Procedia Manuf. – 2015. – V. 1. – P. 287–295. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.026
14. Wittenburg K. Specific instrumentation and diagnostics for high-intensity hadron beams // CERN Yellow Reports. – 2009. – P. 511–568. DOI: 10.5170/CERN-2013-001.251
15. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms // Int. Mater. Rev. – 2012. – V. 62, Is. 3. – P. 159–207. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014
16. Zadpoor A. A. Additively manufactured metallic porous biomaterials // J. Mater. Chem. B. – 2019. – V. 7. – P. 4088–4117. DOI: 10.1039/C9TB00420C
17. A design of experiment approach for development of electron beam powder bed fusion process parameters and improvement of Ti–6Al–4V as-built properties / D. Braun, Y. I. Ganor, S. Samuha, G. M. Guttman, M. Chonin, N. Frage et al. // J. Manuf. Mater. Process. – 2022. – V. 6, N 4. – P. 90. DOI: 10.3390/jmmp6040090

18. Sames W. J., List F. A., Dehoff R. R., Zhang C., Lowe-Ma L. E. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // Int. Mater. Rev. – 2016. – V. 61. – P. 315–360. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649
19. Materials for additive manufacturing / D. Bourell, J.P. Kruth, M. Leu, T. Nakagawa, B. Rosen, M. C. Seepersad et al. // CIRP Ann. – 2017. – V. 66. – P. 659–681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.005
20. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. Deb Roy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski et al. // Prog. Mater. Sci. – 2018. – V. 92. – P. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001
21. Study on powder particle behavior in powder spreading with discrete element method and its critical implications for binder jetting additive manufacturing processes / S. Wu, Y. Yang, Y. Huang, C. Han, J. Chen, Y. Xiao et al. // Virtual Phys. Prototyp. – 2023. – V. 18, Is. 1. – P. 1–26. DOI: 10.1080/17452759.2022.2158877
22. Materials for additive manufacturing / D. Bourell, J. P. Kruth, M. Leu, G. Levy, D. Rosen, A.M. Beese et al. // CIRP Ann. – 2017. – V. 66. – P. 659–681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009
23. Pinkerton A. J., Li L. Direct Additive Laser Manufacturing Using Gas and Water-Atomised H13 Tool Steel Powders // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2005. – V. 25. – P. 471–479.
24. Hebert R. J. Metallurgical Aspects of Powder Bed Metal Additive Manufacturing // J. Mater. Sci. – 2016. – V. 51. – P. 1165–1175.
25. Manufacturing of Ti–Al–Zr–Mo–V Alloy Components by Additive Methods / V. Semenchuk, A. Nikolaeva, et al. // Russian Physics Journal. – 2024. – N 66 (11). – P. 1180–1188.

УДК 669.018.45:621.78:538.945

ТВЕРДОСТЬ И МИКРОСТРУКТУРА СПЛАВОВ НИОБИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ ТАНТАЛОМ, ИТТРИЕМ, ГАФНИЕМ И ЦИРКОНИЕМ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА

К. В. ЗОЛОДУЕВ¹, М. В. КРАВЦОВА¹, А. С. ЦАПЛЕВА¹, канд. техн. наук, Н. В. КОНОВАЛОВА¹, К. О. БАЗАЛЕЕВА², канд. физ.-мат. наук, М. В. ЖЕЛЕЗНЫЙ², Ю. Ю. ПОНКРАТОВА²

¹ АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара (АО «ВНИИНМ»), 123098, Москва. E-mail: kvzoloduev@bochvar.ru

² ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы», 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. E-mail: bazaleeva-ko@rudn.ru

Поступила в редакцию 14.08.2025

После доработки 26.09.2025

Принята к публикации 1.10.2025

Представлены результаты исследования микроструктуры, твердости, фазового состава и кристаллического строения фаз сплавов ниобия, легированных танталом, гафнием, цирконием и иттрием, после термической обработки в диапазоне температур от 500 до

1200°C при длительности 1 ч. Изучены сплавы с различным химическим составом: Nb–7,5%Ta–1%Hf, Nb–7,5%Ta–1%Zr и Nb–7,5%Ta–0,2%Zr–0,003%Y. Полученные данные позволяют оптимизировать режимы термической обработки сплавов для достижения требуемых механических свойств, а также для улучшения технологичности производства сверхпроводящих материалов на основе Nb₃Sn.

Ключевые слова: ниобиевые сплавы, легирование, рекристаллизация, микроструктура, твердость, термообработка, сверхпроводник

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-92-101

Авторы благодарят Г. А. Захарову, А. В. Кузнецову, Д. А. Тарханову за помощь в подготовке образцов и обсуждении результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tarantini C., Balachandran S., Heald S. M., Lee P. J., Paudel N., Choi E. S., Larba-lestier D. C. Ta, Ti and Hf effects on Nb₃Sn high-field performance: temperature-dependent dopant occupancy and failure of Kramer extrapolation // Superconductor Science and Technology. – 2019. – V. 32 (12). – P. 124003.
2. Tarantini C., Sung Z. H., Lee P. J., Ghosh A. K., Larba-lestier D. C. Significant enhancement of compositional and superconducting homogeneity in Ti rather than Ta-doped Nb₃Sn // Applied Physics Letters. – 2016. – V. 108 (4).
3. Influence of Nb alloying on Nb recrystallization and the upper critical field of Nb₃Sn / N. Paudel et al. // Physical Review Materials. – 2024. – N 8 (8). – P. 084801.
4. Effect of the addition of Ta on microstructure and properties of Ti–Nb alloys / S. A. Souza et al. // Journal of alloys and compounds. – 2010. – V. 504, N 2. – P. 330–340.
5. Balachandran S., Tarantini C., Lee P. J., Kametani F., Su Y. F., Walker B., Larba-lestier D. C. Beneficial influence of Hf and Zr additions to Nb₄ at. % Ta on the vortex pinning of Nb₃Sn with and without an O source // Superconductor Science and Technology. – 2019. – V. 32 (4). – P. 044006.
6. The beneficial effect of yttrium microalloying in the solid solution treatment of AISI 321 stainless steel: Grain refinement and inclusions modification / J. B. Hu et al. // Materials Today Communications. – 2024. – N 38. – P. 108077.
7. Micro-alloying effects of yttrium on the microstructure and strength of silicon carbide joint brazed with chromium-silicon eutectic alloy / H. X. Li et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – V. 738. – P. 354–362.
8. Micro-alloying effects of yttrium on recrystallization behavior of an alumina-forming austenitic stainless steel / W. Zhao et al. // Journal of Iron and Steel Research International. – 2016. – V. 23, N 6. – P. 553–558.
9. Leaching behavior of copper, zinc and lead from contaminated soil with citric acid / H. Park et al. // Materials transactions. – 2013. – V. 54, N. 7. – P. 1220–1223.
10. The investigation of magneto-transport properties of PtSb₂ single crystal synthesized by Sb-flux method / K. Zhang et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – V. 694. – P. 935–938.
11. Effect of yttrium addition on grain growth of α-, β- and α+β-titanium alloys / B. Poorganji et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – V. 240, N 1. IOP Publishing.

12. Исследование влияния термической обработки на структуру и механические свойства полуфабрикатов из сплава NbTa (Zr, Hf, Y), предназначенных для изготовления Nb₃Sn сверхпроводников / Т. Ю. Соболева, Н. В. Коновалова, И. М. Абдюханов и др. // Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования. – 2024. – № 2. – С. 42–56.
13. ГОСТ 2999–75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – С. 30.
14. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1970. – 366 с.
15. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. Изд. 3-е. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
16. Бочвар А. А. Металловедение. Изд. 5-е. – М.: Металлургиздат, 1956. – 496 с.
17. Абдюханов И. М., Алиев Р. Т., Цаплева А. С., Алексеев М. В., Передкова Т. Н., Мареев К. А., Дробышев В. А., Кравцова М. В. Исследование структуры и механических свойств прутков из сплава Nb–Ta, предназначенных для изготовления Nb₃Sn-сверхпроводников // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2017. – № 4. – С. 24–31.
18. Абдюханов И. М., Савельев И. И., Цаплева А. С., Алексеев М. В., Дергунова Е. А., Дробышев В. А., Кравцова М. В., Потапенко М. М. Исследование влияния термической обработки на структуру и механические свойства полуфабрикатов из сплава Nb–1%Zr, предназначенных для изготовления Nb₃Sn сверхпроводников // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2019. – № 3. – С. 4–14.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 549.67:539.217.1

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЦЕОЛИТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Т. Р. ШАКИРОВ¹, А. Р. ВАЛЕЕВА², В. С. ДУТОВА², Е. М. ГОТЛИБ¹, д-р техн. наук

¹ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

(ФГБОУ ВО «КНИТУ»), Республика Татарстан, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68.

E-mail: office@kstu.ru, 19gkraikido99@mail.ru

² ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева (ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»), Республика Татарстан, 420111, Казань, ул. Карла Маркса, 10

Поступила в редакцию 10.07.2025

После доработки 11.08.2025

Принята к публикации 12.08.2025

Цеолиты представляют интерес как наполнители полимеров и строительных материалов, так как они обладают высокой термической, химической и механической

стойкостью. Кроме того, эти алюмосиликаты имеют развитую удельную поверхность с большим количеством активных центров. Мезопористая структура исследуемых нами цеолитов характеризуется относительно широким и мономодальным распределением пор по размерам с максимумом в диапазоне 10–14 нм, что свидетельствует о неоднородности мезопор этих алюмосиликатов. На основе анализа изотерм низкотемпературной адсорбции – десорбции азота установлено, что пористость вулканического цеолита растет с уменьшением размера его частиц. Общий объем пор в активированном цеолите практически в два раза больше, чем в вулканическом, независимо от размера их частиц. Это обусловлено различием их фазового состава, так как основным компонентом активированного цеолита является кальцит, а вулканического – клиноптилолит.

Ключевые слова: вулканические и активированные цеолиты, пористость, кривые сорбции – десорбции, петля гистерезиса, размер частиц

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-102-108

ЛИТЕРАТУРА

1. Zaharri N., Othman N. Optimization of Zeolite as Filler in Polypropylene Composite // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2009. – N 29 (14). – P. 2211–2226. DOI: 10.1177/0731684409347593
2. Nicoara A. I., Alecu A. E., Balaceanu G. C., Puscasu E. M., Vasile B. S., Trusca R. Fabrication and Characterization of Porous Diopside / Akermanite Ceramics with Prospective Tissue Engineering Applications // Materials. – 2023. – V. 16 (16). – P. 1–15. DOI: 10.3390/ma16165548
3. Панина А. А., Лыгина Т. З., Губайдуллина А. М., Николаев К. Г., Халитова А. Н. Исследование портландцемента с модифицированной цеолитсодержащей добавкой // Строит. мат. – 2013. – № 12. – С. 74–75.
4. Davydova M. L., Diakonov A. A., Sokolova M. D. The use of natural zeolite as a modifier of polymer blend based on butadiene – nitrile rubber and ultra-high molecular weight polyethylene // AIP Conf. Proc. – 2016. – V. 1785. – Art. 040072. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4967129>
5. Nasution H., Harahap H., Pandia S. M., Al Fath T. The effect of filler content on the properties of zeolite particle reinforced unsaturated polyester composites // AIP Conf. Proc. – 2020. – V. 2267. – Art. 020053. URL: <https://doi.org/10.1063/5.00156753rd>
6. Деев И. С., Железина Г. Ф., Лонский С. Л., Куршев Е. В. Особенности формирования микроструктуры полимерной матрицы в органопластике на основе многокомпонентного эпоксидного связующего // Труды ВИАМ. – 2019. – № 5. – С. 45–52.
7. Ondrušová D., Pajtášová M., Láliková S., Bazyláková T., Olšovský M. Study of zeolites as filler in the rubber compounds // Chemické Listy. – 2008. – N 102. – P. 733–740.
8. Thamzil L., Zamroni H. Penggunaan Zeolit dalam Bidang Industri dan Lingkungan // Jurnal Zeolit Indonesia. – 2010. – V. 1, N 1. – P. 60–67.
9. Терешкин И. П. Применение цеолитсодержащих пород для изготовления растворов на минеральных вяжущих // Альманах современной науки и образования. – 2013. – № 11 (78). – С. 102–105.
10. Ильина О. Н. Разработка конструкций дорожных одежд с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения // Вестник СибАДИ. – 2023. – Т. 20, № 6 (94). – С. 798–807. URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-798-807>

11. Kutarov V. V., Trasevich Y. I., Aksenenko E. V., Ivanova Z. G. Adsorption hysteresis for a slit-like pore model Russian journal of physical chemistry. – 2011. – V. 85, № 7. – P. 1222–1227.
12. Thommes M., Kaneko K., Neimark A. V., Olivier J. P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., et. al. // Physic sorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution // (IUPAC Technical Report) Pure Appl. Chem. – 2015. – V. 87 (9/10). – P. 1051–1069.
13. Морозова Л. В., Хамова Т. В., Полякова И. Г. Влияние прекурсора на получение и текстурные свойства мезопористых порошков γ - Al_2O_3 // Неорганические материалы. – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 371–377.
14. Гаврилова Н. Н., Назаров В. В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных. Учеб. пособие. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. – 132 с.
15. Sapchenko S. A., Barsukova M. O., Belosludov R. V., Kovalenko K. A., Samsonenko D. G., Poryvaev A. S., Sheveleva A. M., Fedin M. V., Bogomyakov A. S., Dybtsev D. N., Schröder M., Fedin V. P. Understanding Hysteresis in Carbon Dioxide Sorption in Porous Metal-Organic Frameworks // Inorg. Chem. – 2019. – V. 58, N 10. – P. 6811–6820. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.9b0001
16. Mamytbekov G. K., Zheltov D. A., Milts O. S., Nurtazin Y. R. Polymer – Zeolite Composites: Synthesis, Characterization and Application Colloids Interfaces. – 2024. – V 8(1). – N 8. URL: <https://doi.org/10.3390/colloids8010008>
17. Хлуднева А. С., Карпов С. И., Ресснер Ф., Селеменев В. Ф. Структура и сорбционные свойства мезопористых кремнеземов, синтезированных при варьировании температуры и кремниевой основы // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2021. – Т. 21, № 5. – С. 669–680.

УДК 678.7:621.9.048.7:616–003.93

ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОЧАСТИЦ ПОЛИЛАКТИДА: ЗАВИСИМОСТЬ ОТ УВЛАЖНЕНИЯ

В. И. ЮСУПОВ¹, Е. Д. МИНАЕВА¹, канд. физ.-мат. наук, Т. Н. ПОПЫРИНА^{2, 3}, И. В. ЛУНЁВ^{2, 4},
Т. С. ДЕМИНА^{2, 3, 5}, Н. В. МИНАЕВ¹, канд. техн. наук

¹ *Институт фотонных технологий, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники,*

НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

E-mail: minaeva.e.d@bk.ru

² *ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4*

³ *ФГБУН «Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН»,*

Москва, 117393, Профсоюзная ул., 70

⁴ *ФГАОУ «Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ)», 115409, Москва,*

Каширское шоссе, 31

Поступила в редакцию 2.07.2025

После доработки 8.08.2025

Принята к публикации 4.09.2025

Методом поверхностно-селективного лазерного спекания изготовлены образцы из биосовместимых и биорезорбируемых микрочастиц полилактида с различным содержанием влаги: лиофилизированных, необработанных, с увлажненной поверхностью и с хитозановым гидрофильным покрытием. Исследована морфология поверхности полученных полимерных структур. Спекание проводилось лазером $\lambda = 1,96$ мкм при плотности энергии 6–22 Дж/см². При повышении плотности энергии увеличивается толщина слоев, повышается степень спекания и снижается пористость. Лучший результат для тканевой инженерии по стабильности показали микрочастицы с хитозановым покрытием, спеченные при плотности энергии 22 Дж/см².

Ключевые слова: лазерное спекание, поверхностно-селективное лазерное спекание, сенсibilизатор нагрева, полилактид, содержание воды

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-109-118

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт». В части синтеза хитозана и нанесения его на частицы из полилактида работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (номер темы FFSM-2025-0001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Langer R., Vacanti J. P. Tissue Engineering // Science. – 1993. – V. 260, N 5110. – P. 920–926.
2. Stratton S., Shelke N. B., Hoshino K., Rudraiah S., Kumbar S. G. Bioactive polymeric scaffolds for tissue engineering // Bioact. Mater. – 2016. – V. 1, N 2. – P. 93–108.
3. Sevastianov V. I. Technologies of tissue engineering and regenerative medicine // Russ. J. Transplantology Artif. Organs. – 2014. – N 3. – P. 93
4. Mani M. P., Sadia M., Jaganathan S. K., Khudzari A. Z., Supriyanto E., Saidin S., Ramakrishna S., Ismail A. F., Faudzi A. A. M. A review on 3D printing in tissue engineering applications // J. Polym. Eng. – 2022. – V. 42, N 3. – P. 243–265.
5. Li X., Lin Y., Liu M., Meng L., Li C. A review of research and application of polylactic acid composites // J. Appl. Polym. Sci. – 2023. – V. 140, N 7.
6. Jadhav A., Jadhav V.S. A review on 3D-printing: An additive manufacturing technology // Mater. Today Proc. – 2022. – V. 62. – P. 2094–2099.
7. Charoo N. A., Barakh Ali S. F., Mohamed E. M., Kuttolamadom M. A., Ozkan T., Khan M. A., Rahman Z. Selective laser sintering 3D printing – an overview of the technology and pharmaceutical applications // Drug Dev. Ind. Pharm. – 2020. – V. 46, N 6. – P. 869–877.
8. Пат. RU 150514U1: Установка для формирования биосовместимых структур / Баграташвили В., Антонов Е., Попов В., Юсупов В. Заявка 24.12.2013. Опубл. 20.02.2015.

9. Antonov E. N., Krotova L. I., Minaev N. V., Minaeva S. A., Mironov A. V., Popov V. K., Bagratashvili V.N. Surface-selective laser sintering of thermolabile polymer particles using water as heating sensitizer // *Quantum Electron.* – 2015. – V. 45, N 11. – P. 1023–1028.
10. Минаев Н. В., Антонов Е. Н., Минаева С. А., Чурбанов С. Н. Установка для исследования процессов поверхностно-селективного лазерного спекания порошковых биосовместимых материалов // *Приборы и техника эксперимента.* – 2019. – N 1. – P. 150–152.
11. Minaev N. V., Demina T. S., Minaeva S. A., Dulyasova A. A., Minaeva E. D., Gonchukov S. A., Akopova T. A., Timashev P. S. The Evolution of Surface-Selective Laser Sintering: Modifying and Forming 3D Structures for Tissue Engineering // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* – 2020. – V. 84, N 11. – P. 1315–1320.
12. Demina T. S., Frolova A. A., Istomin A. V., Kotova S. L., Piskarev M. S., Bardakova K. N., Yablokov M. Y., Altynov V. A., Kravets L. I., Gilman A. B., Akopova T. A., Timashev P. S. Coating of polylactide films by chitosan: Comparison of methods // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2020. – V. 137, N 3. – P. 48287.
13. Rogovina S. Z., Akopova T. A., Vikhoreva G. A. Investigation of properties of chitosan obtained by solid-phase and suspension methods // *J. Appl. Polym. Sci.* – 1998. – V. 70, N 5. – P. 927–933.
14. Demina T. S., Popyrina T. N., Minaeva E. D., Dulyasova A. A., Minaeva S. A., Tilkin R., Yusupov V. I., Grandfils C., Akopova T. A., Minaev N. V., Timashev P. S. Polylactide microparticles stabilized by chitosan graft-copolymer as building blocks for scaffold fabrication via surface-selective laser sintering // *J. Mater. Res. Springer International Publishing*, – 2022. – V. 37, N 4. – P. 933–942.
15. Goodridge R. D., Tuck C. J., Hague R. J. M. Laser sintering of polyamides and other polymers // *Prog. Mater. Sci.* – 2012. – V. 57, N 2. – P. 229–267.
16. Bradley D., Roth G. Adaptive Thresholding using the Integral Image // *J. Graph. Tools.* – 2007. – V. 12, N 2. – P. 13–21.
17. Padilla-Martinez J. P., Berrospe-Rodriguez C., Aguilar G., Ramirez-San-Juan J. C., Ramos-Garcia R. Optic cavitation with CW lasers: A review // *Phys. Fluids.* – 2014. – V. 26, N 12.
18. Юсупов В. Особенности лазероиндуцированной термокавитации воды // *Акустический журнал.* – 2024. – V. 70, N 6. – P. 828–837.
19. Минаева Е. Д., Минаев Н. В., Попырина Т. Н., Демина Т. С., Игнатьева Н. Ю., Захаркина О. Л., Юсупов В. И. О механизме лазерного спекания полимерных структур с использованием воды // *Оптика и спектроскопия.* – 2025. – Т. 133, № 10. – С. 1041–1044.
20. Antonov E. N., Dunaev A. G., Konovalov A. N., Minaeva S. A., Popov V. K. Temperature field distribution in polymer particles during surface-selective laser sintering // *Laser Phys.* – 2020. – V. 30, N 5. – P. 055601.

УДК 621.382.032.27:661.66'681

СТРУКТУРНЫЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕРОДНЫХ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ:

ОТБОР ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ

И. Ю. БОГУШ¹, канд. техн. наук, Н. К. ПЛУГОТАРЕНКО¹, канд. техн. наук,

Т. Н. МЯСОЕДОВА¹, канд. техн. наук, С.П. НОВИКОВ², канд.техн. наук,

¹ ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 347928, Таганрог, ул. Шевченко, 2.

E-mail: inlys@sfedu.ru

² ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,

344003, Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, 1

Поступила в редакцию 16.07.2025

После доработки 11.08.2025

Принята к публикации 14.08.2025

Представлен комплексный подход к отбору углеродных кремнийсодержащих электродов для использования их в составе суперконденсаторов. С привлечением методов спектроскопии комбинационного рассеяния света, теории функционала плотности и анализа пористости исследованы структурные характеристики материалов электродов, синтезированных методом электрохимического осаждения. Предложены подходы, основанные на выявленных взаимосвязях между структурными и функциональными характеристиками, позволяющие осуществлять первичный отбор электродов. Эффективность методики подтверждена сравнением функциональных характеристик отобранных электродов с имеющимися аналогами. Показано, что электроды, отобранные с помощью разработанной методики, превосходят аналоги по значениям емкости и ее сохранению при наименьшем времени разряда.

Ключевые слова: пористые электроды, углеродные кремнийсодержащие материалы, стабильность, методика отбора, суперконденсаторы

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-119-129

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FENW-2025-0003)

ЛИТЕРАТУРА

1. Conway B. E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications // Plenum Publishers. – 2013. – 698 p.
2. Sethuraman S., Suchakree T., Montree S. Influence of structures and functional groups of carbon on working potentials of supercapacitors in neutral aqueous electrolyte: In situ differential electrochemical mass spectrometry // Journal of Energy Storage. – 2020. – V. 29. – P. 101379.
3. In-situ fabricating MnO₂ and its derived FeOOH nanostructures on mesoporous carbon towards high-performance asymmetric supercapacitor / X. Chen, C. Jing, X. Fu et al. // Applied Surface Science. – 2020. – V. 503. – P. 144123.
4. Suss M. E., Baumann T. F., Worsley M. A., Rose K. A., Jaramillo T. F., Stadermann M., Santiago J. G. Impedance-based study of capacitive porous carbon electrodes with hierarchical and bimodal porosity // Journal of Power Sources. – 2013. – V. 241. – P. 266–273.
5. McLean A., Halper M., Ellenbogen J. Supercapacitors: A Brief Overview. – Virginia: MITRE Nanosystems Group, 2006. – 41 p.

6. Zhuang H., Yang N., Zhang L., Fuchs R., Jiang X. Electrochemical properties and applications of nanocrystalline, microcrystalline, and epitaxial cubic silicon carbide films // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2015. – V. 7 (20). – P. 10886–10895.
7. Вольфович Ю. М. Электрохимические суперконденсаторы (обзор) // *Электрохимия*. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 197–238.
8. Mesoporous manganese-selenide microflowers with enhanced electrochemical performance as a flexible symmetric 1.8 V supercapacitor / Muhammad Sufyan Javed, Syed Shoaib Ahmad Shah, Shahid Hussain et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – V. 382. – P. 122814.
9. Suárez L., Barranco V., Centeno T. A. Impact of carbon pores size on ionic liquid based-supercapacitor performance // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2021. – V. 588. – P. 705–712.
10. Li S. M., Yang K., Ya P., Ma K. R., Zhang Z., Huang Q. Three-dimensional Porous Carbon/Co₃O₄ Composites Derived from Graphene/Co–MoF for High Performance Supercapacitor Electrodes // *Appl. Surf. Sci.* – 2020. – V. 503. – P. 144090.
11. Noh J., Yoon C. M., Kim Y. K., Jang J. High Performance Asymmetric Supercapacitor Twisted from Carbon Fiber/MnO₂ and Carbon Fiber/MoO₃ // *Carbon*. – 2017. – V. 116. – P. 470–478.
12. Cai W. R., Kankala R. K., Xiao M. T., Zhang N., Zhang X. Q. Three-dimensional Hollow N-doped ZIF-8-derived Carbon@MnO₂ Composites for Supercapacitors // *Appl. Surf. Sci.* – 2020. – V. 528. – P. 146921.
13. Huang R., Zhou R. H., Wang L., Zhu Y. M. Dandelion-like CoO/Co₃O₄/Carbon Composites as Anode Materials for a High-Performance Lithium Ion Battery // *Chemistry Select*. – 2020. – V. 5. – P. 12932–12939.
14. Biological Cell Template Synthesis of Nitrogen-doped Porous Hollow Carbon Spheres/MnO₂ Composites for High-performance Asymmetric Supercapacitors / X. N. Wang, J. Zhan, X. Q. Sun et al. // *Electrochim. Acta*. – 2019. – V. 296. – P. 907–915.
15. Ming, H., Fei, I., Fan, D., Zhang Y.X., MnO₂-based nanostructures for high-performance supercapacitors // *J. Mater. Chem. A*. – 2015. – V. 3. – P. 21380–21423.
16. Композитные электроды электрохимических конденсаторов на основе углеродных материалов различной структуры / А. С. Соляникова и др. // *Электрохимия*. – 2014. – Т. 50, № 5. – С. 470–479.
17. Григорьев Ф. В., Сулимов В. Б., Тихонравов А. В. Молекулярно-динамическое моделирование напыления тонких материалов электродов, состоящих из слоев с чередующейся плотностью // *Журнал физической химии*. – 2020. – Т. 94, № 5. – С. 754–759.
18. Bertrand N., Sabatier J., Briat O., Vinassa J. Embedded Fractional Nonlinear Supercapacitor Model and Its Parametric Estimation Method // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2020. – V. 57. – P. 3991–4000.
19. Noya L., Tanaka T., Watanabe H., Shitanda I., Itagaki M. Electrochemical impedance simulation of porous electrodes with variously shaped pores using 3-dimensional finite element method // *Electrochimica Acta*. – 2023. – V. 440. – P. 141723.
20. Plugotarenko N. K., Myasoedova T. N., Bogush I. Yu. The effect of the electrolyte concentration on the charge transfer at the electrolyte/silicon-carbon interface: Electrochemical

impedance spectrometry study // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2021. – V. 135. – Art. 106121.

21. Myasoedova T. N., Mikhailova T. S., Grigoryev M. N. Effect of nickel and manganese doping on the structure, morphology and the electrochemical performance of the silicon-carbon film // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – V. 855. – P. 157504.

22. Григорьев М. Н., Михайлова Т. С., Мясоедова Т. Н. Получение углеродных кремнийсодержащих электродов на электропроводящей и диэлектрической подложках методом электрохимического осаждения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 7 (201). – С. 56–66.

23. Bogush I. Yu., Plugotarenko N. K., Myasoedova T. N. Study of Functional Characteristics of Mesoporous Electrodes of Supercapacitors Based on Silicon–Carbon Films // Technical Physics. – 2024. – V. 69, N 4. – P. 800–811. DOI: 10.1134/S1063784224030034

24. Богуш И. Ю., Плуготаренко Н. К. Исследование характеристик электродов супер-конденсаторов на основе легированных кремний-углеродных пленок // Изв. Российской академии наук. Серия физическая. – 2023. – Т. 87, № 6. – С. 833–837. DOI: 10.31857/S0367676523701442.

25. Bogush I. Yu., Plugotarenko N. K., Myasoedova T. N., Ptashnik V. V. Physico-chemical properties of silicon-carbon films obtained by electrochemical deposition // Letters on Materials. – 2023. – V. 13, N 1 (49). – P. 39–44. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-1-39-44.

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК [669.71+678.067.5]:620.178.7

ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ СЛОИСТЫХ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКОВ К УДАРНЫМ НАГРУЗКАМ

В. В. АНТИПОВ¹, д-р техн. наук, М. С. ОГЛОДКОВ², канд. техн. наук,

А. А. СЕЛИВАНОВ², канд. техн. наук, С. В. САМОХВАЛОВ², Ю. Н. НЕФЕДОВА².

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49. E-mail: mail@crism.ru

² НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17. E-mail: org80@viam.ru

Поступила в редакцию 8.08.2025

После доработки 29.10.2025

Принята к публикации 30.10.2025

Приведены результаты испытаний слоистых алюмокомпозитов на стойкость к ударным нагрузкам. Рассмотрены методики сравнительных испытаний на удар, приведена оценка сопротивления удару различных композиций слоистых алюмокомпозитов марки СИАЛ, изучено влияние ряда структурных факторов на сопротивление удару с микроанализом характера разрушения. Проведенные исследования позволили определить критерии оценки поведения алюмокомпозитов при ударных воздействиях, а именно: энергии удара при повреждениях различной степени, остаточной прочности, механических свойств, характера повреждений и вида изломов при микроструктурном анализе.

Ключевые слова: СИАЛ, ударостойкость, алюмостеклопластик, GLARE, микроструктура, ударные повреждения

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-130-142

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 6.2. «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Roebroeks G. GLARE features // Fibre Metal Laminates / Vlot, A., Gunnink, J.W. (eds) – Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2001. – P. 23–37.
2. Zerong D., Wang H., Luo J., Li N. A review on forming technologies of fiber metal laminates // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2021. – N 4. – P. 110–126.
3. Trzepieciński T., Najm S. M., Sbayti M., Belhadjsalah H., Szpunar M., Lemu H. G. New advances and future possibilities in forming technology of hybrid metal–polymer composites used in aerospace applications // Journal of Composites Science. – 2021. – V. 5, N 8. – Art. N 217.
4. Hagenbeek M. Impact properties // Fibre Metal Laminates / Vlot, A., Gunnink, J.W. (eds.) – Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2001. – P. 409–426.
5. Vlot A., Vogelesang L. B., De Vries T. J. Towards application of fibre metal laminates in large aircraft // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 1999. – V. 71, N 6. – P. 558–570.
6. Антипов В. В., Серебренникова Н. Ю., Шестов В. В., Сидельников В. В. Слоистые гибридные материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 212–224. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-212-224
7. Зиченков М. Ч., Шаныгин А. Н. Гибридные авиаконструкции нового поколения для перспективных гражданских самолетов // Полет. – 2018. – № 11. – С. 106–114.
8. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1. – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
9. Подживотов Н. Ю., Каблов Е. Н., Антипов В. В., Ерасов В. С., Серебренникова Н. Ю., Абдуллин М. Р., Лимонин М. В. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов // Перспективные материалы. – 2016. – № 10. – С. 5–19.
10. Фридляндер И. Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 7. – С. 24–29.
11. Дуюнова В. А., Нечайкина Т. А., Оглодков М. С., Яковлев А. Л., Леонов А. А. Перспективные разработки в области легких материалов для современной авиакосмической техники // Технология легких сплавов. – 2018. – № 4. – С. 28–43.
12. Антипов В. В., Зайцев М. Д., Родченко Т. С., Стойда Ю. М., Серебренникова Н. Ю., Сидельников В. В. Исследование долговечности конструктивно-подобного образца панели фюзеляжа с обшивкой из алюмостеклопластика // Деформация и разрушение материалов. – 2021. – № 3. – С. 18–24.

13. Impact Behaviour of CIAЛ (Glass/Epoxi-Aluminum) Laminates / V. V. Sidelnikov, L. I. Anihov-skaya, O. G. Senatorova, A. B. Lyamin, et. al. // Proceedings of the 7th International Conference ICAA7, held in Charlottesville, Virginia, April 9–14, 2000. – P. 1221–1224.
14. Фридляндер И. Н., Чуистов К. В., Березина А. Л., Колобнев Н. И. Алюминий-литиевые сплавы, структура и свойства. – Киев: Наукова думка, 1992. – 192 с.
15. Лавров А. В., Ерасов В. С., Подживотов Н. Ю., Автаев В. В. Оптимизация структуры гибридных композиционных материалов авиационного назначения // Труды ВИАМ. – 2016. – № 11 (47). – С. 56–62. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 03.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-7-7
16. Каблов Е. Н., Минаков В. Т., Аниховская Л. И. Клеи и материалы на их основе для ремонта конструкций авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. – 2002. – № 1. – С. 61–65.
17. Дементьева Л. А., Сереженков А. А., Бочарова Л. И., Аниховская Л. И., Лукина Н. Ф. Композиционные материалы клеевые на основе стеклянных и углеродных наполнителей // Клеи. Герметики. Технологии. – 2009. – № 1. – С. 24–27.
18. Дементьева Л. А., Сереженков А. А., Бочарова Л. И., Лукина Н. Ф., Куцевич К. Е., Петрова А. П. Свойства композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2012. – № 6. – С. 19–24.
19. Донецкий К. И., Быстрикова Д. В., Караваев Р. Ю., Тимошков П. Н. Полимерные композиционные материалы для создания элементов трансмиссий авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 3. – С. 82–93. URL: <http://www.viam-works.ru> (обзор 03.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93
20. Серпова В. М., Сидоров Д. В., Няфкин А. Н., Курбаткина Е. И. Гибридные металлические композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2021. – № 3. – С. 68–77. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 05.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-68-77
21. Славин А. В., Силкин А. Н., Гриневич Д. В., Яковлев Н. О. Композиционные материалы с объемно-армированной структурой (обзор) // Труды ВИАМ. – 2022. – № 8. – С. 113–122. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 05.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122
22. Ерасов В. С., Сибяев И. Г., Сутубалов А. И. Испытания образцов из композиционных материалов на растяжение // Труды ВИАМ. – 2023. – № 12. – С. 98–114. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-98-114
23. Оглодков М. С., Романенко В. А., Бенариев И., Рудченко А. С., Григорьев М. В. Исследование промышленных полуфабрикатов из перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. – 2023. – № 3. – С. 62–77. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 10.19.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-62-77
24. Артемьев Ю. Г. К новой классификации динамических методов контроля твердости // Заводская лаборатория. – 1996. – Т. 62, № 6. – С. 48–52.

УДК 678.7:621.777.4

© 2025

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ДИСПЕРСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В КОМПОЗИТЕ НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА НА СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

И. С. ЛАРИОНОВ^{1,2}, Д. А. БАЛЬКАЕВ¹, канд. техн. наук, К. С. ЗИМИН^{1,2},
И. С. АНТИПИН¹, д-р хим. наук, Л. М. АМИРОВА², д-р хим. наук, В. В. ВОЛКОВ³

¹ ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Республика Татарстан, Казань, Кремлевская ул., 18. E-mail: larionov_igor1999@mail.ru

² ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева» (КАИ), 420111, Казань, Республика Татарстан, ул. Карла Маркса, 10

³ ФГБУН «Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева РАН»
119991, Москва, Ленинский проспект, 29, стр. 5

Поступила в редакцию 2.07.2025

После доработки 4.08.2025

Принята к публикации 7.08.2025

Полифениленсульфид (ПФС) находит все большее распространение благодаря своим уникальным физико-химическим и термическим свойствам в совокупности с невысокой стоимостью и возможностью применения в 3D-печати. Создание композиций на основе ПФС это хороший способ получить высокий уровень свойств напечатанных изделий. В настоящей работе были получены филаменты на основе ПФС и изучены свойства напечатанных ими изделий. Методом экструзии были получены филаменты десяти разных составов, содержащие стекловолокно, кварцевую муку или их комбинации. Филаментами напечатаны образцы для испытаний на растяжение, ударную вязкость по Изоду без надреза и температуру изгиба под нагрузкой. На основании результатов испытаний выбрана наиболее оптимальная рецептура филамента, а также проанализированы свойства филаментов других составов.

Ключевые слова: полифениленсульфид, стекловолокно, кварцевая мука, FDM-печать, композит, филамент, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-143-153

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант номер 24-63-00026), URL: <https://www.rscf.ru/en>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rahate A. S., Nemade K. R., Waghuley S. A. Polyphenylene sulfide (PPS): state of the art and applications // Reviews in Chemical Engineering. – 2013. – V. 29, N 6. – P. 471–489.
2. Zuo P., Tcharkhtchi A., Shirinbayan M., Fitoussi J., Bakir F. Overall investigation of poly(phenylene sulfide) from synthesis and process to applications – a review // Macromolecular Materials and Engineering. – 2019. – V. 304, N 5. – P. 1800686.
3. Chen G., Mohanty A. K., Misra M. Progress in research and applications of polyphenylene sulfide blends and composites with carbons // Composites Part B: Engineering. – 2021. – V. 209. – P. 108553.
4. Zhao L., Yu Y., Huang H., Yin X., Peng J., Sun J., Huang L., Tang Y., Wang L. High-performance polyphenylene sulfide composites with ultra-high content of glass fiber fabrics // Composites Part B: Engineering. – 2019. – V. 174. – P. 106790.

5. Stoeffler K., Andjelic S., Legros N., Roberge J., Schougaard S. B. Polyphenylene sulfide (PPS) composites reinforced with recycled carbon fiber // *Composites Science and Technology*. – 2013. – V. 84. – P. 65–71.
6. Wu D., Wu L., Zhou W., Yang T., Zhang M. Study on physical properties of multiwalled carbon nanotube/poly(phenylene sulfide) composites // *Polymer Engineering & Science*. – 2009. – T. 49, N 9. – P. 1727–1735.
7. Zhai H., Zhou X., Fang L., Lu A. Study on mechanical properties of powder impregnated glass fiber reinforced poly(phenylene sulphide) by injection molding at various temperatures // *Journal of applied poly-mer science*. – 2010. – V. 115, N 4. – P. 2019–2027.
8. Manjunath A., Manjushree H., Nagaraja K., Pranesh K. Role of E-glass fiber on mechanical, thermal and electrical properties of polyphenylene sulfide (PPS) composites // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – V. 62. – P. 5439–5443.
9. El Magri A., Vaudreuil S., El Mabrouk K., Touhami M. E. Printing temperature effects on the structural and mechanical performances of 3D-printed Poly-(phenylene sulfide) material // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – V. 783. – IOP Publishing. – P. 012001.
10. Pan S., Shen H., Zhang L. Effect of carbon nanotube on thermal, tribological and mechanical proper-ties of 3D-printing polyphenylene sulfide // *Additive Manufacturing*. – 2021. – V. 47. – P. 102247.
11. Verdejo de Toro E., Coello Sobrino J., Martínez Martínez A., Miguel Eguía V., Ayllón Pérez J. Investigation of a short carbon fibre-reinforced polyamide and comparison of two manufacturing processes: Fused Deposition Modelling (FDM) and polymer injection moulding (PIM) // *Materials*. – 2020. – V. 13, N 3. – P. 672.
12. Doshi M., Mahale A., Singh S. K., Deshmukh S. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D-printed Parts: Perspective and prospects // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – V. 50. – P. 2269–2275.
13. Ismail K. I., Yap T. C., Ahmed R. 3D-printed fiber-reinforced polymer composites by fused depo-sition modelling (FDM): fiber length and fiber implementation techniques // *Polymers*. – 2022. – V. 14, N 21. – P. 4659.
14. Thomas S. P. Interaction of silica with polystyrene: mechanical properties, polymer/filler adhesion and failure behavior // *Chimica Techno Acta*. – 2024. – V. 11, N 1. – P. 202411105.
15. Seki Y., Kizilkan E., Leskeri B. M., Sarikanat M., Altay L., Isbilir A. Comparison of the Thermal and Mechanical Properties of Poly (phenylene sulfide) and Poly (phenylene sulfide)–Syndiotactic Polystyrene-Based Thermal Conductive Composites // *ACS omega*. – 2022. – V. 7, N 49. – P. 45518–45526.
16. Wu Y., Liu Q., Heng Z., Zou H., Chen Y., Liang M. Improved mechanical properties of graphene oxide/short carbon fiber–polyphenylene sulfide composites // *Polymer Composites*. – 2019. – V. 40, N 10. – P. 3866–3876.
17. Kariz M., Sernek M., Obućina M., Kuzman M. K. Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts // *Materials Today Communications*. – 2018. – V. 14. – P. 135–140.

18. Wang P., Zou B., Ding S., Huang C., Shi Z., Ma Y., Yao P. Preparation of short CF/GF reinforced PEEK composite filaments and their comprehensive properties evaluation for FDM-3D printing // *Composites Part B: Engineering*. – 2020. – V. 198. – P. 108175.
19. Zuo P., Fitoussi J., Shirinbayan M., Bakir F., Tcharkhtchi A. Thermal aging effects on overall mechanical behavior of short glass fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites // *Polymer Engineering & Science*. – 2019. – V. 59, N 4. – P. 765–772.
20. Kenny J. M., Maffezzoli A. Crystallization kinetics of poly (phenylene sulfide) (PPS) and PPS/carbon fiber composites // *Polymer Engineering & Science*. – 1991. – V. 31, N 8. – P. 607–614.
21. Luo G., Li W., Liang W., Liu G., Ma Y., Niu Y., Li G. Coupling effects of glass fiber treatment and matrix modification on the interfacial microstructures and the enhanced mechanical properties of glass fiber/polypropylene composites // *Composites Part B: Engineering*. – 2017. – V. 111. – P. 190–199.
22. Oshima S., Higuchi R., Kato M., Minakuchi S., Yokozeki T., Aoki T. Cooling rate-dependent mechanical properties of polyphenylene sulfide (PPS) and carbon fiber reinforced PPS (CF/PPS) // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2023. – V. 164. – P. 107250.
23. Zhuang Y., Zou B., Ding S., Wang P. Shear and tensile behaviors of fiber-reinforced resin matrix composites printed by the FDM technology // *Coatings*. – 2022. – V. 12, N 7. – P. 1000.
24. Garmabi M. M., Shahi P., Tjong J., Sain M. 3D printing of polyphenylene sulfide for functional lightweight automotive component manufacturing through enhancing interlayer bonding // *Additive Manufacturing*. – 2022. – V. 56. – P. 102780.
25. Bahadur S., Sunkara C. Effect of transfer film structure, composition and bonding on the tribological behavior of polyphenylene sulfide filled with nano particles of TiO₂, ZnO, CuO and SiC // *Wear*. – 2005. – V. 258, N 9. – P. 1411–1421.

УДК 678.7:678.073:539.434

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТИМОСТИ СУПЕРКОНСТРУКЦИОННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ С АППРЕТАМИ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДОКИСЛОТ

К. С. ЕВДОКИМОВА¹, Д. С. АЛЕКСАНДРОВА¹, канд. хим. наук, А. С. ЕГОРОВ¹, Н. Д. ХРАМОВ¹, А. Л. АНДРЕИЧЕВ², А. А. ВЕВЕРИС², А. А. ДЕЛИБАЛТ², П. И. НЕЧАЕВА², А. Г. КУЛЁВА², А. А. ЦЫПАКИН², Е. А. КАПАЕВА¹

¹ *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

² *НИЦ Композитный дивизион госкорпорации «Росатом», 125167, Москва, Волгоградский пр., д. 5, корп. 13. E-mail: gudeeva@irea.org.ru*

Поступила в редакцию 17.09.2025

После доработки 6.10.2025

Принята к публикации 10.10.2025

Исследована совместимость аппретирующих композиций на основе полиамидокислот различного строения с суперконструкционными полимерами: полифениленсульфидом (ПФС) и полисульфоном (ПСФ). Адгезионная прочность в композитах на основе аппретированного волокна и ПФС, аппретированного волокна и ПСФ была определена экспериментально при помощи метода pull-out (вытягивание волокна из блока матрицы). Результаты испытаний показали, что экспериментальные образцы сопоставимы по прочности с композитами, полученными на основе волокна, обработанного коммерчески доступными аппретирующими составами. Максимальное значение адгезионной (межфазной) прочности при сдвиге (IFSS) составило 103,8 МПа для матрицы ПФС и 87,6 МПа для матрицы ПСФ.

Ключевые слова: углеродное волокно, аппретирующие композиции, полифениленсульфид, полисульфон, суперконструкционные термопласты, композиты на основе непрерывного углеродного волокна

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-154-165

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производстве» (согласно Соглашению о предоставлении из федерального бюджета субсидий, в том числе грантов в форме субсидий, юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, а также физическим лицам от 27.02.2025 г. № 075-11-2025-008).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kemmish D. J. Practical guide to high performance engineering plastics. – Smithers Rapra, 2011.
2. Morikawa A. High performance polymers and engineering plastics // Synthesis and characterization of novel polyimides. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – P. 205–242.
3. Sustainable Biopolymer Composites: Biocompatibility, Self-Healing, Modeling, Repair and Recycl-ability / D. Verma et al. (ed.). – Woodhead Publishing, 2021.
4. Simões S. High-performance advanced composites in multifunctional material design: State of the art, challenges, and future directions // Materials. – 2024. – V. 17, N. 23. –P. 5997.
5. Composite material recycling technology–state-of-the-art and sustainable development for the 2020s / A. E. Krauklis et al. // Journal of Composites Science. – 2021. – V. 5, N. 1. – P. 28.
6. Oladele I. O., Omotosho T. F., Adediran A. A. Polymer-based composites: an indispensable material for present and future applications // International Journal of Polymer Science. – 2020. – V. 2020, N. 1. – P. 8834518.
7. Ибатуллина, А. Р., Сергеева Е. А. Обзор современных методов регулирования свойств композиционных материалов (КМ) на основе термореактивных наполнителей, армированных высокопрочными высокомодульными волокнами // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 9, Т. 16. – С. 123–126.
8. Estimation of Polymer–Surface Interfacial Interaction Strength by a Contact AFM Technique / H. Dvir et al. // Journal of Colloid and Interface Science. – 2006. – V. 304. – P. 58–64.

9. Beaumont P. W. R., Soutis C., Hodzic A. The structural integrity of carbon fiber composites: fifty years of progress and achievement of the science, development, and applications. – Springer, 2016. – 969 p.
10. Tang S., Hu C. Design, Preparation and Properties of Carbon Fiber Reinforced Ultra-High Temperature Ceramic Composites for Aerospace Applications: A Review // Journal of Materials Science & Technology. – 2017. – V. 33, N 2. – P. 117. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.08.004
11. Das T. K., Ghosh P., Das N. Ch. Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review // Adv. Compos. Hybrid Mater. – 2019. – V. 2, N 2. – P. 214. DOI: 10.1007/s42114-018-0072-z
12. Патент № 102978936 KHP, D06M 15/55, D06M 13/252, C08L 81/02, C08K 9/04, C08K 7/06, C08J 5/06, D06M 101/40. Sizing agent for emulsion-type carbon fiber, preparation method and usage thereof: 2012104945542/ / L. Zhen, S. Wei, C. Tongmin, H. Xianbo, H. Youping, X. Huaiyu. – Заявл. 27.11.2012, опубл. 20.03.2013; заявитель Kingfa Science and Technology Co Ltd, Shanghai Kingfa Science and Technology Co Ltd. – 8 с.
13. Патент № 4374875 США, C08F283/06, C09D151/08. Water-borne thermoplastic polyhydroxyether compositions: 6333893 / You-Ling Fan. – Заявл. 23.12.1981, опубл. 22.02.1983; заявитель InChem. Corp, Union Carbide Corp. – 6 с.
14. Патент № 4638038 США, G11B5/7027, C08G65/48, C09D171/00, G11B5/7023, Y10S525/93. Carboxylic acid-grafted phenoxy resins: 725535 / Salensky G. A. – Заявл. 22.04.1985, опубл. 20.01.1987; заявитель InChem Corp, Union Carbide Corp. – 9 с.
15. Патент № 4711817 США, C08G65/48, C09D171/00, G11B5/7023, Y10T428/31529. Carboxylic acid-grafted phenoxy resins: 6914795 / G. A. Salensky. – Заявл. 02.10.1986; опубл. 08.12.1987; заявитель InChem Corp, Union Carbide Corp. – 9 с.
16. Ucpinar B., Aytac A. Influence of different surface-coated carbon fibers on the properties of the poly (phenylene sulfide) composites // Journal of Composite Materials. – 2019. – V. 53, N 8. – P. 1123–1132. DOI: 10.1177/0021998318796159
17. Interfacial enhancement of CF/PEEK composites by modifying water-based PEEK-NH₂ sizing agent / T. Yan et al. // Composites Part B: Engineering. – 2020. – V. 199. – P. 108258. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108258.
18. Preparation of aqueous dispersion of thermoplastic sizing agent for carbon fiber by emulsion/solvent evaporation / I. Giraud et al. // Applied Surface Science. – 2013. – V. 266. – P. 94–99. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.11.098.
19. Crevecœur G., Groeninckx G. Binary blends of poly (ether ether ketone) and poly (ether imide): Miscibility, crystallization behavior and semicrystalline morphology // Macromolecules. – 1991. – V. 24, N 5. – P. 1190–1195. DOI: 10.1021/ma00005a034.
20. Shibata M., Fang Z., Yosomiya R. Miscibility and crystallization behavior of poly (ether ether ketone ketone)/poly (ether imide) blends // Journal of applied Polymer science. – 2001. – V. 80, N 5. – P. 769–775.
21. A water-soluble PAAs sizing agent for enhancing interfacial adhesion of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide composites (CF/PPS) / R. Fan et al. // Journal of Macromolecular Science, Part A. – 2023. – V. 60, N 1. – P. 29–37.

22. Chuang S. L., Chu N. J., Whang W. T. Effect of polyamic acids on interfacial shear strength in carbon fiber/aromatic thermoplastics // Journal of Applied Polymer Science. – 1990. – V. 41, N 1–2. – P. 373–382.
23. Fabrication of PEEK/carbon fibre composites by aqueous suspension prepregging / A. Texier et al. // Polymer. – 1993. – V. 34, N 4. – P. 896–906.
24. Cogswell F. N. Thermoplastic aromatic polymer composites: a study of the structure, processing and properties of carbon fibre reinforced polyetheretherketone and related materials. – Elsevier, 2013.
25. Three specimen geometries and three methods of data evaluation in single-fiber pullout tests / S. Zhandarov et al. // Mechanics of Composite Materials. – 2019. – V. 55, N. 1. – P. 69–84.
26. Influence of sizing molecular weight on the properties of carbon fibers and its composites / R. L. Zhang et al. // Materials & Design. – 2012. – V. 34. – P. 649–654.
27. ГОСТ 24642–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 45 с.

УДК 678:537.31:620.172

ВЛИЯНИЕ СВЕРХЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

Е. А. ДРОЗДОВА, Е. А. РОГАЧЕВ, канд. техн. наук, О. В. КРОПОТИН, д-р техн. наук
ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», 644050, Омск,
пр. Мира, 11. E-mail: kropotin@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.2025

После доработки 14.07.2025

Принята к публикации 16.07.2025

Исследовано влияние сверхэлектропроводного технического углерода СН1000 на структуру и свойства полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена высокой плотности HD 03490 PE. Выявлено два типа структуры, определяющие свойства композитов. Первый тип формируется в малонаполненном композите: наполнитель образует слабопроводящую сеть и в то же время армирует композиты, повышая их жесткость. Второй тип формируется при повышенном содержании наполнителя: образуются электропроводящие армирующие композит цепочки из контактирующих между собой частиц наполнителя. Критическая концентрация наполнителя в композите, определяющая переход от первого типа структуры ко второму, соответствует 8–10 мас.% технического углерода.

Ключевые слова: электропроводные полимерные композиты, технический углерод, полиэтилен высокой плотности, электропроводность, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-166-175

Авторы выражают благодарность компаниям ООО «СИБУР» и ООО «Омск Карбон Групп» за предоставленные образцы для проведения исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen L., Zhang J. Designs of conductive polymer composites with exceptional reproducibility of positive temperature coefficient effect: A review // Journal of applied polymer science. – 2021. – V. 138. – P. 49677. URL: <https://doi.org/10.1002/app.49677>
2. Liu Y., Zhang H., Porwal H., Busfield J. JC, Peijs T., Bilotti E. Pyroresistivity in conductive polymer composites: a perspective on recent advances and new applications // Polymer international. – 2018. – V. 68 (3) – P. 299–305. DOI: 10.1002/pi.5735
3. Mamunya, Y., Maruzhenko O., Kolisnyk R., Iurzhenko M., Pylypenko A., Masiuchok O., Godzierz M., Krivtsun I., Trzebicka B., Pruvost S. Pyroresistive properties of composites based on HDPE and carbon fillers // Polymers. – 2023. – V. 15. – P. 2105. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15092105>
4. Pang H., Xu L., Yan D.-X., Li Z.-M. Conductive polymer composites with segregated structures // Progress in polymer science. – 2014. – V. 39(11) – P. 1908–1933. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2014.07.007
5. Paszkiewicz S., Pypeć K., Irska I., Piesowicz E. Functional polymer hybrid nanocomposites based on polyolefins: A Review // Processes. – 2020. – V. 8. – P. 1475. DOI: 10.3390/pr8111475
6. Setnescu R., Lungulescu E.-M., Marinescu V. E. Polymer composites with self-regulating temperature behavior: properties and characterization // Materials. – 2023. – V. 16. – P. 157. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16010157>
7. Silva L. N., Dos Anjos E. G. R., Morgado G. F. M., Marini J., Backes E. H., Montagna L. S., Passador F. R. Development of antistatic packaging of polyamide 6/linear low-density polyethylene blends-based carbon black composites // Polymer Bulletin. – 2020. – V. 77. – P. 3389–3409. URL: <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02928-3>
8. Carbon black: science and technology / Donnet J.-B. (ed.). – New York: CRC Press, Marcel Dekker, 1993. – 460 p.
9. Vidakis N., Petousis M., Michailidis N., Mountakis N., Argyros A., Spiridaki M., Moutsopoulou A., Papadakis V., Charitidis C. High-density polyethylene / carbon black composites in material extrusion additive manufacturing: conductivity, thermal, rheological, and mechanical responses // Polymers. – 2023. – V. 15. – P. 4717. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15244717>
10. Аллахвердиева Х.В., Кахраманов Н.Т., Дадашева Э.В. Электропроводящие нанокомпозиты на основе полиэтилена высокой плотности и различных типов углеродсодержащих наполнителей // Пластические массы. – 2023. – № 5–6. – С. 53–56. URL: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-5-6-53-56>
11. Борукаев Т. А., Гаев Д. С. Физико-механические свойства композитов на основе полиэтилена высокой плотности и технического углерода // Прикладная физика. – 2017. – № 5. – С. 76–81.
12. Марков А. В., Марков В. А., Чижов А. С. Влияние характеристик полиэтилена на термоэлектрические свойства полиэтиленовых композитов с техническим углеродом //

Пластические массы. – 2021. – № 5–6. – С. 18–23. URL: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-5-6-18-23>

13. Рагушина М. Д., Евсеева К. А., Калугина Е. В., Ушакова О. Б. Полимерные композиционные материалы с антистатическими и электропроводящими свойствами // Пластические массы. – 2021. – №3–4. – С. 6–9. URL: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-3-4-6-9>

14. Раздьяконова Г. И., Лихолобов В. А., Кохановская О. А. Технологии модификации технического углерода. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. – 160 с.

15. Кропотин О. В., Рогачев Е. А., Дроздова Е. А., Каленчук А. А., Глуховеря Е. Г. Зависимость электрического сопротивления от параметров кристаллической структуры и физико-химических характеристик технического углерода // Ползуновский вестник. – 2024. – № 3. – С. 228–233. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.033

16. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Пер. с англ. П. Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1978. – 312 с.

17. Li J. X., Silverstein M., Hiltner A., Baer E. The ductile-to-quasi-brittle transition of particulate-filled thermoplastic polyester // Journal of applied polymer science. – 1994. – V. 52. – P. 255–267. URL: <https://doi.org/10.1002/app.1994.070520212>

18. Перепечко И. И. Введение в физику полимеров. – М.: Химия, 1978. – 312 с.

19. Kropotin O. V., Rogachev E. A., Kalenchuk A. A. Influence of carbon black on the elastic modulus of composite materials based on linear low density polyethylene at various structural levels // Mechanics of composite materials. – 2025. – V. 61. – P. 67–78. DOI: 10.1007/s11029-025-10262-1

УДК 539.4:551.58

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ БАЗАЛЬНОПЛАСТИКОВ ДЛЯ ОБУСТРОЙСТВА СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Б. С. ЕРМАКОВ¹, д-р техн. наук, Д. В. НЕЧАЕВ¹, О. В. ШВЕЦОВ¹, канд. техн. наук, С. А. ВОЛОГЖАНИНА², д-р техн. наук

¹ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29.

E-mail: ermakov55@bk.ru

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2

Поступила в редакцию 17.06.2025

После доработки 1.07.2025

Принята к публикации 4.07.2025

Строительные конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ) уже нашли свое применение в строящихся объектах в зоне умеренного климата и все чаще используются при строительстве зданий и сооружений в зонах многолетнемерзлых грунтов (ММГ) Канады, США и ряда других стран. Однако почти полностью отсутствует информация о сохраняемости структуры и свойств ПКМ в условиях экстремально низких температур,

высокой агрессивности внешней среды и добываемых продуктов. В Российской Федерации отсутствует нормативно-техническая документация по условиям применения ПКМ в зоне холодного климата, что не позволяет рекомендовать ПКМ при обустройстве нефтегазовых месторождений в зоне ММГ. В настоящей работе приведены результаты комплексных исследований по оценке деградации структуры и свойств базальтопластиков и изделий из них в условиях Арктического и Субарктического регионов РФ и по разработке справочной базы данных о свойствах ПКМ при длительной эксплуатации в условиях холодного климата.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, деградация материала, ресурс материала, климатические испытания, климатические факторы старения, базальтопластики

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-176-187

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSEG–2024–0009 «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвиненко В. С., Петров Е. И., Василевская Д. В., Яковенко А. В., Наумов И. А., Ратников М. А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100
2. Buslaev G., Tsvetkov P., Lavrik A., Kunshin A., Loseva E., Sidorov D. Ensuring the Sustainability of Arctic Industrial Facilities under Conditions of Global Climate Change // Resources. – 2021. – N 10. – P. 128. DOI: 10.3390/resources10120128
3. Жданеев О. В. Обеспечение технологического суверенитета отраслей ТЭК Российской Федерации // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 1061–1078. DOI: 10.31897/PMI.2022.107
4. Shammazov I. A., Batyrov A. M., Sidorkin D. I. Study of the Effect of Cutting Frozen Soils on the Supports of Above-Ground Trunk Pipelines // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – N 13. – P. 1–19. DOI: 10.3390/app13053139
5. Череповицын А. Е., Цветков П. С., Евсеева О. О. Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических нефтегазовых проектов // Записки Горного института. – 2021. – V. 249. – P. 463–478. URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.15>
6. Бояринцев А. В. Композитная противопучинная свая // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. – 2021. – С. 67–70. DOI: 10.7868/9785604610848015
7. Власенко Ф. С., Раскутин А. Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях // Труды ВИАМ. – 2013. – № 8. – С. 3. EDN: RAEFMB
8. Францев М. Э. Определение целесообразности использования армирующих материалов на основе базальтового волокна при создании отечественных судов из композитов // Транспортные системы. – 2018. – № 1. – С. 15–24. DOI: 10.46960/62045_2018_1_15

9. Пашкевич Н. В., Хлопони́на В. С., Поздняков Н. А., Аверичева А. А. Анализ проблем воспроизводства минерально-сырьевой базы дефицитных стратегических полезных ископаемых // Записки Горного института. – 2024. – Т. 270. – С. 1004–1023. EDN: HNTQBF
10. Семенов В. В., Буторов И. А. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в промышленном и гражданском строительстве // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2016. – № 4 (19). – С. 129–137. EDN: XEDYQT
11. Techno-economic and environmental sustainability analysis of filament-winding versus pultrusion based glass-fiber composite technologies / R. Rasheed et al. // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – V. 30. – N 13. – P. 36276–36293. DOI: 10.1007/s11356-022-24817-5
12. Макухин А. Г., Сыровой Г. В., Ратушняк А. Ю. Пултрюзия как технологический процесс изготовления изделий из композиционных материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – № 1. – С. 99–106. EDN: VOGEDL
13. Methods of manufacturing long-length power structures made of polymer composite materials / V. Reznichenko, et al. // BIO Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – V. 145. – P. 03048. DOI: 10.1051/bioconf/202414503048
14. Воробей В. В., Евстратов С. В. Новые направления в современной технологии намотки конструкций из композиционных материалов // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т. 16. – № 1. – С. 61–72. EDN: KUUDFV
15. Двоеглазов И. В. Разработка процесса изготовления складчатых заполнителей методом трансферного формования // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли. – 2016. – С. 700–703. EDN: WJPAWV
16. Гуляев А. И., Шуртаков С. В. Количественный анализ микроструктуры граничного слоя «волокно – матрица» в углепластиках // Труды ВИАМ. – 2016. – № 7 (43). – С. 65–74. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-8-8
17. Лепов В. В., Охлопкова А. А. Разработки в области северного и арктического материаловедения для промышленности Республики Саха (Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2024. – Т. 28. – № 4. – С. 627–640. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-4-627-640
18. Влияние температуры на прочность базальто- и стеклопластиков / А. Н. Блазнов и др. // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4–2. – С. 154–158. EDN: TUYTHZ
19. Старцев О. В., Лебедев М. П., Кычкин А. К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Изв. Алтайского государственного университета. – 2020. – № 1 (111). – С. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06
20. Lebedev M.P., Startsev O.V. Regularities of aging of polymer and polymer composite materials in the conditions of the far north // Russian Chemical Bulletin. – 2023. V. 72, N 2. – P. 553–565. DOI: 10.1007/s11172-023-3819-1
21. Эрозионностойкие покрытия для защиты изделий из полимерных композиционных материалов / Н. И. Нефедов и др. // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № S3. – С. 25–27. EDN: TBVRKL

22. Семенова Л. В., Новикова Т. А., Нефедов Н. И. Климатическая стойкость и старение лакокрасочного покрытия // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № S3. – С. 31–34. EDN: TBVRLF
23. Мензилова М. Г., Лебедев О. Ю. Исследования влияния эксплуатационных нагрузок на лакокрасочные покрытия // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2024. – № 2. – С. 8–13. EDN: WSHABX
24. Корецкая Л. С., Александрова Т. И. Структурные изменения неизбежны. Влияние воды на свойства стеклопластиков // *Полимерные трубы*. – 2011. – № 1. – С. 38–41. EDN: VRWKDQ
25. Quantification of water content during freeze–thaw cycles: A nuclear magnetic resonance based method / H. Tian et al. // *Vadose Zone Journal*. – 2018. – V. 17, N 1. – P. 1–12. DOI: [org/10.2136/vzj2016.12.0124](https://doi.org/10.2136/vzj2016.12.0124)

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

УДК 620.196.2:669.15–194.56:621.762.5

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ К МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ, ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

С. Ю. МУШНИКОВА, д-р техн. наук, О. Н. ПАРМЕНОВА, канд. техн. наук, Д. Н. ЧАЙНИКОВА,
Э. А. УШАНОВА, канд. физ.-мат. наук, Д. С. СОЗИНОВ

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

Поступила в редакцию 3.10.2025

После доработки 17.10.2025

Принята к публикации 21.10.2025

Методом селективного лазерного сплавления (СЛС) изготовлены образцы из нержавеющей сталей AISI 321 и AISI 316L. Проведены испытания образцов в исходном состоянии и после термической обработки, выполненной по режимам: СЛС + аустенитизация; СЛС + провоцирующий нагрев; СЛС + аустенитизация + провоцирующий нагрев, на межкристаллитную коррозию по ГОСТ 6032–2017 (метод АМУ). Установлено, что стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК) образцов из исследуемых нержавеющей сталей обеспечивает аустенитизация. При остальных режимах в зависимости от содержания углерода и элемента-стабилизатора (титана), а также от структуры металла, сформированной в процессе СЛС и термической обработки, образцы могут проявлять склонность к МКК.

Ключевые слова: аустенитные стали, селективное лазерное сплавление, межкристаллитная коррозия, аустенитизация

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-188-205

ЛИТЕРАТУРА

1. Базалеева К. О., Цветкова Е. В., Балакирев Э. В., Базалеев Е. В., Казаков А. В. Механическое и электрохимическое поведение аустенитного сплава, синтезированного методом селективного лазерного плавления // Материаловедение. – 2019. – №3. – С. 24–29.
2. Зельдович В. И., Хомская И. В., Фролова Н. Ю., Хейфец А. Э., Абдуллина Д. Н., Петухов Е. А., Смирнов Е. Б., Шорохов Е. В., Кленов А. И., Пильщиков А. А. Структура и механические свойства аустенитной нержавеющей стали, полученной методом селективного лазерного плавления // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 5. – С. 527–534.
3. Елисеев Д. П., Малашенков К. С. Оценка качества и механических свойств образцов аустенитной стали, полученных с использованием аддитивной технологии // Металлы. – 2020. – № 6. – С. 77–83.
4. Попович А. А., Суфияров В. Ш., Борисов Е. В., Полозов И. А., Масайло Д. В., Григорьев А. В. Анизотропия механических свойств изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления порошковых материалов // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2016. – № 3. – С. 4–11.
5. Базалеева, К.О., Цветкова Е. В., Балакирев Э. В. Термическая стабильность ячеистой структуры аустенитного сплава, формируемой при селективном лазерном сплавлении // Металлы. – 2016. – № 3. – С. 31–39.
6. Ильиных А. В. Механические свойства стали 12Х18Н10Т, полученной методом селективного лазерного сплавления // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 55. – С. 103–109.
7. Барахтин Б. К., Жуков А. С., Деев А. А., Вознюк А. В. Влияние химического состава порошкового сырья на прочность материала после селективного лазерного плавления // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2018. – № 6. – С. 48–52.
8. Кузнецов П. А., Зисман А. А., Петров С. Н., Гончаров И. С. Структура и механические свойства аустенитной стали 316L, полученной методом селективного лазерного сплавления // Деформация и разрушение металлов. – 2016. – № 4. – С. 9–13.
9. Барахтин Б. К., Жуков А. С., Бобырь В. В., Шакиров И. В., Кузнецов П. А. Факторы повышения прочности металлов, полученных селективным лазерным сплавлением порошков // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3. – С. 68–73.
10. Старицын М. В., Кузнецов П. А., Петров С. Н., Михайлов М. С. Композитная структура как упрочняющий фактор нержавеющей аустенитной хромоникелевой аддитивной стали // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 1–7.
11. Чигал В. Межкристаллитная коррозия нержавеющей сталей. – Л.: Химия, 1969. – 232 с.
12. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюрев В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970. – 424 с.
13. Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас: Справ. изд. / И. Я. Сокол, Е. А. Ульянин, Э. Г. Фельдгандлер и др. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.
14. Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии. – М.: Физматлит, 2002. – 336 с.

15. On the unusual intergranular corrosion resistance of 316L stainless steel additively manufactured by selective laser melting / M. Laleh, A. E. Hughes, W. Xu et al. // Corros. Sci. – 2019. – N 16. – P. 108189.
16. Laleh M., Hughes A. E., Xu W., Gibson I., Tan M. Y. A critical review of corrosion characteristics of additively manufactured stainless steels // International Materials Reviews. – 2020. URL: <https://doi.org/10.1080/09506608.2020.1855381>
17. Liu W., Liu C., Wang Y., Zhang H., Ni H. Effect of heat treatment on the corrosion resistance of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – V. 32. – P. 3896–3912.
18. Fouchereau A., Maskrot H., Lomello F., Bosonnet S., Gharbi O., Gwinner B., Laghoutaris P., Schuster F., Vivier V., Puga B. Triple structuration and enhanced corrosion performance of 316L in Laser-Powder Bed Fusion // Corrosion Science. – 2024. – N 228. – P. 111830.
19. Ghanavati, R., Naffakh-Moosavy H., Moradi M., Mazzucato F., Valente A., Bagherifard S., Saboori A. Design optimization for defect-free AISI 316 L/IN718 functionally graded materials produced by laser additive manufacturing // Materials Characterization. – 2025. – V. 220. – P. 114697.
20. ГОСТ: 1497–2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
21. ASTM A240. Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications.
22. ГОСТ 6032–2017. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии.
23. ГОСТ 2999–75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.
24. Парменова О. Н. Стойкость к питтинговой и щелевой коррозии нержавеющей стали аустенитного класса в морской воде // Дис. ... канд. техн. наук, Санкт-Петербург, 2019. – 185 с.
25. Qi, X., Gao X., Ma C., Huang R., Huang F., Liu J., Zhang S. Effect of heat treatment on the intergranular corrosion of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting // Materials Characterization. – 2025. – V. 220. – P. 114648.

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.039.531:669.15–194.56:539.421

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЙ И НЕЙТРОННОЙ ДОЗЫ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ОБЛУЧЕННОЙ В СОСТАВЕ ВКУ ВВЭР В ТЕЧЕНИЕ 45 ЛЕТ

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

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

Поступила в редакцию 24.06.2025

После доработки 15.09.2025

Проведены экспериментальные исследования по определению трещиностойкости и скорости роста усталостной трещины в облученной аустенитной стали марки 08X18H10T после эксплуатации в составе ВКУ ВВЭР-440 в течение 45 лет. Исследован металл трепанов из этой стали, вырезанных из выгородки реактора, имеющий повреждающую дозу от 14,4 до 43,0 сна.

Испытания по определению трещиностойкости проведены в диапазоне температур от – 100 до 300°C, а испытания по определению скорости роста усталостной трещины – в диапазоне от 20 до 300°C. Определены зависимости трещиностойкости и скорости роста усталостной трещины от температуры испытаний и повреждающей дозы. Обнаружено, что резкое снижение трещиностойкости и повышение скорости роста усталостной трещины происходит при переходе от классического вязкого или усталостного разрушения к смешанному характеру разрушения, включающему межзеренное. Выявлена роль мартенситного превращения при испытании образцов и генерации гелия в стали при ее облучении в реакторе ВВЭР. Эта роль проявляется в реализации межзеренного разрушения при температурах испытаний, когда реализуется мартенситное превращение в сочетании с ослабленными границами зерен гелием. Предложена качественная модель, объясняющая полученные результаты.

Ключевые слова: аустенитная сталь, облучение, трещиностойкость, скорость роста усталостной трещины, мартенситное превращение, межзеренное разрушение

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-206-231

ЛИТЕРАТУРА

1. Carter R. G., Gamble R. M. Assessment of the fracture toughness of irradiated stainless steel for BWR core shrouds // Proceedings of Int. Conf. Fontevraud 5 “Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to Light Water NPPs’ Safety, Performance and Reliability”, 2002, Avignon, France.

2. Fracture Toughness of Highly Irradiated Stainless Steels in Boiling Water Reactors / A. Demma, R. Carter, A. Jenssen et al. // 13th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems. – Toronto: Canadian Nuclear Society, 2007. – P. 1286–1303.

3. Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Федорова В. А., Кохонов В. И., Козлов А. В., Евсеев М. В., Козманов Е. А. Исследование влияния нейтронного облучения на статическую и циклическую трещиностойкость хромоникелевой аустенитной стали // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 1 (53). – С. 111–122.

4. Chopra O. K. Degradation of LWR Core Internal Materials due to Neutron Irradiation. – NUREG/CR-7027. U.S. NRC, Argonne National Laboratory, 2010.

5. Смирнов В. И., Марголин Б. З., Лапин А. Н., Кохонов В. И., Сорокин А. А. Исследование влияния нейтронного облучения на вязкость разрушения стали 08X18H10T и металла ее сварных швов // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 1 (65). – С. 167–183.

6. Chopra O. K., Rao A. S. A review of irradiation effects on LWR core internal materials – Neutron embrittlement // J. of Nuclear Materials. – 2011. – N 412. – P. 195–208.

7. Минкин А. И., Марголин Б. З., Смирнов В. И., Сорокин А. А. Развитие модели для прогнозирования статической трещиностойкости аустенитных материалов в условиях нейтронного облучения // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 3 (75). – С. 107–119.
8. Hure J., Tanguy B., Ritter C., Bourganel S., Sefta F. Extensive investigation of the mechanical properties of a Chooz A internal component // Proceedings of Int. Conf. Fontevraud 9 “Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to Light Water NPPs’ Safety, Performance and Reliability”, 2018, Avignon, France.
9. Shahinian P., Watson H. E., Smith H. H. Effect of Neutron Irradiation on Fatigue Crack Propagation in Types 304 and 316 Stainless Steels at High Temperatures // Effect of Radiation on Substructure and Mechanical Properties of Metals and Alloys. ASTM STP 529, ASTM, 1973. – P. 493–508.
10. James L. A. The effect of fast neutron irradiation upon the fatigue crack propagation behavior of two austenitic stainless steel // J. of Nuclear Materials. – 1976. – V. 59. – P. 183–191.
11. Lloyd G. J. Interpretation of the influences of irradiation upon fatigue crack propagation in austenitic stainless steels // J. of Nuclear Materials. – 1982. – V. 110. – P. 20–27.
12. Федорова В. А., Марголин Б. З. Прогнозирование скорости роста усталостной трещины в аустенитных сталях с учетом влияния нейтронного облучения и водной среды // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 3 (55). – С. 96–110.
13. Chopra O. K., Shack W. J. Crack Growth Rates and Fracture Toughness of Irradiated Austenitic Stainless Steels in BWR Environments. – NUREG/CR-7027. U.S. NRC, Argonne National Laboratory, 2008.
14. Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Сорокин А. А., Кохонов В. И. Влияние нейтронного облучения на скорость роста усталостных трещин в аустенитной стали 08X18H10T и металле ее сварных соединений // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 2 (74). – С. 123–138.
15. Margolin B., Sorokin A., Smirnov V., Potapova V. Physical and mechanical modelling of neutron irradiation effect on ductile fracture. Part 1. Prediction of fracture strain and fracture toughness of austenitic steels // J. Nucl. Mater. – 2014. – V. 452. – P. 595–606.
16. Марголин Б. З., Сорокин А. А., Швецова В. А., Минкин А. И., Потапова В. А., Смирнов В. И. Влияние радиационного распухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть 1. Пластичность и трещиностойкость стали // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3 (87). – С. 159–191.
17. Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Сорокин А. А., Швецова В. А., Потапова В. А. Влияние радиационного распухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть 2. Скорость роста усталостных трещин // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3 (87). – С. 192–209.
18. Максимкин О. П. Прямые и обратные мартенситные превращения в реакторных сталях, облученных нейтронами и заряженными частицами // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып. 3. (63), – С. 113–123.

19. Gusev M. N., Maksimkin O. P., Osipov I. S., Garner F. A. Anomalously large deformation of 12Cr18Ni10Ti austenitic steel irradiated to 55 dpa at 310°C in the BN-350 reactor // J. Nucl. Mater. – 2009. – V. 386–388. – P. 273–276.
20. Gusev M. N., Maksimkin O. P., Garner F. A. Peculiarities of plastic flow involving «deformation waves» observed during low-temperature tensile tests of highly irradiated 12Cr18Ni10Ti and 08Cr16Ni11Mo3 steels // J. Nucl. Mater. – 2010. – V. 403, Is. 1–3. – P. 121–125.
21. Margolin B., Shvetsova V., Sorokin A., Minkin A., Pirogova N. Mechanisms of plastic deformation and fracture of austenitic chromium-nickel steel irradiated during 45 years in WWER-440 // J. Nucl. Mater. – 2021. – V. 549. – P. 152911.
22. Margolin B., Pirogova N., Sorokin A., Morozov A. Correlation between grain boundary strength determined by impact test of miniature specimen and stress corrosion cracking resistance of irradiated austenitic steels used for the internals of WWER-type and PWR-type nuclear reactors // Engineering Failure Analysis. – 2021. – N 127. – P. 1–18.
23. Miura T., Fujii K., Fukuya K. Micro-mechanical investigation for effects of helium on grain boundary fracture of austenitic stainless steel // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 457. – P. 279–290.
24. Malaplate J., Vincent L., Averty X., Henry J., Marini B. Characterization of He embrittlement of a 9Cr–1Mo steel using local approach of brittle fracture // J. Eng. Fracture Mechanics. – 2008. – N 75. – P. 3570–3580.
25. 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.
26. Fukuya, K., Nishioka H., Fujii K. Fracture behavior of austenitic stainless steels irradiated in PWR // J. Nucl. Mater. – 2008 – N 378. – P. 211–219.
27. Toivonen A., Aaltonen P., Karlsen W., Ehrnstén U., Massoud J.-P., Boursier J.-M. Postirradiation SCC investigations on highly irradiated core internals component materials // Proc. of Fontevraud 6 Conference “Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs”, 18–22 Sept. 2006, Royal Abbey, France.
28. Pokor C., Massoud J.-P., Wintergerst M., Toivonen, A., Ehrnstén U., Karlsen W. Determination of the time to failure curve as a function of stress for a highly irradiated AISI 304 stainless steel after constant load tests in simulated PWR water environment // Proc. of Fontevraud 7 Conference “Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs”, 26–30 Sept. 2010, Avignon, France.
29. ГОСТ 5632–72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.
30. Марголин Б. З., Варовин А. Я., Минкин А. И., Гуринов Д. А., Глухов В. А. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после 45 лет эксплуатации. Сообщение 1. Программа исследований, оборудование и вырезка трепанов из ВКУ // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3 (103). – С. 135–143.
31. Пирогова Н. Е., Джаландинов А. Д., Марголин Б. З., Деркач Р. В., Минкин А. И. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после 45 лет эксплуатации. Сообщение 2. Расчетно-экспериментальное определение флюенса

быстрых нейтронов и повреждающей дозы // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3 (103). – С. 144–156.

32. Кулешова Е. А., Федотова С. В., Гурович Б. А., Фролов А. С., Мальцев Д. А., Марголин Б. З., Минкин А. И., Сорокин А. А. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после 45 лет эксплуатации. Сообщение 3. Микроструктура и фазовый состав // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3 (103). – С. 157–180.

33. ASTM E1820–24. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.

34. Райс Дж. Математические методы в механике разрушения // Разрушение. Т. 2. Математические основы теории разрушения / Под ред. Г. Либовица. – М.: Мир, 1975, – 764 с.

35. Николаев В. А., Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Рядков Л. Н. Применение малоразмерных образцов с глубокими боковыми канавками для прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения. Часть 1. Экспериментально-расчетные исследования // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 3 (55). – С. 41–59.

36. ГОСТ Р 59115.6–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов

37. Иванова В. С., Шанявский А. А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. – Челябинск: Metallurgy, 1988. – 396 с.

38. Belozarov 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 // The Physics of Metals and Metallography. – 2008. – V. 106, N 5. – P. 503–509.

39. Марголин Б. З., Морозов А. М., Пирогова Н. Е., Григорьев М. Н. Методика оценки прочности границ зерен аустенитных сталей по результатам испытаний миниатюрных образцов на ударный изгиб // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 2 (102). – С. 164–173.

CONTENTS

METALS SCIENCE. METALLURGY

<i>Romanov O.N., Olenin M.I., Bushuev S.V., Sprikut R.V., Sorokin A.A., Zernov E.A., Shakhkhan S.A.</i> Modification effects on the grain formation in forgings made of steel grade 10Kh16N25M2T-VI	5
<i>Fedoseeva A.E.</i> Effect of test temperature on creep resistance of 9–12% chromium steels	19
<i>Sych O.V., Khlusova E.I., Korotovskaya S.V.</i> Interrelation between the cold-crack resistance with the structure of thick sheet rolled products made of shipbuilding steels of different strength levels.....	31
<i>Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Baklushina I.V., Yuryev A.B., Litovchenko I.Yu., Chapaikin A.S.</i> Structure and properties of the plasma coating/substrate interface using high-speed molybdenum and medium carbon steel	53
<i>Vorobiev E.V., Churakova A.A.</i> Investigation of the effect of a preformed microstructure on the mechanical properties of Ti _{49.0} Ni _{51.0} alloy after severe plastic deformation	61
<i>Krylov P.S., Leonov V.P., Rtishcheva L.P., Khlobystov D.O., Lapina N.A., Lukin M.V., Negodin D.A.</i> Study of formation of fine-grained structure in titanium alloy of PT-7M during manufacture of tubular billets by hot extrusion followed by cold radial forging	69
<i>Osipovich K.S., Chumaevsky A.V., Semenchuk V.M., Shamarin N.N., Kolubaev E.A., Kushnaryov Yu.V.</i> Fabrication of experimental samples based on titanium alloy using wire-feed electron beam and wire arc additive manufacturing technologies	81
<i>Zoloduev K.V., Kravtsova M.V., Tsapleva A.S., Konovalova N.V., Bazaleeva K.O., Zhelezny M.V., Ponkratova Yu.Yu.</i> Hardness and microstructure of niobium alloys doped with tantalum, yttrium, hafnium and zirconium, depending on the annealing temperature	92

FUNCTIONAL MATERIALS

<i>Shakirov T.R., Valeeva A.R., Dutova V.S., Gotlib E.M.</i> Influence of the degree of dispersion and phase composition of zeolites on the characteristics of their porous structure	102
<i>Yusupov V.I., Minaeva E.D., Popyrina T.N., Lunyov I.V., Demina T.S., Minaev N.V.</i> Laser sintering of polylactic acid polymer microparticles: dependence on moisture content	109
<i>Bogush I.Yu., Plugotarenko N.K., Myasoedova T.N., Novikov S.P.</i> Structural and electrochemical characteristics of carbon-silicon-containing materials: selection of electrodes for use in supercapacitors.....	119

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

<i>Antipov V.V., Oglodkov M.S., Selivanov A.A., Samokhvalov S.V., Nefedova Yu.N.</i> Evaluation of the resistance of laminated aluminum-fiberglass plastics to impact loads	130
<i>Larionov I.S., Balkaev D.A., Zimin K.S., Antipin I.S., Amirova L.M., Volkov V.V.</i> Effect of dispersed filler content in a polyphenylene sulfide-based composite on the properties of samples obtained by 3D-printing.....	143
<i>Evdokimova K.S., Alexandrova D.S., Egorov A.S., Khramov N.D., Andreichev A.L., Vyeveryis A.A., Delibalt A.A., Nechaeva P.I., Kuliova A.G., Tsypakin A.A., Kapaeva E.A.</i> Study of the compatibility of superstructural thermoplastics with polyamide acid-based finishing agents.....	154

<i>Drozdova E.A., Rogachev E.A., Kropotin O.V.</i> Influence of superconductive carbon black on the structure and properties of composite materials based on high-density polyethylene	166
<i>Yermakov B.S., Nechaev D.V., Shvetsov O.V., Vologzhanina S.A.</i> Assessment of the applicability of basalt plastics for the construction of pile foundations in the conditions of the Far North	176

CORROSION AND PROTECTION OF METALS

<i>Mushnikova S.Yu., Parmenova O.N., Chainikova D.N., Ushanova E.A., Sozinov D.S.</i> Investigation of intercrystalline corrosion resistance of specimens of stainless austenitic steels obtained by selective laser alloying after various heat treatment modes	188
--	-----

RADIATION MATERIALS SCIENCE

<i>Margolin B.Z., Minkin A.J., Fomenko V. N., Smirnov V.I., Pirogova N.E., Sorokin A.A.</i> Features of the temperature and the damage dose effects on fracture toughness and fatigue crack growth rate in austenitic steel after 45 years of operation as part of the WWER	206
---	-----

Guidelines for authors of the scientific and technical journal “Voprosy Materialovedeniya”. Manuscript requirements	232
--	------------

METALS SCIENCE. METALLURGY

UDC 669.046.516.4

MODIFICATION EFFECTS ON THE GRAIN FORMATION IN FORGINGS MADE OF STEEL GRADE 10Kh16N25M2T-VI

O.N. ROMANOV, Cand Sc. (Eng), M.I. OLENIN, Dr Sc (Eng), S.V. BUSHUEV, R.V. SPRIKUT,
A.A. SOROKIN, Cand Sc. (Eng), E.A. ZERNOV, S.A. SHAKHKYAN

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

Received March 27, 2025

Revised May 28, 2025

Accepted June 27, 2025

Abstract—The effect of modification with rare earth metals and calcium on the cast structure of 10Kh16N25M2T-VI steel is examined. It is shown that the introduction of rare earth metals and calcium into the steel ensures the production of the highest quantity of recrystallized G5 grains as a result of simulating the upsetting operation on a Gleeble 3800 installation at a temperature of 1180°C and a strain rate of 0.03 sec⁻¹.

Keywords: recrystallization, dendrites, structure, heterogeneity, modification, grain, rare earth and alkaline earth metals

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-5-18

REFERENCES

1. Kursevich, I.P., Karzov, G.P., Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Teplukhina, I.V., Printsipy legirovaniya novoi radiatsionno-stoikoi austenitnoi stali dlya VKU VVEHR-1200, obespechivayushchej ikh bezopasnuyu ehkspluatatsiyu ne menee 60 let [Principles of alloying new radiation-resistant austenitic steel for pressure vessel internals (PVI) VVER-1200, ensuring their safe operation for at least 60 years], *Voprosy materialovedeniya*, 2012, No 3 (71), pp. 140–154.

2. Efimov, V.A., *Razlivka i kristallizatsiya slitka* [Casting and crystallization of the ingot], Moscow: Metallurgiya, 1974.
3. Movchan, B.A., *Mikroskopicheskaya neodnorodnost v litykh splavakh* [Microscopic heterogeneity in cast alloys], Kiev: Gos. izd-vo tekhnicheskoi literatury USSR, 1962.
4. Golubtsov, V.A., *Teoriya i praktika vvedeniya dobavok vne pechi* [Theory and practice of introducing additives outside the oven], Chelyabinsk, 2006.
5. Goldshtein, Ya.E., Murzin, V.G., *Modifitsirovanie i mikrolegirovanie chuguna i stali* [Modification and microalloying of cast iron and steel], Moscow: Metallurgiya, 1986.
6. Skok, Yu.Ya., *Kristallizatsiya pereokhlazhdennykh metallov i splavov. Fiziko-khimicheskie i teplofizicheskie protsessy kristallizatsii stalnykh slitkov* [Crystallization of supercooled metals and alloys. Physical, chemical, and thermophysical processes of crystallization of steel ingots], *Trudy 5 konferentsii po slitku "Problemy stalnogo slitka"*, Moscow: Metallurgiya, 1974, pp. 110–115.
7. Kamenetskaya, L.S., *O vliyani primesej na kristallizatsiyu stalnogo slitka. Zatverdevanie metallov* [The effect of impurities on the crystallization of a steel ingot. Solidification of metals], *Trudy 2 soveshchaniya po teorii liteynykh protsessov*, Moscow: Metallurgiya, 1958, pp. 299–309.
8. Baum, V.A., Khasin, G.A., Tyagunov, G.E., et al., *Zhidkaya stal* [Liquid steel], Moscow: Metallurgiya, 1984.
9. Golubtsov, V.A., Ryabchikov, I.V., Bakin, I.V., Dynin, A. Ya., Romanov, O.N., et al., *Primenenie monokristallicheskiykh kompleksnykh modifikatorov dlya vnepechnoi obrabotki stali. Ch. 1. Rol nemetallicheskiykh vklyuchenii v formirovani kachestva stali* [Application of single-crystal complex modifiers for out-of-furnace treatment of steel. Part 1: The role of non-metallic inclusions in shaping the quality of steel], *Chernaya metallurgiya: Bulletin "Chermetinformatsiya"*, 2021, No 3, pp. 295–309.
10. Golubtsov, V.A., Ryabchikov, I.V., Bakin, I.V., Dynin, A.Ya., Romanov, O.N., et al., *Primenenie monokristallicheskiykh kompleksnykh modifikatorov dlya vnepechnoi obrabotki stali. Ch. 2: Rezultaty razrabotki tekhnologii stali shirokogo assortimenta* [Application of monocrystalline complex modifiers for out-of-furnace processing of steel. Part 2: Results of development of technology for a wide range of steel], *Chernaya metallurgiya: Bulletin "Chermetinformatsiya"*, 2021, No 4, pp. 418–431.
11. Dzugutov, M.Ya., *Plasticheskaya deformatsiya vysokolegirovannykh staley i splavov* [Plastic deformation of high-alloy steels and alloys], Moscow: Metallurgiya, 1986.
12. Onishchenko, A.K., Beklemishev, N.N., *Teoriya promyshlennoi kovki staley i splavov* [Theory of industrial forging of steels and alloys], Moscow: Sputnik +, 2011.
13. Gorelik, S.S., Dobatkin, S.V., Kaputkina, L.M., *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys], Moscow: MISIS, 2005.
14. Rudskoi, A.I., Vargasov, N.R., Barakhtin, B.K., *Termoplasticheskoe deformirovanie metallov* [Thermoplastic deformation of metals], St Petersburg: Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2018.
15. Rudskoi, A.I., *Nauchnye osnovy upravleniya strukturoi i svoistvami staley v protsessakh termomekhanicheskoi obrabotki* [Scientific Foundations of Steel Structure and Properties Control in Thermomechanical Processing Processes], Moscow: RAN, 2019.

16. Golikov, I.N., Maslennikov, S.B., *Dendritnaya likvatsiya v stalyakh i splavakh* [Dendritic liquation in steels and alloys], Moscow: Metallurgiya, 1977.
17. Nuri, Yo, Vliyanie dobavok RZM na mikrostrukturu zatverdevaniya stalnykh slitkov i nepreryvnolitykh slyabov [Effect of rare-earth metal additives on the microstructure of solidification of steel ingots and continuous-cast slabs], *Tetsu-to-Hagane*, 1980, V. 66, No 6, pp. 618–627.

UDC 539.411/09/2025

EFFECT OF TEST TEMPERATURE ON CREEP RESISTANCE OF 9–12% CHROMIUM STEELS

A. E. FEDOSEEVA, Dr Sc. (Eng)

*Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St 308015 Belgorod,
Russian Federation. E-mail: fedoseeva@bsuedu.ru*

Received August 18, 2025

Revised September 11, 2025

Accepted September 15, 2025

Abstract—High-chromium martensitic steels are promising materials for the manufacture of power unit components for thermal power plants capable of operating at ultra-supercritical steam parameters (temperature 600–620°C, pressure 25–30 MPa). At the same time, to assess the long-term strength characteristics of such materials, sufficiently long tests are required, the time frame of which can reach several decades. This study raises the issue of the feasibility and admissibility of increasing the creep test temperature in laboratory studies for adequate prediction of long-term creep properties at lower temperatures using the example of 12% Cr steel with the low nitrogen content and high boron content. The assessment of the admissibility of increasing the test temperature to 675°C was based on the postulate of maintaining the creep deformation mechanism, the fracture mechanism and the patterns of structure and phase composition evolution compared to a lower temperature of 650°C. The analysis of the obtained data revealed that with an increase in the test temperature to 675°C, the main mechanism of creep deformation, such as high-temperature dislocation climb via volume diffusion, and the intragranular ductile fracture mechanism are preserved, as at 650°C, even despite the occurrence of creep strength breakdown. The analysis of microstructures after creep tests also showed that the main temperature-time dependences of the growth of the lath width and the average particle size of secondary phase particles can be described by curves with the same coefficients for different test temperatures. Thus, the temperature of 675°C can be recommended for accelerating laboratory creep tests for high-chromium steels.

Keywords: high-chromium steels, creep, recovery, dispersion hardening, particle coarsening, fracture

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-19-30

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (agreement No 24-79-10112).

The author expresses gratitude to the Center for Collective Use “Technologies and Materials of the Belgorod State National Research University” for the provided equipment.

REFERENCES

1. Abe, F., Creep of Power Plant Steels, *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, 2022, V. 1, pp. 485–493. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.12069-7>
2. Dong, Z., Chen, L., Xiang, Z., Design of a new 11Cr martensitic steel and evaluation of its long-term creep rupture strengths, *J. Mater. Res. Technol.*, 2022, V. 20, pp. 3450–3455. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.116>
3. Kaybyshev, R.O., Skorobogatykh, V.N., Shchenkova, I.A., New martensitic steels for fossil power plant: Creep resistance, *Phys. Metals Metallogr.*, 2010, V. 109, pp. 186–200. URL: <https://doi.org/10.1134/S0031918X10020110>
4. Rojas, D., Garcia, J., Prat, O., Sauthoff, G., Kaysser-Pyzalla, A.R., 9%Cr heat resistant steels: Alloy design, microstructure evolution and creep response at 650°C, *Mater. Sci. Eng. A*, 2011, V. 528, pp. 5164–5176. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.037>
5. Tamura, M., Abe, F., Analysis of the Degradation in the Creep Strength of High-Cr Martensitic Steels, *J. Mater. Sci. Res.*, 2021, V. 10, pp. 1–70. URL: <https://doi.org/10.5539/jmsr.v10n2p1>
6. Abe F., Tabuchi, M., Tsukamoto, S., Alloy Design of MARBN for Boiler and Turbine Applications at 650°C, *Mater. at High Temp.*, 2021, V. 38, pp. 306–321. URL: <http://doi.org/10.1080/09603409.2021.1963393>
7. Detroids, M., Hawk, J.A., Jablonski, P.D., Creep-Resistant Ferritic-Martensitic Steels for Power Plant Applications, *J. Mater Eng Perform*, 2024, V. 33, pp. 1–42. URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08566-1>
8. Li, H., Huang, M., Liang, N., et al., Precipitate Characteristic of T91 Ferritic/Martensitic Steel During Short-Term Creep, *Metall. Mater. Trans. A*, 2024, V. 55, pp. 607–622. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-023-07272-w>
9. Dudova, N., 9–12% Cr Heat-Resistant Martensitic Steels with Increased Boron and Decreased Nitro-gen Contents, *Metals*, 2022, V. 12, p. 1119. URL: <https://doi.org/10.3390/met12071119>
10. Fedoseeva, A., Klauz, A., Kaibyshev, R., Improved creep strength of 10% Cr steels with low N and high B content via increasing quenching temperature, *Materials Characterization*, 2024, V. 212, p. 113957. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113957>
11. Maruyama, K., Abe, F., Sato, H., Shimojo, J., Sekido, N., Yoshimi, K., On the physical basis of a Larson-Miller constant of 20, *J. Press. Ves. Pip.*, 2028, V. 159, pp. 93–100. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.11.013>
12. Nikitin, I., Fedoseeva, A., Kaibyshev, R., Strengthening mechanisms of creep-resistant 12%Cr–3%Co steel with low N and high B contents, *J. Mater. Sci.*, 2020, V. 55, pp. 7530–7545. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04508-7>
13. Fedoseeva, A., Nikitin, I., Tkachev, E., Mishnev, R., Dudova, N., Kaibyshev, R., Effect of alloying on the nucleation and growth of Laves phase in the 9–10%Cr–3%Co martensitic steels during creep, *Metals*, 2021, V. 11, p. 60. URL: <https://doi.org/10.3390/met11010060>
14. 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. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07275-9>

15. Maruyama, K., Sekido, N., Yoshimi, K., Changes in strengthening mechanisms in creep of 9Cr–1.8W–0.5Mo–VNb steel tested over wide ranges of creep conditions, *Int. J. Press. Vessels Pip.*, 2021, V. 190, p.104312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104312>
16. Abe, F., Analysis of creep rates of tempered martensitic 9%Cr steel based on microstructure evolution, *Mater. Sci. Eng. A*, 2012, V. 534, pp. 632–639. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.118>
17. Mechanisms of Creep, and Creep-Resistant Materials, *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*, Jones, D.R.H., Ashby, M.F. (Eds.), Cambridge, US: Elsevier, 2019, 5th ed., Ch. 23, pp. 381–394.
18. Fedoseeva, A., Tkachev, E., Kaibyshev, R., Advanced heat-resistant martensitic steels: long-term creep deformation and fracture mechanisms, *Mater. Sci. Eng. A*, 2023, V. 862, p. 144438. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144438>
19. Dudko, V., Belyakov, A., Kaibyshev, R., Evolution of lath substructure and internal stresses in a 9% Cr steel during creep, *ISIJ Int.*, 2017, V. 57, pp. 540–549. URL: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-334>
20. Dudova, N., Mishnev, R., Kaibyshev, R., Creep behavior of a 10%Cr heat-resistant martensitic steel with low nitrogen and high boron contents at 650°C, *Mater. Sci. Eng. A*, 2019, V. 766, p. 138353. URL: <http://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138353>
21. Xiao, B., Xu, L., Cayron, C., Xue, J., Sha, G., Loge, R., Solute-dislocation interactions and creep-enhanced Cu precipitation in a novel ferritic-martensitic steel, *Acta Mater.*, 2020, V. 195, 199–208. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.05.054>
22. Xiao, B., Haokai, D., Tao, Y., Shaofei, L., et al., Creep-Induced Heterogeneous Precipitation of Laves Phase with Two Morphologies in Tempered Martensite Ferritic Steels, *Materials Research Letters*, 2023, V. 11, pp. 630–37. URL: <https://doi.org/10.1080/21663831.2023.2208613>
23. Abe, F., Effect of boron on microstructure and creep strength of advanced ferritic power plant steels, *Procedia Eng.*, 2011, V. 10, pp. 94–99. URL: <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.04.018>
24. Liu, Z., Wang, X., Dong, C., Effect of boron on G115 martensitic heat resistant steel during aging at 650 C, *Mater. Sci. Eng. A*, 2020, V. 787, p. 139529. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139529>

UDC669.14.018.41:539.421:621.771.23

INTERRELATION BETWEEN THE COLD-CRACK RESISTANCE WITH THE STRUCTURE OF THICK SHEET ROLLED PRODUCTS MADE OF SHIPBUILDING STEELS OF DIFFERENT STRENGTH LEVELS

O.V. SYCH, Dr Sc. (Eng), E.I. KHLUSOVA, Dr Sc. (Eng), S.V. KOROTOVSKAYA, Cand Sc. (Eng)
*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,
Russian Federation. E-mail: mail@npk3@crism.ru*

Received April 1, 2025

Revised August 11, 2025

Accepted August 23, 2025

Abstract—The structure of sheet metal products made of high-strength, cold-resistant shipbuilding steels, widely used for the construction of Arctic marine equipment, primarily powerful nuclear-powered icebreakers, is presented. Modern methods for quantitatively assessing structural parameters using optical metallography, electron backscatter diffraction (EBSD), and transmission electron microscopy (TEM) are used to study the structure. The main structural features that influence the performance characteristics of sheet metal products are demonstrated, depending on the strength level and production technology. The relationship between cold resistance and crack resistance with the structure of thick sheet metal products made of shipbuilding steels of various strength levels is established.

Keywords: cold-resistant shipbuilding steel, performance characteristics, cold resistance, crack resistance, T_{kb} temperature, NDT temperature, critical crack tip opening (CTOD), structure, and structural element size.

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-31-52

REFERENCES

1. Filin, V.Yu., Kontrol kachestva stalei dlya krupnogabaritnykh svarnykh konstruktssii Arkticheskogo shelfa. Primenenie rossiiskikh i zarubezhnykh trebovaniy [Quality control of steels for large-scale welded structures on the Arctic shelf. Application of Russian and foreign requirements], *Voprosy materialovedeniya*, 2019, No 2 (98), pp. 136–153.
2. Davidenkov, N.N., *Dinamicheskaya prochnost i khrupkost metallov* [Dynamic Strength and Fragility of Metals], V. 1, Kiev: Naukova dumka, 1981.
3. Meshkov, Yu.Ya., Pakharenko, G.A., *Struktura metalla i khrupkost stalnykh izdelii* [Metal structure and brittleness of steel products], Kiev: Naukova dumka, 1985.
4. Trefilov, V.I., Milman, Yu.V., Firstov, S.A., *Fizicheskie osnovy prochnosti tugoplavkikh metallov* [Physical Principles of the Strength of Refractory Metals], Kiev: Naukova dumka, 1975.
5. Pickering, F.B., Gladman, T., Metallurgical developments in carbon steels, *The Journal of the Iron and Steel Institute*, 1963, No 81, pp. 10–25.
6. Mintz, B., Peterson, G., Nassar, A., Structure-property relationships in ferrite-pearlite steels, *Ironmaking and Steelmaking*, 1994, No 21, pp. 215–222.
7. Hanamura, T., Yin, F., Nagai, K., Ductile-brittle transition temperature of ultrafine ferrite/cementite microstructure in a low carbon steel controlled by effective grain size, *The Iron and Steel Institute of Japan*, 2004, No 44, pp. 610–617.
8. Wang, C., Wang, M., Shi, J., Hui, W., Dong, H., Effect of microstructural refinement on the toughness of low carbon martensitic steel, *Scripta Materialia*, 2008, No 58, pp. 492–495.
9. Morris, Jr.J.W., On the ductile-brittle transition in lath martensitic steel, *The Iron and Steel Institute of Japan*, 2011, No 51, pp. 1569–1575.
10. Bhattacharjee, D., Knott, J.F., Davis, C.L., Charpy-impact-toughness prediction using an ‘effective’ grain size for thermomechanically controlled rolled microalloyed steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, No 35, pp. 121–130.
11. Kaijalainen, A.J., Suikkanen, P.P., Limnell, T.J., Karjalainen, L.P., Kömi, J.I., Porter, D.A., Effect of austenite grain structure on the strength and toughness of direct- quenched martensite, *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, No 577, pp. 642–648.

12. Isasti, N., Jorge-Badiola, D., Taheri, M.L., Uranga, P., Microstructural features controlling mechanical properties in Nb–Mo microalloyed steels. Part II: impact toughness, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, No 45, pp. 4972–4982.
13. Jia, T., Zhou, Y., Jia, X., Wang, Z., Effects of microstructure on CVN impact toughness in thermomechanically processed high strength microalloyed steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, No 48, pp. 685–696.
14. Han, J., Da Silva, A.K., Ponge, D., Raabe, D., Lee, S.-M., Lee, Y.-K., Lee, S.-I., Hwang, B., The effects of prior austenite grain boundaries and microstructural morphology on the impact toughness of intercritically annealed medium Mn steel, *Acta Materialia*, 2017, No 122, pp. 199–206.
15. Lavrentiev, A.A., Golosienko, S.A., Ilyin, A.V., Mikhailov, M.S., Motovilina, G.D., Petrov, S.N., Sadkin, K.E., Soprotivlenie khrupkomu razrusheniyu vysokoprochnoi srednelegirovannoi stali i ego svyaz s parametrami strukturnogo sostoyaniya [Fracture resistance of high-strength medium-alloy steel and its relationship to structural state parameters], *Voprosy materialovedeniya*, 2019, No 3 (99), pp. 128–147.
16. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.V., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh staley: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin. Ch. 1. Strategiya, programma i metody eksperimentalnykh i raschetnykh issledovaniy [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: relationship of embrittlement and fracture mechanisms with characteristics of microcrack initiation and propagation. Part 1. Strategy, program and methods of experimental and computational studies], *Voprosy materialovedeniya*, 2024, No 1 (117), pp. 173–194.
17. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.V., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh staley: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin. Ch. 2. Kharakteristiki prochnosti i plastichnosti [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: relationship of embrittlement and fracture mechanisms to the characteristics of microcrack initiation and propagation. Part 2. Strength and ductility characteristics], *Voprosy materialovedeniya*, 2024, No 1 (117), pp. 195–209.
18. Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Shvetsova, V.A., Yurchenko, E.V., Radiatsionnoe i termicheskoe okhrupchivanie korpusnykh reaktornykh staley: svyaz mekhanizmov okhrupchivaniya i razrusheniya s kharakteristikami zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin. Ch. 3. Modelirovanie khrupkogo razrusheniya i analiz svyazi kharakteristik zarozhdeniya i rasprostraneniya mikrotreshchin s mekhanizmami okhrupchivaniya [Radiation and thermal embrittlement of reactor vessel steels: relationship of embrittlement and fracture mechanisms with microcrack initiation and propagation characteristics. Part 3. Modeling of brittle fracture and analysis of the relationship between microcrack initiation and propagation characteristics and embrittlement mechanisms], *Voprosy materialovedeniya*, 2024, No 2 (118), pp. 166–186.
19. Bernshtein, M.L., *Struktura deformirovannykh metallov* [The structure of deformed metals], Moscow: Metallurgiya, 1977.
20. Rybin, V.V., Vergazov, A.N., Tormozhenie mikrotreshchiny v subzerennoi strukture [Microcrack inhibition in the subgrain structure], *Fizika metallov i metallovedenie*, 1975, No 41, pp. 220–223.

21. Nesterova, E.V., Zolotarevsky, N.Yu., Titovets, Yu.F., Khlusova, E.I., Nasledovanie razorientatsii i model formirovaniya struktury beinita v nizkouglerodistykh stalyakh pod vliyaniem deformatsii austenita [Inheritance of misorientations and the formation model of bainite structure in low-carbon steels under the influence of austenite deformation], *Voprosy materialovedeniya*, 2011, No 4 (68), pp. 17–26.
22. Rybin, V.V., *Bolshie plasticheskie deformatsii i razrushenie materialov* [Large plastic deformations and destruction of materials], Moscow: Metallurgiya, 1986.
23. Panin, V.E., Grinyaev, Yu.V., Danilov, V.I., *Strukturnye urovni plasticheskoy deformatsii i razrusheniya* [Structural levels of plastic deformation and fracture], Novosibirsk: Nauka, 1990.
24. Takayama, N., Miyamoto, G., Furuhashi, T., Effects of transformation temperature on variant pairing of bainitic ferrite in low carbon steel, *Acta Materialia*, 2012, V. 60, pp. 2387–2396.
25. Zisman, A.A., Zolotarevsky, N.Yu., Petrov, S.N., Khlusova, E.I., Yashina, E.A., Panoramny kristallografichesky analiz evolyutsii struktury pri otpuske nizkouglerodistoi martensitnoi stali [Panoramic crystallographic analysis of the structure evolution during tempering of low-carbon martensitic steel], *MiTOM*, 2018, No 3 (753), pp. 10–17.
26. Miyamoto, G., Iwata, N., Takayama, N., Furuhashi, T., Quantitative analysis of variant selection in ausformed lath martensite, *Acta Mater.*, 2012, V. 60, pp. 1139–1148.
27. Khlusova, E.I., Sych O.V., Orlov V.V., Khladostoykie stali. Struktura, svoystva,ologii [Cold-resistant steel. Structure, properties, technologies], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2021, V.122, No 6, pp. 621–657.
28. Pyshmintsev, I.Yu., Smirnov, M.A., *Struktura i svoystva stalei dlya magistralnykh truboprovodov* [Structure and Properties of Steels for Main Pipelines], Ekaterinburg: Izd-vo UMC UPI, 2019.
29. Hu, J., Du, L.X., Zang, M., Yin, S.J., Wang, Y.G., Qi, X.Y., Gao, X.H., Misra, R.D.K., On the determining role of acicular ferrite in V–N microalloyed steel in increasing strength-toughness combination, *Materials Characterization*, 2016, V. 118, pp. 446–453.
30. Kaijalainen, A., Pallaspuu, S., Porter, D., Tempering of direct quenched low-alloy ultra-high-strength steel, Part 1 – microstructure, *Adv. Mater. Res.*, 2014, No 922, pp. 316–321.
31. Pallaspuu S., Kaijalainen A., Mehtonen S., Kömi J., Zhang Z., Porter D. Effect of microstructure on the impact toughness transition temperature of direct-quenched steels, *Materials Science & Engineering*, 2017, No 12.
32. Lehto, P., Remes, H., Saukkonen, T., Hänninen, H., Romanoff, J., Influence of grain size distribution on the Hall-Petch relationship of welded structural steel, *Mater. Sci. Eng. A*, 2014, No 592, pp. 28–39.
33. Pineau, A., Benzerga, A., Pardoen, T., Over view article failure of metals I–brittle and ductile fracture, *Acta Mater.*, 2016, No 107, pp. 424–483.
34. ND No 2-020101-174: *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Ch. 13: Materialy* [Rules for the Classification and Construction of Marine Vessels. Part 13: Materials], St Petersburg: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2023.
35. MVI No 304-19-10 (FR.1.31.2010.07296): Opredelenie doli, razmera (v diapazone 5–5000 nm) i uglov razorientirovki nanofragmentov v materialakh, podvergnutykh intensivnoi plasticheskoy deformatsii, s pomoshchiyu analizatora kartin difraktsii obratno otrazhennykh elektronov i metoda odinochnykh reflektsov [Determination of the fraction, size (in the range of 5–5000 nm), and disorientation angles of nanofragments in materials subjected to intensive plastic deformation using

a backscattered electron diffraction pattern analyzer and the single-reflection method], *Metodika vypolneniya izmerenij*, St Petersburg: Kurchatovsky institut – CRISM Prometey, 2010.

36. Rybin, V.V., Malyshevsky, V.A., Khlusova, E.I., *Vysokoprochnye svarivaemye uluchshaemye stali* [High-strength weldable improved steels], St Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2016.

37. Byoungchul Hwang, Chang Gil Lee, Sung-Joon Kim, Low-Temperature Toughening Mechanism in Thermo mechanically Processed High-Strength Low-Alloy Steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, V. 42A.

38. Zisman, A.A., Petrov, S.N., Ptashnik, A.V., Kolichestvennaya attestatsiya beinito-martensitnykh struktur vysokoprochnykh legirovannykh stalei metodami skaniruyushchei elektronnoi mikroskopii [Quantitative assessment of bainite-martensite structures of high-strength alloy steels using scanning electron microscopy], *Metallurg*, 2014, No 11, pp. 91–95.

39. Kang Jun-Yun, Do Hyun Kim, Sung-Il Baik, Tae-Hong Ahn, Young-Woon Kim, Heung Nam Han, Kyu Hwan Oh, Hu-Chul Lee, Seong Ho Han, Phase analysis of steels by grain-averaged EBSD Functions, *ISIJ International*, 2011, V. 51, No 1, pp. 130–136.

40. Kazakov, A.A., Kiselev, D.V., Sych, O.V., Khlusova, E.I., Metodika otsenki mikrostrukturnoiednorodnosti po tolshchine listovogo prokata iz khladostoikoi nizkolegirovannoi stali arkticheskogo primeneniya [Method for assessing microstructural heterogeneity in the thickness of cold-resistant low-alloy steel for Arctic applications], *Chernye metally*, 2020, No 9, pp. 11–19.

41. Kazakov, A.A., Kiselev, D.V., Sych, O.V., Khlusova, E.I., Kolichestvennaya otsenka strukturnoi neodnorodnosti v listovom prokate iz khladostoikoi nizkolegirovannoi stali dlya interpretatsii tekhnologicheskikh osobennostei ego izgotovleniya [Quantitative assessment of structural heterogeneity in cold-resistant low-alloy steel sheet rolled products for interpretation of their technological features], *Chernye metally*, 2020, No 11, pp. 4–14.

42. Zisman, A.A., Van Boxtel, S., Seefeldt, M., Van Houtte, P., Gradient matrix method to image crystal curvature by processing of EBSD data and trial recognition of low-angle boundaries in IF steel, *Materials Science and Engineering-A*, 2008, V. 474, pp. 165–172.

43. Margolin, B.Z., Karzov, G.P., Kostylev, V.I., Shvetsova, V.A., Modelling for transcrystalline and intercrystalline fracture by void nucleation and growth, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 1998, V. 21, pp. 123–137.

44. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Prognozirovaniye vliyaniya nejtronnogo oblucheniya na kharakteristiki vyazkogo razrusheniya austenitnykh stalei [Predicting the effect of neutron irradiation on the viscous fracture characteristics of austenitic steels], *Voprosy materialovedeniya*, 2012, No 1 (69), pp. 126–147.

UDC 621.791.92:621.727:620.178

STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE PLASMA COATING/SUBSTRATE INTERFACE USING HIGH-SPEED MOLYBDENUM AND MEDIUM CARBON STEEL

Yu.F. IVANOV¹, Dr Sc. (Phys-Math), V.E. GROMOV², Dr Sc. (Phys-Math), I.V. BAKLUSHINA², A.B. YURIEV², Dr Sc. (Eng), I.Yu. LITOVCHENKO³, Dr Sc. (Phys-Math), A.S. CHAPAIKIN²

¹ Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3 Akademicheskoy Ave, 634055 Tomsk, Russian Federation. E-mail: yufi55@mail.ru

² Siberian State Industrial University, 42 Kirov St, 654007 Novokuznetsk, Russian Federation.

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

³ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4 Akademicheskoy Ave, 634055 Tomsk, Russian Federation. E-mail: litovchenko@spti.tsu.ru

Received June 17, 2025

Revised September 1, 2025

Accepted September 2, 2025

Abstract—The methods of modern physical materials science were used to study the structural/phase state and elemental composition of the transition zone of the contact of the plasma coating (high-speed molybdenum steel) and substrate (medium carbon steel) system. The transition layer with a thickness of $\approx 100\ \mu\text{m}$ contains the α -phase, γ -phase, complex carbides Me_{23}C_6 , Me_6C , as well as MoC and cementite. The structure of the transition layer is represented by packet and lamellar martensite, austenite interlayers and nanosized cementite particles. The coating/substrate contact zone does not contain micropores and microcracks. Nanohardness and Young's modulus change smoothly with distance from the coating and substrate, forming a damping layer along the contact surface, which allows us to speak about the high performance of the plasma surfacing/substrate system.

Keywords: high-speed molybdenum steel, plasma method, coating/substrate system, interface, structure, phase composition, properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-53-60

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the support of a grant RSF No 23-19-00186, URL: <https://rscf.ru/project/23-19-00186>.

REFERENCES

1. Kremnev, L.S., From High-Speed Tungsten Steel to High-Temperature Molybdenum Steel: A Century of High-Speed Steel, *Steel in Translation*, 2009, V. 39, No 12, pp. 1111–1118.
2. Kremnev, L.S., Onegina, A.K., Vinogradova, L.A., Osobennosti prevrashchenii, struktury i svoystv molibdenovykh bystrorezhushchikh staley [Features of Transformations, Structure and Properties of Molybdenum High-Speed Steels], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2009, No 12 (654), pp. 13–19. EDN: KZSBKP
3. Kremnev, L.S., Teoriya legirovaniya i sozdanie na ee osnove teplostoikikh instrumentalnykh staley i splavov [Alloying Theory and the Creation of Heat-Resistant Tool Steels and Alloys on Its Basis], *MiTOM*, 2008, No 11, pp. 18–28. EDN: KVXKKF
4. Kupalova, I.K., Fazovy analiz i fazovy sostav bystrorezhushchikh staley [Phase analysis and phase composition of high-speed steels]: review, *Zavodskaya laboratoriya*, 1983, No 1, pp. 27–40.
5. Vostretsov, G.N., Deformatsionnaya sposobnost naplavlennogo teplostoikogo metalla tipa R2M8 pri martensitnom prevrashchenii [Deformation capacity of deposited heat-resistant metal type P2M8 during martensitic transformation], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta*, 2012, No 1, pp. 7–10.
6. Darmawan, W., Quesada, J., Marchal, R., Characteristics of laser melted AISI-T1 high speed steel and its wear resistance, *Surf. Eng.*, 2007, V. 23, No 2, pp. 112–119.

7. Emelyushin, A.N., Petrochenko, E.V., Nefediev, S.P., Investigation of the structure and impact-abrasive resistance of coatings of the Fe–C–Cr–Mn–Si system additionally alloyed with nitrogen, *Welding International*, 2013, V. 27, No 2, pp. 150–153.
8. Nefediev, S.P., Emelyushin, A.N., Vliyanie azota na formirovanie struktury i svoistv plazmennyykh pokrytii tipa 10R6M5 [Influence of nitrogen on the formation of the structure and properties of plasma coatings of the 10P6M5 type], *Bulletin of Yugra State University*, 2021, No 3 (62), pp. 33–45. DOI: 10.17816/byusu20210233-45
9. Mozgovoy, I.V., Shneider, E.A., *Naplavka bystrorezhushchei stali* [Surfacing of high-speed steel], Omsk: OmGTU, 2016.
10. Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E., Potekaev, A.I., Guseva, T.P., Chapaikin, A.S., Vashchuk, E.S., Romanov, D.A., Structure and properties of R18U surfacing of high-speed steel after its high tempering, *Russian Physics Journal*, 2023, V. 66, No 7, November, pp. 731–739. DOI: 10.1007/s11182-023-02999-w
11. Rakhadilov, B.K., Zhurero, L.G., Scheffler, M., Khassenov, A.K., Change in high temperature wear resistance of high speed steel by plasma nitriding, *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*, 2018, V. 3 (91), pp. 59–65. EDN: KJWHYN
12. Gromov, V.E., Yuriev, A.B., Ivanov, Yu.F., Minenko, S.S., Konovalov, S.V., Elektronno-mikroskopicheskoe issledovanie zony kontakta naplavka (bystrorezhushchaya stal R2M9) – podlozhka (stal 30XGSA) [Electron microscopic study of the contact zone of the surfacing (high-speed steel – P2M9) – substrate (steel 30KhGSA)], *Vestnik SibGIU*, 2025, No 2 (52), pp. 3–8.
13. Potekaev, A.I., Gromov, V.E., Yuriev, A.B., Ivanov, Yu.F., Konovalov, S.V., Minenko, S.S., Semin, A.P., Chapaikin, A.S., Litovchenko, I.Yu., Transition zone structure in the fast-cutting surfaced layer – substrate system, *Russian Physics Journal*, 2024, V. 67, No 8, pp. 1107–1113.
14. Egerton, F.R., *Physical Principles of Electron Microscopy*, Basel: Springer International Publishing, 2016.
15. Kumar, Ch., *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*, New York: Springer, 2014.
16. Carter, C.B., Williams, D.B., *Transmission Electron Microscopy*, Berlin: Springer International Publishing, 2016.
17. Kurdyumov, V.G., Utevsky, L.M., Entin, R.I., *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in Iron and Steel], Moscow: Nauka, 1977.

UDC 539.25

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF A PREFORMED MICROSTRUCTURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF Ti_{49.0}Ni_{51.0} ALLOY AFTER SEVERE PLASTIC DEFORMATION

E. V. VOROBIEV¹, A. A. CHURAKOVA^{1,2}, Cand Sc. (Phys-Math)

¹ Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St, 450076 Ufa, Bashkortostan, Russian Federation. E-mail: z.vorobyov@mail.ru

Received September 2, 2025

Revised October 6, 2025

Accepted October 7, 2025

Abstract—The object of this study is the investigation of the effect of annealing temperature on the mechanical and functional properties of the Ti_{49.0}Ni_{51.0} alloy in coarse-grained (CG), ultrafine-grained-1 (UFG-1), and ultrafine-grained-2 (UFG-2) states. The study identifies dependencies of the influence of the initial structure of the Ti_{49.0}Ni_{51.0} alloy and the structure formed during aging over a wide temperature range on the mechanical characteristics of the alloy. Research was carried out to study changes in properties that depend on the type of treatment. The microstructure was examined by optical and transmission microscopy, mechanical properties were tested, and fractographic analysis was performed. It has been established that annealing temperature significantly affects the mechanical characteristics of the Ti_{49.0}Ni_{51.0} alloy. Annealing in the aging temperature range and at higher temperatures results in a decrease in tensile strength and an increase in ductility. Severe plastic deformation using equal channel angular pressing (ECAP) enabled high tensile strength and yield strength to be achieved without reducing ductility.

Keywords: TiNi, functional properties, mechanical properties, annealing, microstructure, intensive plastic deformation

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-61-68

REFERENCES

1. Mukhametdzhannov, Kh., Bekarisov, O.S., Mukhametdzhannov, D.Zh., Karibaev, B.M., Dyusenbaev, N.N., Zhanaspaev, T.M., Nauchnoe obosnovanie ispolzovaniya biokompozitnogo materiala iz granul poristogo nikelida titana, obogashchennogo trombotsitarnoi massoi dlya kostnoi plastiki [Scientific justification for the use of a biocomposite material made from porous titanium nitride granules enriched with platelet mass for bone grafting], *Traumatology and Orthopaedics of Kazakhstan*, 2021, V. 4, No 60., pp. 10–30.
2. Marchenko, E.S., Gordienko, I.I., Kozulin, A.A., Baigonakova, G.A., Borisov, S.A., Garin, A.S., Cherny, S.P., Choyzonov, E.L., Kulbakin, D.E., Issledovanie biosovmestimosti poristikh 3D TiNi implantatov v usloviyakh in vivo [Study of the biocompatibility of porous 3D-TiNi implants under in vivo conditions], *Sibirsky zhurnal klinicheskoy i eksperimentalnoy meditsiny*, 2024, No 39 (1), pp. 184–193.
3. Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M.A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Materials & Design (1980–2015)*, 2014, V. 56, pp. 1078–1113.
4. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V., *Obiemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva* [Bulk nanostructured metallic materials: preparation, structure and properties], Moscow: Akademkniga, 2007.
5. Churakova, A., Gunderov, D., Kayumova, E., The Investigation of Microstructure and Mechanical Behavior and the Fractographic Analysis of the Ti_{49.1}Ni_{50.9} Alloy in States with Different Activation Deformation Volumes, *Appl. Sci.*, 2021, V. 11.

6. Kuranova, N.N., Makarov, V.V., Pushin, V.G., Ustyugov, Y.M., Influence of Heat Treatment and Deformation on the Structure, Phase Transformation, and Mechanical Behavior of Bulk TiNi-Based Alloys, *Metals*, 2022, V. 12.
7. Komarov, V., Karelin, R., Cherkasov, V., Postnikov, I., Korpala, G., Yusupov, V., Khmelevskaya I., Kawalla, R., Prahl, U., Prokoshkin, S., Deformation Behavior of NiTi Shape Memory Alloy Subjected to Severe Torsion Deformation, *Procedia Structural Integrity*, 2025, V. 69, pp. 76–79
8. Karelin, R., Komarov, V., Khmelevskaya, I., Andreev, V., Yusupov, V., Prokoshkin, S., Structure and properties of TiNi shape memory alloy after low-temperature ECAP in shells, *Materials Science and Engineering A*, 2023, V. 872.
9. Khmelevskaya, I.Yu., Prokoshkin, S.D., Trubitsyna, I.B., et al., Structure and properties of Ti–Ni-based alloys after equalchannel angular pressing and high-pressure torsion, *Materials Science and Engineering A*, 2008, V. 481–482, pp. 119–122.
10. Lotkov, A.I., Grishkov, V.N., Dudarev, E.F., et al., Formirovanie ultramelkozernistogo sostoyaniya, martensitnye prevrashcheniya i neuprugie svoystva nikelida titana posle abc-pressovaniya [Formation of an ultrafine-grained state, martensitic transformations and inelastic properties of titanium nickelide after abc-pressing], *Voprosy Materialovedeniya*, 2008, No 1, pp. 161–165.
11. Huang, J., Xu, Z., Evolution mechanism of grain refinement based on dynamic recrystallization in multiaxially forged austenite, *Materials Letters*, 2006, V. 60, pp. 1854–1858.
12. Stolyarov, V.V., Prokofiev, E.A., Prokoshkin, S.D., et al., Strukturnye osobennosti, mekhanicheskie svoystva i effekt pamyati formy v splavakh TiNi, podvergnutykh ravnokanalnomu uglovomu pressovaniyu [Structural features, mechanical properties, and the shape-memory effect in TiNi alloys subjected to equal-channel angular pressing], *Physics of Metals and Metallography*, 2005, V. 100, No 6, pp. 91–102.

UDC 669.295:621.73.011

STUDY OF FORMATION OF FINE-GRAINED STRUCTURE IN TITANIUM ALLOY OF PT-7M DURING MANUFACTURE OF TUBULAR BILLETS BY HOT EXTRUSION FOLLOWED BY COLD RADIAL FORGING

P.S. KRYLOV¹, V.P. LEONOV¹, Dr Sc. (Eng), L. P. RTISHCHEVA¹, D.O. KHLOBYSTOV²,
N.A. LAPINA², M.V. LUKIN², D.A. NEGODIN²

¹ NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,
Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

² JSC Chepetsky Mechanical Plant, 7 Belova St, 427622 Glazov, Russian Federation.
E-mail: dokhlobystov@rosatom.ru

Received July 31, 2025

Revised October 6, 2025

Accepted October 24, 2025

Abstract—The paper studies effects of intense plastic deformation during extrusion of titanium alloy PT-7M followed by cold radial forging on the formation of the material structure. Optimal modes of thermal treatment for formation of regulated fine-grained structure in material are determined. It is shown that radial forging of hot-pressed blank makes it possible to form homogeneous fine-grained blank.

Keywords: titanium alloys, intensive plastic deformation, radial forging, heat treatment, fine-grained structure

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-69-80

REFERENCES

1. Gorynin, I.V., Ushkov, S.S., *Titanovye splavy dlya morskoi tekhniki* [Titanium alloys for marine equipment], St Petersburg: Politekhnik, 2007.
2. Valiev, R.Z., Aleksandrov, I.V., *Obiemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy. Poluchenie, struktura i svoistva* [Bulk nanostructured metal materials. Preparation, structure, and properties], Moscow: Akademkniga, 2007.
3. Polyakova, V.V., *Osobennosti struktury i mekhanicheskie svoistva ultramelkozernistogo splava Ti–6Al–7Nb dlya meditsinskikh primeneny* [Structure features and mechanical properties of an ultra-fine-grained Ti–6Al–7Nb alloy for medical applications], thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), Ufa, 2015.
4. Gatina, S.A., *Fazovye prevrashcheniya i mekhanicheskie svoistva psevdob-splava Ti–15Mo, podvergnutogo intensivnoi plasticheskoi deformatsii* [Phase transformations and mechanical properties of a pseudo- β Ti–15Mo alloy subjected to intensive plastic deformation], thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), Ufa, 2016.
5. Aleksandrov, I.V., *Evolutsiya kristallograficheskoi tekstury v tekhnicheski chistom titane, podvergnutom ravnokanalnomu uglovomu pressovaniiu* [Evolution of the crystallographic texture in technically pure titanium subjected to equal-channel angular pressing], *Vestnik UGATU*, 2009, V. 12. No 2, pp. 76–82.
6. Semenova, I.P., *Evolutsiya struktury splava VT6, podvergnutogo ravnokanalnomu uglovomu pressovaniiu* [Evolution of the structure of the VT6 alloy subjected to equal-channel angular pressing], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2005, V. 100, No 1, pp. 53–61.
7. Kashin, O.A., *Deformatsionnoe povedenie i razrushenie pri tsiklicheskom nagruzhении titanovykh splavov, podvergnutykh ravnokanalnomu uglovomu pressovaniiu* [Deformation behavior and failure under cyclic loading of titanium alloys subjected to equal-channel angular pressing], *Fizicheskaya mezhmekhanika*, 2004, No 7 (Special ed., P. 2), pp. 130–134.
8. Polyakov, A.V., *Evolutsiya mikrostruktury titana Grade 4 s izmeneniem stepeni deformatsii pri RKUP–CONFORM* [Evolution of the microstructure of Grade 4 titanium with changing degree of deformation during RKUP–CONFORM], *Vestnik UGATU*, 2011, V. 15, No 1, pp. 95–100.
9. Zaripova, R.G., *Vliyanie intensivnoi plasticheskoi deformatsii i rezhimov obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoistva titanovogo splava VT6* [Influence of intensive plastic deformation and processing modes on the structure and mechanical properties of titanium alloy VT6], *Vestnik UGATU*, 2012, V. 16, No 7, pp. 17–24.
10. Betekhtin, V.I., *Mekhanicheskie svoistva, plotnost i defektnaya struktura mikrokristallicheskogo titana VT1-0, poluchennogo posle intensivnoi plasticheskoi deformatsii pri vintovoi i prodolnoi prokatkakh* [Mechanical properties, density, and defect structure of microcrystalline titanium BT1-0 obtained after intensive plastic deformation during helical and longitudinal rolling], *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2011, V. 81, Is. 1, pp. 58–63.
11. Dediulina, O.K., *Formirovanie ultramelkozernistoi struktury v sredneuglerodistoi stali 40KhGNM rotatsionnoi kovkoi i ee vliyanie na mekhanicheskie svoistva* [Formation of an ultra-fine-

grained structure in medium-carbon steel 40KhG2M by rotational forging and its effect on mechanical properties], *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, No 1, pp. 701–706.

12. Balakhnin, A.N., *Formirovanie struktury i svoystv zakalennykh konstruktsionnykh nizkouglerodistykh staley pri kholodnoi radialnoy kovke i posleduyushchem termicheskom vozdeistvii* [Formation of the structure and properties of hardened low-carbon structural steels during cold radial forging and subsequent thermal treatment], thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), Perm, 2015.

13. Shaimanov, G.S., Osobennosti poverkhnosti razrusheniya stali 09G2S posle kholodnoi radialnoi kovki [Features of the surface of 09G2S steel fracture after cold radial forging], *Vestnik PNIPU*, 2016, V. 18, No 3, pp. 119–134.

14. Zakarlyukin, S.I., Primenenie radialno-kovochnoi mashiny SKK-14 dlya kholodnoi i goryachei kovki trub [Application of the SKK-14 radial forging machine for cold and hot forging of pipes], *Sb. Yuzhno-uralskogo federalnogo universiteta. Metallurgiya*, 2015, V. 15, No 2, pp. 106–114.

15. Martynenko, N.S., Vliyanie rotatsionnoi kovki na strukturu, teksturu i mekhanicheskie svoystva promyshlennogo magnievogo splava MA2-1pch [Influence of rotary forging on the structure, texture, and mechanical properties of the industrial magnesium alloy MA2-1pch], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2016, No 4.

16. Grosman, F., Piela, A., Metal flow in the deformation gap at primary swaging, *J. Mater. Proc. Technol.*, 1996, V. 56, pp. 404–411.

17. Gan, W.M., Microstructures and mechanical properties of pure Mg processed by rotary swaging, *Mater. & Des.*, 2014, V. 63, pp. 83–88.

18. Gan, W.M., Bulk and local textures of pure magnesium by rotary swaging, *J. of Magnes. & Alloys*, 2013, V. 1, pp. 341–345.

19. Zavodchikov, A.S., *Struktura i svoystva trubnykh polufabrikatov iz tsirkonievogo splava EH110 posle radialnoi kovki* [Structure and properties of pipe semi-finished products made of E110 zirconium alloy after radial forging], Abstract for the thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), Tomsk, 2011.

20. Zherebtsov, S.V., Vliyanie teploi rotatsionnoi kovki na strukturu i svoystva titanovogo splava VT6 [The effect of warm rotary forging on the structure and properties of titanium alloy VT6], *Vestnik UGATU*, 2012, V. 16, No 7, pp. 30–34.

21. Klimova, M., Zherebtsov, S., Salishchev, G., Ultrafine-grained structure formation in Ti–6Al–4V alloy via warm swaging, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2014, V. 63, Art. 012070.

22. Loginov, Yu.N., *Pressovanie kak metod intensivnoi plasticheskoi deformatsii metallov i splavov* [Pressing as a method of intensive plastic deformation of metals and alloys], Ekaterinburg: Izd-vo Uralskogo un-ta, 2016, 158 p.

23. Loginov, Yu.N., Nachalnaya stadiya pressovaniya trubnoi zagotovki iz titanovogo splava: modelirovanie i eksperiment [Initial stage of tube blank pressing from titanium alloy: modeling and experiment], *Metallurg*, 2024, No 7, pp. 47–52.

24. Smirnov, V.G., Formirovanie kristallograficheskoi tekstury v goryache- i kholodnodeformirovannykh trubakh iz splavov titana [Formation of crystallographic texture in hot- and cold-deformed titanium alloy pipes], *Titan*, 2009, No 4, pp.19–28.
25. Gorelik, S.S., Dobatkin, S.V., Kaputkina, L.M., *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys], Moscow: MISIS, 2005.

UDC 669.295:621.762:621.791.927.5

FABRICATION OF EXPERIMENTAL SAMPLES BASED ON TITANIUM ALLOY USING WIRE-FEED ELECTRON BEAM AND WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

K.S. OSIPOVICH, Cand Sc. (Eng), A.V. CHUMAEVSKY, Dr Sc (Eng), V.M. SEMENCHUK,
N.N. SHAMARIN, E.A. KOLUBAEV, Dr Sc. (Eng), Yu.V. KUSHNARYOV

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4 Akademicheskoy Ave, 634055 Tomsk, Russian Federation

Received September 2, 2025

Revised November 5, 2025

Accepted November 14, 2025

Abstract—The paper presents experimental samples of titanium alloys fabricated using wire-based electron beam and wire arc additive manufacturing techniques. Some process control methods for defect control were briefly described focusing on factors influencing melt pool dynamics, including control of thermal conditions during 3D printing. A comprehensive analysis of the obtained samples is carried out to determine the most optimal method in terms of defect-free performance, achieving a suitable structure and optimal mechanical properties of titanium alloy-based samples. The specimens WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) exhibit a deposition rate and average mechanical properties approximately 1.5 times higher than those of specimens EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing), although the specimens EBAM demonstrate smoother lateral surfaces. The practical significance lies in identifying the most effective manufacturing approach to enhance the competitiveness of titanium alloy-based products.

Keywords: additive manufacturing, wire-feed electron beam additive technology, wire arc additive technology, titanium alloy, macrostructure, mechanical properties, heat input, deposition strategy

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-81-91

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by grant No 25-19-20142 from the Russian Science Foundation (URL: <https://rscf.ru/project/25-19-20142>) and a grant in the form of a subsidy allocated by the Department of Scientific and Technological Development and Innovation Activity of the Tomsk Region (Agreement No 02/5/2025).

REFERENCES

1. Afonin, V.K., Ermakov, B.S., Lebedev, E.L., Pryakhin, E.I., Samoilov, N.S., Solntsev, Yu.P., Shipsha, V.G., *Metally i splavy* [Metals and alloys]: reference book, St Petersburg: Professional, 2003.
2. Chechulin, B.B., *Titanovye splavy v mashinostroenii* [Titanium alloys in mechanical engineering], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1977.

3. Nikitina, E.V., Frolov, V.A., Stepanov, V.V., Predko, P.Yu., Issledovanie strukturnoi i khimicheskoi neodnorodnosti pri svarke razlichnykh grup metallicheskih materialov [Study of structural and chemical heterogeneity during welding of various groups of metal materials], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2013, No 10, pp. 4–9.
4. Paton, B.E., *Tekhnologiya elektricheskoi svarki metallov i splavov plavleniem* [Technology of Electric Welding of Metals and Alloys by Melting], Moscow: Mashinostroyeniye, 1974.
5. Fuchs, J., Schneider, C., Enzinger, N., Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source, *Weld World*, 2018, V. 62, pp. 267–275. DOI: 10.1007/s40194-017-0537-7
6. Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., et al., Review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, *J. Manuf. Process.*, 2018, V. 35, pp. 127–139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001
7. Gaspar, B., *Microstructural Characterization of Ti-6Al-4V and Its Relationship to Sample Geometry*, San Luis Obispo, CA, USA: Materials Engineering Department, Cal Poly, 2012.
8. Donachie, M.J., *Titanium: A Technical Guide*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 2000.
9. Rafi, H.K., Karthik, N.V., Gong, H., Starr, T.L., Stucker, B.E., Microstructure and Mechanical Properties of Ti₆Al₄V Parts Fabrication by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2013, V. 22, pp. 3872–3883.
10. Collins, P., Brice, D., Samimi, P., Ghamarian, I., Fraser, H., Microstructural control of additively manufactured metallic materials, *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2016, V. 46, pp. 63–91.
11. Barriobero-Vila, P., Artzt, K., Stark, A., Schell, N., Siggel, M., Gussone, J., et al., Mapping the geometry of Ti-6Al-4V: From martensite decomposition to localized spheroidization during selective laser melting, *Scr. Mater.*, 2020, V. 182, pp. 48–52.
12. Tarasov, S.Y., Filippov, A.V., Savchenko, N.L., Fortuna, S.V., Rubtsov, V.E., Kolubaev, E.A., et al., Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, V. 99, pp. 2353–2363. DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0
13. Wang, X., Gong, X., Chou, K., Scanning speed effect on mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy processed by electron beam additive manufacturing, *Procedia Manuf.*, 2015, V. 1, pp. 287–295. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.026
14. Wittenburg, K., Specific instrumentation and diagnostics for high-intensity hadron beams, *CERN Yellow Reports*, 2009, pp. 511–568. DOI: 10.5170/CERN-2013-001.251
15. Gu, D., Meiners, W., Wissenbach, K., Poprawe, R., Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms, *Int. Mater. Rev.*, 2012, V. 62, Iss. 3, pp. 159–207. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014
16. Zadpoor, A.A., Additively manufactured metallic porous biomaterials, *J. Mater. Chem. B.*, 2019, V. 7, pp. 4088–4117. DOI: 10.1039/C9TB00420C
17. Braun, D., Ganor, Y.I., Samuha, S., Guttman, G.M., Chonin, M., Frage, N., et al., A design of experiment approach for development of electron beam powder bed fusion process parameters and improvement of Ti-6Al-4V as-built properties, *J. Manuf. Mater. Process.*, 2022, V. 6, No 4, p. 90. DOI: 10.3390/jmmp6040090

18. Sames, W.J., List, F.A., Dehoff, R.R., Zhang, C., Lowe-Ma, L.E., The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *Int. Mater. Rev.*, 2016, V. 61, pp. 315–360. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649
19. Bourell, D., Kruth, J.P., Leu, M., Nakagawa, T., Rosen, B., Seepersad, M.C., et al., Materials for additive manufacturing, *CIRP Ann.*, 2017, V. 66, pp. 659–681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.005
20. Deb Roy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., et al., Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Prog. Mater. Sci.*, 2018, V. 92, pp. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001
21. Wu, S., Yang, Y., Huang, Y., Han, C., Chen, J., Xiao, Y., et al., Study on powder particle behavior in powder spreading with discrete element method and its critical implications for binder jetting additive manufacturing processes, *Virtual Phys. Prototyp.*, 2023, V. 18, Iss. 1, pp. 1–26. DOI: 10.1080/17452759.2022.2158877
22. Bourell, D., Kruth, J.P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A.M., et al., Materials for additive manufacturing, *CIRP Ann.*, 2017, V. 66, pp. 659–681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009
23. Pinkerton, A.J., Li, L., Direct Additive Laser Manufacturing Using Gas and Water-Atomised H13 Tool Steel Powders, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2005, V. 25, pp. 471–479.
24. Hebert, R.J., Metallurgical Aspects of Powder Bed Metal Additive Manufacturing, *J. Mater. Sci.*, 2016, V. 51, pp. 1165–1175.
25. Semenchuk, V., Nikolaeva, A., et al., Manufacturing of Ti–Al–Zr–Mo–V Alloy Components by Additive Methods, *Russian Physics Journal.*, 2024, No 66 (11), pp. 1180–1188.

UDC 669.018.45:621.78:538.945

HARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF NIOBIUM ALLOYS DOPED WITH TANTALUM, YTTRIUM, HAFNIUM AND ZIRCONIUM, DEPENDING ON ANNEALING TEMPERATURE

K.V. ZOLODUEV¹, M.V. KRAVTSOVA¹, A.S. TSAPLEVA¹, Cand Sc. (Eng), N.V. KONOVALOVA¹, K.O. BAZALEEVA², Cand Sc. (Phys-Math), M.V. ZHELEZNY², Yu. Yu. PONKRATOVA²

¹ A.A. Bochvar High-Technology Scientific Research Institute for Inorganic Materials (JSC VNIINM), 123098 Moscow, Russian Federation. E-mail: kvzoloduev@bochvar.ru

² Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), 6 Miklukho-Maklaya St, 117198 Moscow, Russian Federation. E-mail: bazaleeva-ko@rudn.ru

Received August 14, 2025

Revised September 26, 2025

Accepted October 1, 2025

Abstract—The article presents the results of the study of the microstructure, hardness, and X-ray diffraction characteristics of niobium alloys alloyed with tantalum (Ta), hafnium (Hf), zirconium (Zr), and yttrium (Y) after heat treatment in the temperature range from 500°C to 1200°C for a duration of 1 hour. Alloys with various chemical compositions have been studied: 7.5%Ta–1%Hf, Nb–7.5%Ta–1%Zr and Nb–7.5%Ta–0.2%Zr–0.003%Y. The data obtained make it possible to optimize the heat treatment modes of alloys to achieve the required mechanical properties. It will also improve the manufacturability of Nb₃SN-based superconducting materials.

Keywords: niobium alloys, alloying, recrystallization, microstructure, hardness, heat treatment, superconductor

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-92-101

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank G.A. Zakharova, A.V. Kuznetsova, D.A. Tarkhanova for assistance in preparing samples and discussing the results of the work.

REFERENCES

1. Tarantini, C., Balachandran, S., Heald, S.M., Lee, P.J., Paudel, N., Choi, E.S., Larbalestier, D.C., Ta, Ti and Hf effects on Nb₃Sn high-field performance: temperature-dependent dopant occupancy and failure of Kramer extrapolation, *Superconductor Science and Technology*, 2019, V. 32 (12).
2. Tarantini, C., Sung, Z.H., Lee, P.J., Ghosh, A.K., Larbalestier, D.C., Significant enhancement of compositional and superconducting homogeneity in Ti rather than Ta-doped Nb₃Sn, *Applied Physics Letters*, 2016, V. 108 (4).
3. Paudel, N., et al., Influence of Nb alloying on Nb recrystallization and the upper critical field of Nb₃Sn, *Physical Review Materials*, 2024, No 8 (8).
4. Souza, S.A., et al., Effect of the addition of Ta on microstructure and properties of Ti–Nb alloys, *Journal of alloys and compounds*, 2010, V. 504, No 2, pp. 330–340.
5. Balachandran, S., Tarantini, C., Lee, P.J., Kametani, F., Su, Y.F., Walker, B., Larbalestier, D.C., Beneficial influence of Hf and Zr additions to Nb₄ at. % Ta on the vortex pinning of Nb₃Sn with and without an O source, *Superconductor Science and Technology*, 2019, V. 32 (4).
6. Hu, J.B., et al., The beneficial effect of yttrium microalloying in the solid solution treatment of AISI 321 stainless steel: Grain refinement and inclusions modification, *Materials Today Communications*, 2024, No 38.
7. Li, H.X., et al., Micro-alloying effects of yttrium on the microstructure and strength of silicon carbide joint brazed with chromium-silicon eutectic alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, V. 738, pp. 354–362.
8. Zhao, W., et al., Micro-alloying effects of yttrium on recrystallization behavior of an alumina-forming austenitic stainless steel, *Journal of Iron and Steel Research International*, 2016, V. 23, No 6, pp. 553–558.
9. Park, H., et al., Leaching behavior of copper, zinc and lead from contaminated soil with citric acid, *Materials transactions*, 2013, V. 54, No 7, pp. 1220–1223.
10. Zhang, K., et al., The investigation of magneto-transport properties of PtSb₂ single crystal synthesized by Sb-flux method, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, V. 694, pp. 935–938.
11. Poorganji, B., et al., Effect of yttrium addition on grain growth of α -, β - and $\alpha+\beta$ -titanium alloys, *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, V. 240, No 1, IOP Publishing.
12. Soboleva, T.Yu., Konovalova, N.V., Abdyukhanov, I.M., et al., Issledovanie vliyaniya termicheskoi obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoistva polufabrikatov iz splava NbTa(Zr, Hf, Y), prednaznachennykh dlya izgotovleniya Nb₃Sn sverkhprovodnikov [Study of the effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of semi-finished products made of NbTa (Zr,

Hf, Y) alloy, intended for the production of Nb₃Sn superconductors], *Sverkhprovodimost: fundamentalnye i prikladnye issledovaniya*, 2024, No 2, pp. 42–56.

13. *National standard GOST 2999-75: Metally i splavy. Metod izmereniya tverdosti po Vickersu* [Metals and alloys. Vickers hardness measurement method], Moscow: Izdatelstvo standartov, 2007.

14. Gorelik, S.S., Rastorguev, L.N., Skakov, Yu.A., *Rentgenografichesky i elektronnooptichesky analiz* [X-ray and electron-optical analysis], 2nd ed., Moscow: Metallurgiya, 1970.

15. Gorelik, S.S., Dobatkin, S.V., Kaputkina, L.M., *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys], Moscow: MISIS, 2005, 3rd ed.

16. Bochvar, A.A., *Metallovedenie* [Metal science], Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo literatury po chernoi i tsvetnoi metallurgii, 1956, 5th ed.

17. Abdyukhanov, I.M., Aliev, R.T., Kapleva, A.S., Alekseev, M.V., Peredkova, T.N., Mareev, K.A., Drobyshev, V.A., Kravtsova, M.V., *Issledovanie struktury i mekhanicheskikh svoystv prutkov iz splava Nb-Ta, prednaznachennykh dlya izgotovleniya Nb₃Sn sverkhprovodnikov* [Study of the structure and mechanical properties of Nb–Ta alloy rods intended for the production of Nb₃Sn superconductors], *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Materialovedenie i novye materialy*, 2017, No 4, pp. 24–31.

18. Abdyukhanov, I.M., Saveliev, I.I., Kapleva, A.S., Alekseev, M.V., Dergunova, E.A., Drobyshev, V.A., Kravtsova, M.V., Potapenko, M.M., *Issledovanie vliyaniya termicheskoi obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoystva polufabrikatov iz splava Nb-1% mas. Zr, prednaznachennykh dlya izgotovleniya Nb₃Sn sverkhprovodnikov* [Study of the effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of semi-finished products made of Nb–1% wt. Zr alloy, intended for the production of Nb₃Sn superconductors], *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Materialovedenie i novye materialy*, 2019, No 3, pp. 4–14.

FUNCTIONAL MATERIALS

UDC 549.67:539.217.1

INFLUENCE OF THE DEGREE OF DISPERSION AND PHASE COMPOSITION OF ZEOLITES ON THE CHARACTERISTICS OF THEIR POROUS STRUCTURE

T.R. SHAKIROV¹, A.R. VALEEVA², V.S. DUTOVA², E.M. GOTLIB¹, Dr Sc. (Eng)

¹ *Kazan National Research Technological University (Kazan National Research University), 68 Karl Marx St, 420015 Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation. E-mail: office@kstu.ru, 19gkraikido99@mail.ru*

² *Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KAI), 10 Karl Marx St, 420111 Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation*

Received July 10, 2025

Revised August 11, 2025

Accepted August 12, 2025

Abstract—Zeolites are of interest as fillers for polymers and building materials due to their high thermal, chemical, and mechanical stability. Furthermore, these aluminosilicates have a large specific surface area with a large number of active sites. The mesoporous structure of the zeolites

studied here is characterized by a relatively broad and monomodal pore size distribution with a maximum in the 10–14 nm range, indicating the heterogeneity of the mesopores of these aluminosilicates. Based on an analysis of low-temperature nitrogen adsorption/desorption isotherms, it was found that the porosity of the volcanic zeolite increases with decreasing particle size. The total pore volume in the activated zeolite is almost twice that of the volcanic zeolite, regardless of particle size. This is due to the difference in their phase composition, as the main component of the activated zeolite is calcite, while that of the volcanic zeolite is clinoptilolite.

Keywords: volcanic and activated zeolites, porosity, sorption-desorption curves, hysteresis loop, particle size

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-102-108

REFERENCES

1. Zaharri, N., Othman, N., Optimization of Zeolite as Filler in Polypropylene Composite, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009, No 29 (14), pp. 2211–2226. DOI: 10.1177/0731684409347593
2. Nicoara, A.I., Alecu, A.E., Balaceanu, G.C., Puscasu, E.M., Vasile, B.S., Trusca, R., Fabrication and Characterization of Porous Diopside/Akermanite Ceramics with Prospective Tissue Engineering Applications, *Materials*, 2023, V. 16 (16), pp. 1–15. DOI: 10.3390/ma16165548
3. Panina, A.A., Lygina, T.Z., Gubaidullina, A.M., Nikolaev, K.G., Khalitova, A.N., Issledovanie portlandtsementa s modifitsirovannoi tseolitsoderzhashchei dobavkoi [Study of Portland Cement with a Modified Zeolite Additive], *Stroit. Mat.*, 2013, No 12, pp. 74–75.
4. Davydova, M.L., Diakonov, A.A., Sokolova, M.D., The use of natural zeolite as a modifier of polymer blend based on butadiene-nitrile rubber and ultra-high molecular weight polyethylene, *AIP Conf. Proc.*, 2016, V. 1785. Art. 040072. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4967129>
5. Nasution, H., Harahap, H., Pandia, S.M., Al Fath, T., The effect of filler content on the properties of zeolite particle reinforced unsaturated polyester composites, *AIP Conf. Proc.*, 2020, V. 2267, Art. 020053. URL: <https://doi.org/10.1063/5.00156753rd>
6. Deev, I.S., Zhelezina, G.F., Lonsky, S.L., Kurshev, E.V., Osobennosti formirovaniya mikrostruktury polimernoi matritsy v organoplastike na osnove mnogokomponentnogo epoksidnogo svyazuyushchego [Features of the formation of the polymer matrix microstructure in organoplastics based on a multi-component epoxy binder], *Trudy VIAM*, 2019, No 5, pp. 45–52.
7. Ondrušová, D., Pajtášová, M., L'alíková, S., Bazyláková, T., Olšovský, M., Study of zeolites as filler in the rubber compounds, *Chemické Listy*, 2008, No 102, pp. 733–740.
8. Thamzil, L., Zamroni, H., Penggunaan Zeolit dalam Bidang Industri dan Lingkungan, *Jurnal Zeolit Indonesia*, 2010, V. 1, No 1, pp. 60–67.
9. Tereshkin, I.P., Primenenie tseolitsoderzhashchikh porod dlya izgotovleniya rastvorov na mineralnykh vyazhushchikh [Application of zeolite-containing rocks for making solutions based on mineral binders], *Almanakh sovremennoi nauki i obrazovaniya*, 2013, No 11 (78), pp. 102–105.
10. Ilyina, O.N., Razrabotka konstruktsy dorozhnykh odezhd s primeneniem tseolita Tatarsko-Shatrashanskogo mestorozhdeniya [Development of road clothing structures using zeolite from the Tatar-Shatrashansky deposit], *Vestnik SiBADI/The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2023, V. 20, No 6 (94), pp. 798–807. URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-798-807>

11. Kutarov, V.V., Trasevich, Y.I., Aksenenko, E.V., Ivanova, Z.G., Adsorption hysteresis for a slit-like pore model, *Russian journal of physical chemistry*, 2011, V. 85, No 7, pp. 1222–1227.
12. Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., Sing, K.S.W., Physic sorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution, (IUPAC Technical Report), *Pure Appl. Chem.*, 2015, V. 87 (9–10), pp. 1051–1069.
13. Morozova, L.V., Khamova, T.V., Polyakova, I.G., Vliyanie prekursora na poluchenie i teksturnye svoistva mezoporistykh poroshkov γ -Al₂O₃ [The effect of the precursor on the production and textural properties of mesoporous γ -Al₂O₃ powders], *Neorganicheskie materialy*, 2020, V. 56, No 4, pp. 371–377.
14. Gavrilova, N.N., Nazarov, V.V., *Analiz poristoi struktury na osnove adsorbtsionnykh dannykh* [Analysis of porous structure based on adsorption data]: study guide, Moscow: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2015.
15. Sapchenko, S.A., Barsukova, M.O., Belosludov, R.V., Kovalenko, K.A., Samsonenko, D.G., Poryvaev, A.S., Sheveleva, A.M., Fedin, M.V., Bogomyakov, A.S., Dybtsev, D.N., Schröder, M., Fedin, V.P., Understanding Hysteresis in Carbon Dioxide Sorption in Porous Metal-Organic Frameworks, *Inorg. Chem.*, 2019, V. 58, No 10, pp. 6811–6820. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.9b0001
16. Mamytbekov, G.K., Zheltov, D.A., Milts, O.S., Nurtazin, Y.R., Polymer – Zeolite Composites: Synthesis, Characterization and Application Colloids Interfaces. – 2024. – V. 8 (1), No 8. URL: <https://doi.org/10.3390/colloids8010008>
17. Khludneva, A.S., Karpov, S.I., Ressler, F., Selemenev, V.F., Struktura i sorbtsionnye svoistva mezoporistykh kremnezemov, sintezirovannykh pri varirovani temperature i kremnievoj osnovy [Structure and sorption properties of mesoporous silica synthesized by varying the temperature and silicon base], *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2021, V. 21, No 5, pp. 669–680.

UDC 678.7:621.9.048.7:616–003.93

LASER SINTERING OF POLYLACTIC ACID POLYMER MICROPARTICLES: DEPENDENCE ON MOISTURE CONTENT

V.I. YUSUPOV¹, E.D. MINAEVA¹, Cand. Sc. (Phys-Math), T.N. POPYRINA^{2, 3}, I.V. LUNYOV^{2, 4},
T.S. DEMINA^{2, 3, 5}, N.V. MINAEV¹, Cand. Sc. (Eng)

¹ *Institute of Photon Technologies, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonic, NRC "Kurchatov Institute", 1 Akademika Kurchatova Sq, 123182 Moscow, Russian Federation.
E-mail: minaeva.e.d@bk.ru*

² *Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Highway, 125993 Moscow,
Russian Federation*

³ *N. Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials of the Russian Academy of Sciences, 70 Profsoyuznaya St, 117393 Moscow, Russian Federation*

⁴ National Research Nuclear University (MEPhI), 31 Kashirskoe Highway,
115409 Moscow, Russian Federation

⁵ I. Sechenov First Moscow State Medical University – Institute of Regenerative Medicine,
8 Trubetskaya St, 119048 Moscow, Russian Federation

Received July 2, 2025

Revised August 8, 2025

Accepted September 4, 2025

Abstract—Using surface-selective laser sintering, samples of biocompatible and bioresorbable polylactide microparticles with varying moisture contents were fabricated: lyophilized, untreated, with a wetted surface, and with a chitosan hydrophilic coating. The surface morphology of the resulting polymer structures was studied. Sintering was performed by laser with a wavelength of $\lambda = 1.96 \mu\text{m}$ and an energy density of 6–22 J/cm². Increasing the energy density resulted in increased layer thickness, increased sintering, and decreased porosity. Chitosan-coated microparticles sintered at 22 J/cm² demonstrated the best results in terms of stability for tissue engineering.

Keywords: laser sintering, surface-selective laser sintering, heat sensitizer, polylactide, water content

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-109-118

ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out as part of a government assignment to the Kurchatov Institute National Research Center. The synthesis of chitosan and its application to polylactide particles was supported by the Ministry of Science and Higher Education (subject number FFSM-2025-0001).

REFERENCES

1. Langer, R., Vacanti, J.P., Tissue Engineering, *Science*, 1993, V. 260, No 5110, pp. 920–926.
2. Stratton, S., Shelke, N.B., Hoshino, K., Rudraiah, S., Kumbar, S.G., Bioactive polymeric scaffolds for tissue engineering, *Bioact. Mater.*, 2016, V. 1, No 2, pp. 93–108.
3. Sevastianov, V.I., Technologies of tissue engineering and regenerative medicine, *Russ. J. Transplantology Artif. Organs.*, 2014, No 3.
4. Mani, M.P., Sadia, M., Jaganathan, S.K., Khudzari, A.Z., Supriyanto, E., Saidin, S., Ramakrishna, S., Ismail, A.F., Faudzi, A.A.M., A review on 3D-printing in tissue engineering applications, *J. Polym. Eng.*, 2022, V. 42, No 3, pp. 243–265.
5. Li, X., Lin, Y., Liu, M., Meng, L., Li, C., A review of research and application of polylactic acid composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2023, V. 140, No 7.
6. Jadhav, A., Jadhav, V.S., A review on 3D-printing: An additive manufacturing technology // *Mater. Today Proc.*, 2022, V. 62, pp. 2094–2099.
7. Charoo, N.A., Barakh, Ali, S.F., Mohamed, E.M., Kuttolamadom, M.A., Ozkan, T., Khan, M.A., Rahman, Z., Selective laser sintering 3D-printing – an overview of the technology and pharmaceutical applications, *Drug Dev. Ind. Pharm.*, 2020, V. 46, No 6, pp. 869–877.
8. Patent RU 150514U1: *Ustanovka dlya formirovaniya biosovmestimyykh struktur* [Installation for the formation of biocompatible structures], Bagratashvili, V., Antonov, E., Popov, V., Yusupov, V., Appl. 24.12.2013. Publ. 20.02.2015.

9. Antonov, E.N., Krotova, L.I., Minaev, N.V., Minaeva, S.A., Mironov, A.V., Popov, V.K., Bagratashvili, V.N., Surface-selective laser sintering of thermolabile polymer particles using water as heating sensitizer, *Quantum Electron.*, 2015, V. 45, No 11, pp. 1023–1028.
10. Minaev, N.V., Antonov, E.N., Minaeva, S.A., Churbanov, S.N., Ustanovka dlya issledovaniya protsessov poverkhnostno-selektivnogo lazernogo spekaniya poroshkovykh biosovmestimyykh materialov [Installation for studying surface-selective laser sintering of powder biocompatible materials], *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2019, No 1, pp. 150–152.
11. Minaev, N.V., Demina, T.S., Minaeva, S.A., Dulyasova, A.A., Minaeva, E.D., Gonchukov, S.A., Akopova, T.A., Timashev, P.S., The Evolution of Surface-Selective Laser Sintering: Modifying and Forming 3D-Structures for Tissue Engineering, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2020, V. 84, No 11, pp. 1315–1320.
12. Demina, T.S., Frolova, A.A., Istomin, A.V., Kotova, S.L., Piskarev, M.S., Bardakova, K.N., Yablokov, M.Y., Altynov, V.A., Kravets, L.I., Gilman, A.B., Akopova, T.A., Timashev, P.S., Coating of polylactide films by chitosan: Comparison of methods, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2020, V. 137, No 3.
13. Rogovina, S.Z., Akopova, T.A., Vikhoreva, G.A., Investigation of properties of chitosan obtained by solid-phase and suspension methods, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1998, V. 70, No 5, pp. 927–933.
14. Demina, T.S., Popyrina, T.N., Minaeva, E.D., Dulyasova, A.A., Minaeva, S.A., Tilkin, R., Yusupov, V.I., Grandfils, C., Akopova, T.A., Minaev, N.V., Timashev, P.S., Polylactide microparticles stabilized by chitosan graft-copolymer as building blocks for scaffold fabrication via surface-selective laser sintering, *J. Mater. Res. Springer International Publishing*, 2022, V. 37, No 4, pp. 933–942.
15. Goodridge, R.D., Tuck, C.J., Hague, R.J.M., Laser sintering of polyamides and other polymers, *Prog. Mater. Sci.*, 2012, V. 57, No 2, pp. 229–267.
16. Bradley, D., Roth, G., Adaptive Thresholding using the Integral Image, *J. Graph. Tools*, 2007, V. 12, No 2, pp. 13–21.
17. Padilla-Martinez, J.P., Berrospe-Rodriguez, C., Aguilar, G., Ramirez-San-Juan, J.C., Ramos-Garcia, R., Optic cavitation with CW lasers: A review, *Phys. Fluids.*, 2014, V. 26, No 12.
18. Yusupov, V., Osobennosti lazeroindutsirovannoi termokavitatsii vody [Features of laser-induced water thermocavitation], *Akustichesky zhurnal*, 2024, V. 70, No 6, pp. 828–837.
19. Minaeva, E.D., Minaev, N.V., Popyrina, T.N., Demina, T.S., Ignatieva, N.Yu., Zakharkina, O.L., Yusupov, V.I., O mekhanizme lazernogo spekaniya polimernykh struktur s ispolzovaniem vody [On the mechanism of laser sintering of polymer structures using water], *Optics and spectroscopy*, 2025, V. 133, No 10, pp. 1041–1044.
20. Antonov, E.N., Dunaev, A.G., Kononov, A.N., Minaeva, S.A., Popov, V.K., Temperature field distribution in polymer particles during surface-selective laser sintering, *Laser Phys.*, 2020, V. 30, No 5.

STRUCTURAL AND ELECTROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF CARBON-SILICON-CONTAINING MATERIALS: SELECTION OF ELECTRODES FOR USE IN SUPERCAPACITORS

I.Yu. BOGUSH¹, Cand Sc. (Eng), N.K. PLUGOTARENKO¹, Cand Sc. (Eng),

T.N. MYASOEDOVA¹, Cand Sc. (Eng), S.P. NOVIKOV², Cand Sc. (Eng)

¹ Southern Federal University, 2 Shevchenko St, 347928 Taganrog, Russian Federation.

E-mail: inlys@sfedu.ru

² Don State Technical University, 1 Gagarin Sq, 344003 Rostov-on-Don, Russian Federation

Received July 16, 2025

Revised August 11, 2025

Accepted August 14, 2025

Abstract—The paper presents a comprehensive approach to selecting carbon-silicon electrodes for use in supercapacitors. Using Raman spectroscopy, density functional theory, and porosity analysis, the structural characteristics of electrode materials synthesized by electrochemical deposition are studied. Approaches based on the identified relationships between structural and functional characteristics are proposed for the initial selection of electrodes. The effectiveness of the method is confirmed by comparing the functional characteristics of the selected electrodes with existing analogs. It is shown that electrodes selected using the developed method outperform their analogs in terms of capacitance values and capacity retention with the shortest discharge time.

Keywords: porous electrodes, carbon-silicon materials, stability, selection method, supercapacitors

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-119-129

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FENW-2025-0003).

REFERENCES

1. Conway, B.E., *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*, Plenum Publishers, 2013.
2. Sethuraman, S., Suchakree, T., Montree, S., Influence of structures and functional groups of carbon on working potentials of supercapacitors in neutral aqueous electrolyte: In situ differential electrochemical mass spectrometry, *Journal of Energy Storage*, 2020, V. 29.
3. Chen, X., Jing, C., Fu, X., et al., In-situ fabricating MnO₂ and its derived FeOOH nanostructures on mesoporous carbon towards high-performance asymmetric supercapacitor, *Applied Surface Science*, 2020, V. 503. P. 144123.
4. Suss, M.E., Baumann, T.F., Worsley, M.A., Rose, K.A., Jaramillo, T.F., Stadermann, M., Santiago, J.G., Impedance-based study of capacitive porous carbon electrodes with hierarchical and bimodal porosity, *Journal of Power Sources*, 2013, V. 241, pp. 266–273.
5. McLean, A., Halper, M., Ellenbogen, J., *Supercapacitors: A Brief Overview*, Virginia: MITRE Nanosystems Group, 2006.

6. Zhuang, H., Yang, N., Zhang, L., Fuchs, R., Jiang, X., Electrochemical properties and applications of nanocrystalline, microcrystalline, and epitaxial cubic silicon carbide films, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, V. 7 (20), pp. 10886–10895.
7. Volkovich, Yu.M., Elektrokhimicheskie superkondensatory [Electrochemical Supercapacitors]: overview, *Elektrokhimiya*, 2021, V. 57, No 4, pp. 197–238.
8. Javed, M.S., Ahmad Shah, S.S., Hussain, S., et al., Mesoporous manganese-selenide microflowers with enhanced electrochemical performance as a flexible symmetric 1.8 V supercapacitor, *Chemical Engineering Journal*, 2020, V. 382.
9. Suárez, L., Barranco, V., Centeno, T.A., Impact of carbon pores size on ionic liquid based-supercapacitor performance, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, V. 588, pp. 705–712.
10. Li, S.M., Yang, K., Ya, P., Ma, K.R., Zhang, Z., Huang, Q., Three-dimensional Porous Carbon/Co₃O₄ Composites Derived from Graphene/Co–MoF for High Performance Supercapacitor Electrodes, *Appl. Surf. Sci.*, 2020, V. 503.
11. Noh, J., Yoon, C.M., Kim, Y.K., Jang, J., High Performance Asymmetric Supercapacitor Twisted from Carbon Fiber/MnO₂ and Carbon Fiber/MoO₃, *Carbon*, 2017, V. 116, pp. 470–478.
12. Cai, W.R., Kankala, R.K., Xiao, M.T., Zhang, N., Zhang, X.Q., Three-dimensional Hollow N-doped ZIF-8-derived Carbon@MnO₂ Composites for Supercapacitors, *Appl. Surf. Sci.*, 2020, V. 528.
13. Huang, R., Zhou, R.H., Wang, L., Zhu, Y.M., Dandelion-like CoO/Co₃O₄/Carbon Composites as Anode Materials for a High-Performance Lithium Ion Battery, *Chemistry Select*, 2020, V. 5, pp. 12932–12939.
14. Wang, X.N., Zhan, J., Sun, X.Q., et al., Biological Cell Template Synthesis of Nitrogen-doped Porous Hollow Carbon Spheres/MnO₂ Composites for High-performance Asymmetric Supercapacitors, *Electrochim. Acta*, 2019, V. 296, pp. 907–915.
15. Ming, H., Fei, I., Fan, D., Zhang Y.X., MnO₂-based nanostructures for high-performance supercapacitors, *J. Mater. Chem. A*, 2015, V. 3, pp. 21380–21423.
16. Solyanikova, A.S., et al., Kompozitnye elektrody elektrokhimicheskikh kondensatorov na osnove uglerodnykh materialov razlichnoi strukturi [Composite electrodes of electrochemical capacitors based on carbon materials of various structures], *Elektrokhimiya*, 2014, V. 50, No 5, pp. 470–479.
17. Grigoriev, F.V., Sulimov, V.B., Tikhonravov, A.V., Molekulyarno-dinamicheskoe mode-lirovanie napileniya tonkikh materialov elektrodov, sostoyashchikh iz sloev s chereduyushcheisya plotnostyu [Molecular dynamic simulation of the deposition of thin electrode materials consisting of layers with alternating density], *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 2020, V. 94, No 5, pp. 754–759.
18. Bertrand, N., Sabatier, J., Briat, O., Vinassa, J., Embedded Fractional Nonlinear Supercapacitor Model and Its Parametric Estimation Method, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, V. 57, pp. 3991–4000.
19. Noya, L., Tanaka, T., Watanabe, H., Shitanda, I., Itagaki, M., Electrochemical impedance simulation of porous electrodes with variously shaped pores using 3-dimensional finite element method, *Electrochimica Acta*, 2023, V. 440.

20. Plugotarenko, N.K., Myasoedova, T.N., Bogush, I.Yu., The effect of the electrolyte concentration on the charge transfer at the electrolyte/silicon-carbon interface: Electrochemical impedance spectrometry study, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, V. 135, Art. 106121.
21. Myasoedova, T.N., Mikhailova, T.S., Grigoriev, M.N., Effect of nickel and manganese doping on the structure, morphology and the electrochemical performance of the silicon-carbon film, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, V. 855.
22. Grigoriev, M.N., Mikhailova, T.S., Myasoedova, T.N., Poluchenie uglerodnykh kremniisoderzhashchikh elektrodov na elektroprovodyashchei i dielektricheskoi podlozhkakh metodom elektrokhi-micheskogo osazhdeniya [Preparation of carbon-silicon electrodes on electrically conductive and dielectric substrates by electrochemical deposition], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2018, No 7 (201), pp. 56–66.
23. Bogush, I.Yu., Plugotarenko, N.K., Myasoedova, T.N., Study of Functional Characteristics of Mesoporous Electrodes of Supercapacitors Based on Silicon–Carbon Films, *Technical Physics*, 2024, V. 69, No 4, pp. 800–811. DOI: 10.1134/S1063784224030034
24. Bogush, I.Yu., Plugotarenko, N.K., Issledovanie kharakteristik elektrodov superkondensatorov na osnove legirovannykh kremnii-uglerodnykh plenok [Study of the characteristics of supercapacitor electrodes based on doped silicon-carbon films], *Izv. Rossiiskoi akademii nauk. Ser. fizicheskaya*, 2023, V. 87, No 6, pp. 833–837. DOI: 10.31857/S0367676523701442
25. Bogush, I.Yu., Plugotarenko, N.K., Myasoedova, T.N., Ptashnik, V.V., Physicochemical properties of silicon-carbon films obtained by electrochemical deposition, *Letters on Materials*, 2023, V. 13, No 1 (49), pp. 39–44. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-1-39-44

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

UDC [669.71+678.067.5]:620.178.7

EVALUATION OF THE RESISTANCE OF LAMINATED ALUMINUM-FIBERGLASS PLASTICS TO IMPACT LOADS

V.V. ANTIPOV¹, Dr Sc. (Eng), M.S. OGLODKOV², Cand Sc. (Eng), A.A. SELIVANOV², Cand Sc. (Eng), S.V. SAMOKHVALOV², Yu.N. NEFEDOVA²

¹ NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

² National Research Center “Kurchatov Institute” – VIAM, 17 Radio St, 105005 Moscow, Russian Federation. E-mail: admin@viam.ru

Received August 8, 2025

Revised October 29, 2025

Accepted October 30, 2025

Abstract—The results of impact resistance tests on laminated aluminum-fiberglass reinforced plastics are presented. Methods for comparative impact testing are examined, the impact resistance of various composites of SIAL-grade aluminum-fiberglass reinforced plastics is assessed, and the influence of several structural factors on impact resistance is studied, along with a microanalysis of the fracture pattern. The conducted research allowed us to define criteria for assessing the behavior

of aluminum-fiberglass reinforced plastics under impact, namely: impact energy for varying degrees of damage, residual strength, mechanical properties, damage pattern, and fracture pattern during microstructural analysis.

Keywords: SIAL, impact resistance, aluminum-fiberglass, GLARE, microstructure, impact damage

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-130-142

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out within the framework of the “Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030” (6.2: Layered crack-resistant high-strength metal-polymeric materials).

REFERENCES

1. Roebroeks, G., GLARE features, *Fibre Metal Laminates*, Vlot, A., Gunnink, J.W. (Eds.), Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 23–37.
2. Zerong, D., Wang, H., Luo, J., Li, N., A review on forming technologies of fiber metal laminates, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2021, No 4, pp. 110–126.
3. Trzepieciński, T., Najm, S.M., Sbayti, M., Belhadjsalah, H., Szpunar, M., Lemu, H.G., New advances and future possibilities in forming technology of hybrid metal–polymer composites used in aerospace applications, *Journal of Composites Science*, 2021, V. 5, No 8, Art. No 217.
4. Hagenbeek, M., Impact properties, *Fibre Metal Laminates*, Vlot, A., Gunnink, J.W. (Eds.), Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 409–426.
5. Vlot, A., Vogelesang, L.B., De Vries, T.J., Towards application of fibre metal laminates in large aircraft, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1999, V. 71, No 6, pp. 558–570.
6. Antipov, V.V., Serebrennikova, N.Yu., Shestov, V.V., Sidelnikov, V.V., Sloistye gibridnye materialy na osnove listov iz alyuminy-litievyykh splavov [Layered hybrid materials based on aluminum-lithium alloy sheets], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2017, No S, pp. 212–224. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-212-224
7. Zichenkov, M.Ch., Shanygin, A.N., Gibridnye aviakonstruktsii novogo pokoleniya dlya perspektivnykh grazhdanskikh samoletov [New generation hybrid aircraft structures for advanced civilian aircraft], *Polet*, 2018, No 11, pp. 106–114.
8. Kablov, E.N., Innovatsionnye razrabotki FGUP VIAM GNTs RF po realizatsii Strategicheskikh napravleniy razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [Innovative developments by FSUE VIAM of the National Research Center of the Russian Federation for the implementation of the Strategic Directions for the Development of Materials and Technologies for Their Processing for the Period up to 2030], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, No 1, pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
9. Podzhivotov, N.Yu., Kablov, E.N., Antipov, V.V., Serebrennikova, N.Yu., Erasov, V.S., Abdullin, M.R., Limonin, M.V., Sloistye metallopolimernye materialy v elementakh konstruktsii vozdushnykh sudov [Layered metal-polymer materials in aircraft structural elements], *Perspektivnye materialy*, 2016, No 10, pp. 5–19.

10. Fridlyander, I.N., Sovremennyye alyuminievye, magnievye splavy i kompozitsionnyye materialy na ikh osnove [Modern aluminum, magnesium alloys, and composite materials based on them], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2002, No 7, pp. 24–29.
11. Duyunova, V.A., Nechaikina, T.A., Oglodkov, M.S., Yakovlev, A.L., Leonov, A.A., Perspektivnye razrabotki v oblasti legkikh materialov dlya sovremennoi aviakosmicheskoi tekhniki [Promising developments in lightweight materials for modern aerospace technology], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2018, No 4, pp. 28–43.
12. Antipov, V.V., Zaitsev, M.D., Rodchenko, T.S., Stoida, Yu.M., Serebrennikova, N.Yu., Sidelnikov, V.V., Issledovanie dolgovechnosti konstruktivno-podobnogo obraztsa paneli fyuzelyazha s obshivkoi iz alyumostekloplastika [Study of the durability of a structurally similar fuselage panel with aluminosilicate], *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2021, No 3, pp. 18–24.
13. Sidelnikov, V.V., Anikhovskaya, L.I., Senatorova, O.G., Lyamin, A.B., et al., Impact Behaviour of SIAL (Glass/Epoxi-Aluminum) Laminates, *Proceedings of the 7th International Conference ICAA7*, held in Charlottesville, Virginia, April 9–14, 2000, pp. 1221–1224.
14. Fridlyander, I.N., Chuistov, K.V., Berezina, A.L., Kolobnev, N.I., *Alyuminy-litievyye splavy struktura i svoystva* [Aluminum-lithium alloys: structure and properties], Kiev: Naukova dumka, 1992.
15. Lavrov, A.V., Erasov, V.S., Podzhivotov, N. Yu., Avtaev, V.V., Optimizatsiya struktury gibridnykh kompozitsionnykh materialov aviatsionnogo naznacheniya [Optimization of the structure of hybrid composite materials for aviation applications], *Trudy VIAM*, 2016, No 11 (47), pp. 56–62: URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 03.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-7-7
16. Kablov, E.N., Minakov, V.T., Anikhovskaya, L.I., Klei i materialy na ikh osnove dlya remonta konstruktsiy aviatsionnoi tekhniki [Adhesives and materials based on them for repairing aircraft structures], *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*, 2002, No 1, pp. 61–65.
17. Dementieva, L.A., Serezhenkov, A.A., Bocharova, L.I., Anikhovskaya, L.I., Lukina, N.F., Kompozitsionnyye materialy kleevye na osnove steklyannykh i uglerodnykh napolnitelei [Adhesive composite materials based on glass and carbon fillers], *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2009, No 1, pp. 24–27.
18. Dementieva, L.A., Serezhenkov, A.A., Bocharova, L.I., Lukina, N.F., Kutsevich, K.E., Petrova, A.P., Svoystva kompozitsionnykh materialov na osnove kleevykh prepregov [Properties of composite materials based on adhesive prepregs], *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2012, No 6, pp. 19–24.
19. Donetskyy, K.I., Bystrikova, D.V., Karavaev, R.Yu., Timoshkov, P.N., Polimernyye kompozitsionnyye materialy dlya sozdaniya elementov transmissii aviatsionnoi tekhniki [Polymer composite materials for creating transmission elements for aviation equipment]: a review, *Trudy VIAM*, 2020, No 3, pp. 82–93. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 03.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93
20. Serpova, V.M., Sidorov, D.V., Nyafkin, A.N., Kurbatkina, E.I., Gibridnyye metallicheskie kompozitsionnyye materialy na osnove alyuminievykh splavov [Hybrid metal

- composite materials based on aluminum alloys]: a review, *Trudy VIAM*, 2021, No 3, pp. 68–77. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 05.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-68-77
21. Slavin, A.V., Silkin, A.N., Grinevich, D.V., Yakovlev, N.O., Kompozitsionnye materialy s obiemno-armirovannoi strukturoi [Composite materials with a three-dimensional reinforced structure] a review, *Trudy VIAM*, 2022, No 8, pp. 113–122. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 05.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122
22. Erasov, V.S., Sibae, I.G., Sutubalov, A.I., Ispytaniya obraztsov iz kompozitsionnykh materialov na rastyazhenie [Tensile testing of composite materials], *Trudy VIAM*, 2023, No 12, pp. 98–114. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date 10.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-98-114
23. Oglovkov, M.S., Romanenko, V.A., Benarieb, I., Rudchenko, A.S., Grigoriev, M.V., Issledovanie promyshlennykh polufabrikatov iz perspektivnykh alyuminy-litievnykh splavov dlya aviatsionnoi tekhniki [Research on industrial semi-finished products made of promising aluminum-lithium alloys for aviation equipment], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2023, No 3, pp. 62–77. URL: <http://www.journal.viam.ru> (reference date 10.19.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-62-77
24. Artemiev, Yu.G., K novoi klassifikatsii dinamicheskikh metodov kontrolya tverdosti [To the new classification of dynamic hardness testing methods], *Zavodskaya laboratoriya*, 1996, V. 62, No 6, pp. 48–52.

UDC 678.7:621.777.4

EFFECT OF DISPERSED FILLER CONTENT IN A POLYPHENYLENE SULFIDE-BASED COMPOSITE ON THE PROPERTIES OF SAMPLES OBTAINED BY 3D-PRINTING

I.S. LARIONOV^{1,2}, D.A. BALKAEV¹, Cand Sc. (Chem), K.S. ZIMIN^{1,2},

I.S. ANTIPIN¹, Dr Sc. (Chem), L.M. AMIROVA², Dr Sc. (Chem), V.V. VOLKOV³

¹ Kazan (Volga Region) Federal University, 18 Kremlevskaya St, 420008 Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation. E-mail: larionov_igor1999@mail.ru

² A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University (KAI), 10 Karl Marx St, 420111 Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

³ Institute of Petrochemical Synthesis named after A.V. Topchiev RAS 29, Bld 5 Leninsky Ave, 119991 Moscow, Russian Federation

Received July 2, 2025

Revised August 4, 2025

Accepted August 7, 2025

Abstract—Polyphenylene sulfide (PPS) becomes more widespread due to its unique physicochemical and thermal properties, combined with its low cost and the ability to be used in 3D-printing. The creation of PPS-based compositions is a good way to obtain a high level of printed article properties. In this work, PPS-based filaments were obtained and the properties of the products printed by them were studied. Ten different filaments containing glass fibers, quartz flour or combinations thereof were prepared by extrusion. Filaments are printed for tensile tests, Izod impact strength without notch and bending temperature under load. Based on the test results,

the most optimal filament formulation was selected, as well as the properties of filaments of other compositions were analyzed.

Keywords: polyphenylene sulfide, glass fiber, quartz flour, FDM-printing, composition, filament, mechanical properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-143-153

ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant number 24-63-00026), URL: <https://www.rscf.ru/en>

REFERENCES

1. Rahate, A.S., Nemade, K.R., Waghuley, S.A., Polyphenylene sulfide (PPS): state of the art and applications, *Reviews in Chemical Engineering*, 2013, V. 29, No 6, pp. 471–489.
2. Zuo, P., Tcharkhtchi, A., Shirinbayan, M., Fitoussi, J., Bakir, F., Overall investigation of poly(phenylene sulfide) from synthesis and process to applications – a review, *Macromolecular Materials and Engineering*, 2019, V. 304, No 5.
3. Chen, G., Mohanty, A.K., Misra, M., Progress in research and applications of polyphenylene sulfide blends and composites with carbons, *Composites Part B: Engineering*, 2021, V. 209.
4. Zhao, L., Yu, Y., Huang, H., Yin, X., Peng, J., Sun, J., Huang, L., Tang, Y., Wang, L., High-performance polyphenylene sulfide composites with ultra-high content of glass fiber fabrics, *Composites Part B: Engineering*, 2019, V. 174.
5. Stoeffler, K., Andjelic, S., Legros, N., Roberge, J., Schougaard, S.B., Polyphenylene sulfide (PPS) composites reinforced with recycled carbon fiber, *Composites Science and Technology*, 2013, V. 84, pp. 65–71.
6. Wu, D., Wu, L., Zhou, W., Yang, T., Zhang, M., Study on physical properties of multi-walled carbon nanotube/poly(phenylene sulfide) composites, *Polymer Engineering & Science*, 2009, V. 49, No 9, pp. 1727–1735.
7. Zhai, H., Zhou, X., Fang, L., Lu, A., Study on mechanical properties of powder impregnated glass fiber reinforced poly(phenylene sulphide) by injection molding at various temperatures, *Journal of applied polymer science*, 2010, V. 115, No 4, pp. 2019–2027.
8. Manjunath, A., Manjushree, H., Nagaraja, K., Pranesh, K., Role of E-glass fiber on mechanical, thermal and electrical properties of polyphenylene sulfide (PPS) composites, *Materials Today: Proceedings*, 2022, V. 62, pp. 5439–5443.
9. El Magri, A., Vaudreuil, S., El Mabrouk, K., Touhami, M.E., Printing temperature effects on the structural and mechanical performances of 3D-printed Poly-(phenylene sulfide) material, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, V. 783, IOP Publishing.
10. Pan, S., Shen, H., Zhang, L., Effect of carbon nanotube on thermal, tribological and mechanical properties of 3D-printing polyphenylene sulfide, *Additive Manufacturing*, 2021, V. 47.
11. Verdejo de Toro, E., Coello Sobrino, J., Martínez Martínez, A., Miguel Eguía, V., Ayllón Pérez, J., Investigation of a short carbon fibre-reinforced polyamide and comparison of two manufacturing processes: Fused Deposition Modelling (FDM) and polymer injection moulding (PIM), *Materials*, 2020, V. 13, No 3.

12. Doshi, M., Mahale, A., Singh, S.K., Deshmukh, S., Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D-printed Parts: Perspective and prospects, *Materials Today: Proceedings*, 2022, V. 50, pp. 2269–2275.
13. Ismail, K.I., Yap, T.C., Ahmed, R., 3D-printed fiber-reinforced polymer composites by fused deposition modelling (FDM): fiber length and fiber implementation techniques, *Polymers*, 2022, V. 14, No 21.
14. Thomas, S.P., Interaction of silica with polystyrene: mechanical properties, polymer/filler adhesion and failure behavior, *Chimica Techno Acta*, 2024, V. 11, No 1. Art. 202411105
15. Seki, Y., Kizilkan, E., Leskeri, B.M., Sarikanat, M., Altay, L., Isbilir, A., Comparison of the Thermal and Mechanical Properties of Poly (phenylene sulfide) and Poly (phenylene sulfide)–Syndiotactic Polystyrene-Based Thermal Conductive Composites, *ACS omega*, 2022, V. 7, No 49, pp. 45518–45526.
16. Wu, Y., Liu, Q., Heng, Z., Zou, H., Chen, Y., Liang, M., Improved mechanical properties of graphene oxide/short carbon fiber-polyphenylene sulfide composites, *Polymer Composites*, 2019, V. 40, No 10, pp. 3866–3876.
17. Kariz, M., Sernek, M., Obućina, M., Kuzman, M.K., Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts, *Materials Today Communications*, 2018, V. 14, pp. 135–140.
18. Wang, P., Zou, B., Ding, S., Huang, C., Shi, Z., Ma, Y., Yao, P., Preparation of short CF/GF reinforced PEEK composite filaments and their comprehensive properties evaluation for FDM-3D printing, *Composites Part B: Engineering*, 2020, V. 198.
19. Zuo, P., Fitoussi, J., Shirinbayan, M., Bakir, F., Tcharkhtchi, A., Thermal aging effects on overall mechanical behavior of short glass fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites, *Polymer Engineering & Science*, 2019, V. 59, No 4, pp. 765–772.
20. Kenny, J.M., Maffezzoli, A., Crystallization kinetics of poly (phenylene sulfide) (PPS) and PPS/carbon fiber composites, *Polymer Engineering & Science*, 1991, V. 31, No 8, pp. 607–614.
21. Luo, G., Li, W., Liang, W., Liu, G., Ma, Y., Niu, Y., Li, G., Coupling effects of glass fiber treatment and matrix modification on the interfacial microstructures and the enhanced mechanical properties of glass fiber/polypropylene composites, *Composites Part B: Engineering*, 2017, V. 111, pp. 190–199.
22. Oshima, S., Higuchi, R., Kato, M., Minakuchi, S., Yokozeki, T., Aoki, T., Cooling rate-dependent mechanical properties of polyphenylene sulfide (PPS) and carbon fiber reinforced PPS (CF/PPS), *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, V. 164.
23. Zhuang, Y., Zou, B., Ding, S., Wang, P., Shear and tensile behaviors of fiber-reinforced resin matrix composites printed by the FDM technology, *Coatings*, 2022, V. 12, No 7.
24. Garmabi, M.M., Shahi, P., Tjong, J., Sain, M., 3D printing of polyphenylene sulfide for functional lightweight automotive component manufacturing through enhancing interlayer bonding, *Additive Manufacturing*, 2022, V. 56.
25. Bahadur, S., Sunkara, C., Effect of transfer film structure, composition and bonding on the tribological behavior of polyphenylene sulfide filled with nano particles of TiO₂, ZnO, CuO and SiC, *Wear*, 2005, V. 258, No 9, pp. 1411–1421.

STUDY OF THE COMPATIBILITY OF SUPERSTRUCTURAL THERMOPLASTICS WITH POLYAMIDE ACID-BASED FINISHING AGENTS

K.S. EVDOKIMOVA¹, D.S. ALEXANDROVA¹, Cand Sc. (Chem), A.S. EGOROV¹,
N.D. KHRAMOV¹, A.L. ANDREICHEV², A.A. VYEVYERIS², A.A. DELIBALT², P.I. NECHAEVA²,
A.G. KULIOVA², A.A. TSYPAKIN², E.A. KAPAEVA¹

¹ National Research Center "Kurchatov Institute", 1 Akademika Kurchatova Sq, 123182 Moscow,
Russian Federation

² Rosatom composite technologies LLC, 5, bld. 13 Volgogradsky Ave, 125167 Moscow, Russian
Federation. E-mail: gudeeva@irea.org.ru

Received September 17, 2025

Revised October 6, 2025

Accepted October 10, 2025

Abstract—The compatibility of finishing composites based on polyamide acids of various structures with superstructural polymers, polyphenylene sulfide (PPS) and polysulfone (PSF), was studied. The adhesion strength of composites based on finished fiber and PPS, and finished fiber and PSF, was determined experimentally using the pull-out method. Test results showed that the experimental samples were comparable in strength to composites obtained from fiber treated with commercially available finishing compounds. The maximum adhesion (interfacial) shear strength was 103.8 MPa for the PPS matrix and 87.6 MPa for the PSF matrix.

Keywords: carbon fiber, finishing composites, polyphenylene sulfide, polysulfone, superstructural thermoplastics, continuous carbon fiber composites

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-154-165

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Comprehensive Scientific and Technical Program of the Full Innovation Cycle "New Composite Materials: Design and Production Technologies" (in accordance with the Agreement on the provision of subsidies from the federal budget, including grants in the form of subsidies, to legal entities, individual entrepreneurs, and individuals dated February 27, 2025, No 075-11-2025-008).

REFERENCES

1. Kemmish, D.J., *Practical guide to high performance engineering plastics*, Smithers Rapra, 2011.
2. Morikawa, A., *High performance polymers and engineering plastics, Synthesis and characterization of novel polyimides*, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. 205–242.
3. *Sustainable Biopolymer Composites: Biocompatibility, Self-Healing, Modeling, Repair and Recyclability*, Verma, D., et al. (Eds.), Woodhead Publishing, 2021.
4. Simões, S., *High-performance advanced composites in multifunctional material design: State of the art, challenges, and future directions*, *Materials*, 2024, V. 17, No 23.
5. Krauklis, A.E., et al., *Composite material recycling technology—state-of-the-art and sustainable development for the 2020s*, *Journal of Composites Science*, 2021, V. 5, No 1.

6. Oladele, I.O., Omotosho, T.F., Adediran, A.A., Polymer-based composites: an indispensable material for present and future applications, *International Journal of Polymer Science*, 2020, V. 2020, No 1.
7. Ibatullina, A.R., Sergeeva, Ye.A., Obzor sovremennykh metodov regulirovaniya svoistv kompozitsionnykh materialov (KM) na osnove termoreaktivnykh napolnitelei, armirovannykh visokoprochnymi visokomodulnymi voloknami [Overview of modern methods for regulating the properties of composite materials (CM) based on thermosetting fillers reinforced with high-strength high-modulus fibers], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, No 9, V. 16, pp. 123–126.
8. Dvir, H., et al., Estimation of Polymer–Surface Interfacial Interaction Strength by a Contact AFM Technique, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, V. 304, pp. 58–64.
9. Beaumont, P.W.R., Soutis, C., Hodzic, A., *The structural integrity of carbon fiber composites: fifty years of progress and achievement of the science, development, and applications*, Springer, 2016.
10. Tang, S., Hu, C., Design, Preparation and Properties of Carbon Fiber Reinforced Ultra-High Temperature Ceramic Composites for Aerospace Applications: A Review, *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, V. 33, No 2, p. 117. DOI 10.1016/j.jmst.2016.08.004
11. Das, T.K., Ghosh, P., Das, N.Ch., Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review, *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, 2019, V. 2, No 2, p. 214. DOI: 10.1007/s42114-018-0072-z
12. Patent No 102978936 China: D06M 15/55, D06M 13/252, C08L 81/02, C08K 9/04, C08K 7/06, C08J 5/06, D06M 101/40, *Sizing agent for emulsion-type carbon fiber, preparation method and usage thereof: 2012104945542*, Zhen, L., Wei, S., Tongmin, C., Xianbo, H., Youping, H., Huaiyu, X., Appl. 27.11.2012, publ. 20.03.2013, Appl. Kingfa Science and Technology Co Ltd, Shanghai Kingfa Science and Technology Co Ltd., p. 8.
13. Patent No 4374875 USA: C08F283/06, C09D151/08, *Water-borne thermoplastic polyhydroxyether compositions: 6333893*, Fan, You-Ling, Appl. 23.12.1981, publ. 22.02.1983; Appl. InChem Corp, Union Carbide Corp., p. 6.
14. Patent No 4638038 USA: G11B5/7027, C08G65/48, C09D171/00, G11B5/7023, Y10S525/93, *Carboxylic acid-grafted phenoxy resins: 725535*, Salensky, G.A., Appl. 22.04.1985, publ. 20.01.1987, Appl. InChem Corp, Union Carbide Corp., p. 9.
15. Patent No 4711817 USA: C08G65/48, C09D171/00, G11B5/7023, Y10T428/31529, *Carboxylic acid-grafted phenoxy resins: 6914795*, Salensky, G.A., Appl. 02.10.1986: publ. 08.12.1987; Appl. InChem Corp, Union Carbide Corp., p. 9.
16. Ucpinar, B., Aytac, A., Influence of different surface-coated carbon fibers on the properties of the poly (phenylene sulfide) composites, *Journal of Composite Materials*, 2019, V. 53, No 8, pp. 1123–1132. DOI: 10.1177/0021998318796159.
17. Yan, T., et al., Interfacial enhancement of CF/PEEK composites by modifying water-based PEEK-NH₂ sizing agent, *Composites Part B: Engineering*, 2020, V. 199, p. 108258. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108258

18. Giraud, I., et al., Preparation of aqueous dispersion of thermoplastic sizing agent for carbon fiber by emulsion/solvent evaporation, *Applied Surface Science*, 2013, V. 266, pp. 94–99. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.11.098
19. Crevecoeur, G., Groeninckx, G., Binary blends of poly (ether ether ketone) and poly (ether imide): Miscibility, crystallization behavior and semicrystalline morphology, *Macromolecules*, 1991, V. 24, No 5, pp. 1190–1195. DOI: 10.1021/ma00005a034
20. Shibata, M., Fang, Z., Yosomiya, R., Miscibility and crystallization behavior of poly (ether ether ketone ketone)/poly (ether imide) blends, *Journal of Applied Polymer Science*, 2001, V. 80, No 5, pp. 769–775.
21. Fan, R., et al., A water-soluble PAAs sizing agent for enhancing interfacial adhesion of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide composites (CF/PPS), *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 2023, V. 60, No 1, pp. 29–37.
22. Chuang, S.L., Chu, N.J., Whang, W.T., Effect of polyamic acids on interfacial shear strength in carbon fiber/aromatic thermoplastics, *Journal of Applied Polymer Science*, 1990, V. 41, No 1–2, pp. 373–382.
23. Texier, A., et al., Fabrication of PEEK/carbon fibre composites by aqueous suspension prepregging, *Polymer*, 1993, V. 34, No 4, pp. 896–906.
24. Cogswell, F.N., *Thermoplastic aromatic polymer composites: a study of the structure, processing and properties of carbon fibre reinforced polyetheretherketone and related materials*, Elsevier, 2013.
25. Zhandarov, S., et al., Three specimen geometries and three methods of data evaluation in single-fiber pullout tests, *Mechanics of Composite Materials*, 2019, V. 55, No 1, pp. 69–84.
26. Zhang, R.L., et al., Influence of sizing molecular weight on the properties of carbon fibers and its composites, *Materials & Design*, 2012, V. 34, pp. 649–654.
27. National standard GOST 24642–81: *Osnovnye normy vzaimozamenyaemosti. Dopuski formy i raspolozheniya poverkhnostei. Osnovnye terminy i opredeleniya* [Basic norms of interchangeability. Tolerances for the shape and position of surfaces. Basic terms and definitions], Moscow: Izd-vo standartov, 1990.

UDC 678:537.31:620.172

INFLUENCE OF SUPERCONDUCTIVE CARBON BLACK ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON HIGH- DENSITY POLYETHYLENE

E.A. DROZDOVA, E.A. ROGACHEV, Cand Sc. (Eng), O.V. KROPOTIN, Dr Sc. (Eng)

Omsk State Technical University,

11 Mira Ave, 644050 Omsk, Russian Federation. E-mail: kropotin@mail.ru

Received May 14, 2025

Revised July 14, 2025

Accepted July 16, 2025

Abstract—For the first time, the influence of superconductive carbon black CH1000 on the structure and properties of a polymer composite materials based on high-density polyethylene HD 03490 PE has been studied. Two types of structure have been identified as determining the properties of composites. The first type of structure is formed in a low-filled composite. The filler forms a weakly conductive network and at the same time reinforces the composites, increasing their rigidity. The second type of structure is formed with an increased filler content: electrically conductive and composite-reinforcing chains of filler particles in contact with each other are formed. The critical concentration of filler in the composite, which determines the transition from the first type of structure to the second, corresponds to 8–10 wt.% of carbon black.

Keywords: conductive polymer composites, carbon black, high-density polyethylene, electrical conductivity, mechanical properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-166-175

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their gratitude to SIBUR and Omsk Carbon Group for providing samples for the research. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No FSGF-2024-0003.

REFERENCES

1. Chen, L., Zhang, J., Designs of conductive polymer composites with exceptional reproducibility of positive temperature coefficient effect: A review, *Journal of applied polymer science*, 2021, V. 138, p. 49677. URL: <https://doi.org/10.1002/app.49677>
2. Liu, Y., Zhang, H., Porwal, H., Busfield, J., Peijs, T., Bilotti, E., Pyroresistivity in conductive polymer composites: a perspective on recent advances and new applications, *Polymer international*, 2018, V. 68 (3), pp. 299–305. DOI: 10.1002/pi.5735
3. Mamunya, Y., Maruzhenko, O., Kolisnyk, R., Iurzhenko, M., Pylypenko, A., Masiuchok, O., Godzierz, M., Krivtsun, I., Trzebicka, B., Pruvost, S., Pyroresistive properties of composites based on HDPE and carbon fillers, *Polymers*, 2023, V. 15, p. 2105. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15092105>
4. Pang, H., Xu, L., Yan, D.-X., Li, Z.-M., Conductive polymer composites with segregated structures, *Progress in polymer science*, 2014, V. 39 (11), pp. 1908–1933. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2014.07.007
5. Paszkiewicz, S., Pypeć, K., Irska, I., Piesowicz, E., Functional polymer hybrid nanocomposites based on polyolefins: A Review, *Processes*, 2020, V. 8, p. 1475. DOI: 10.3390/pr8111475
6. Setnescu, R., Lungulescu, E.-M., Marinescu, V.E., Polymer composites with self-regulating temperature behavior: properties and characterization, *Materials*, 2023, V. 16, p. 157. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16010157>
7. Silva, L.N., Dos Anjos, E.G.R., Morgado, G.F.M., Marini, J., Backes, E.H., Montagna, L.S., Passador, F.R., Development of antistatic packaging of polyamide 6/linear low-density polyethylene blends-based carbon black composites, *Polymer Bulletin*, 2020, V. 77, pp. 3389–3409. URL: <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02928-3>
8. *Carbon black: science and technology*, ed. by Donnet, J.-B., New York: CRC Press, Marcel Dekker, 1993.

9. Vidakis, N., Petousis, M., Michailidis, N., Mountakis, N., Argyros, A., Spiridaki, M., Moutsopoulou, A., Papadakis, V., Charitidis, C., High-density polyethylene/carbon black composites in material extrusion additive manufacturing: conductivity, thermal, rheological, and mechanical responses, *Polymers*, 2023, V. 15, p. 4717. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15244717>
10. Allahverdyeva, Kh.V., Kakhramanov, N.T., Dadasheva, E.V., Elektroprovodyashchie nanokompozity na osnove polietilena vysokoi plotnosti i razlichnykh tipov uglersoderzhashchikh napolnitelei [Electrically conductive nanocomposites based on high density polyethylene and different types of carbon-containing fillers], *Plasticheskie massy*, 2023, No 5–6, pp. 53–56. URL: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-5-6-53-56>
11. Borukaev, T.A., Gaev, D.S., Fiziko-mekhanicheskie svoistva kompozitov na osnove polietilena vysokoi plotnosti i tekhnicheskogo ugljeroda [Physico-mechanical properties of composites based on high-density polyethylene and technical carbon], *Prikladnaya fizika*, 2017, No 5, pp. 76–81.
12. Markov, A.V., Markov, V.A., Chizhov, A.S., Vliyanie kharakteristik polietilena na termoelektricheskie svoistva polietilenovykh kompozitov s tekhnicheskim ugljerodom [The influence of the characteristics of polyethylene on thermoelectric properties of their composites with black carbon], *Plasticheskie massy*, 2021, No 5–6, pp. 18–23. URL: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-5-6-18-23>
13. Ragushina, M.D., Evseeva, K.A., Kalugina, E.V., Ushakova, O.B., Polimernye kompozitsionnye materialy s antistaticheskimi i elektroprovodyashchimi svoistvami [Polymer composite materials with electrically conductive and antistatic properties], *Plasticheskie massy*, 2021, No 3–4, pp. 6–9. URL: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-3-4-6-9>
14. Razdyakonova, G.I., Likholobov, V.A., Kokhanovskaya, O.A., *Tekhnologii modifikatsii tekhnicheskogo ugljeroda* [Carbon black modification technologies: monograph], Omsk: OMGU, 2017.
15. Kropotin, O.V., Rogachev, E.A., Drozdova, E.A., Kalenchuk, A.A., Glukhovaya, E.G., Zavisimost elektricheskogo soprotivleniya ot parametrov kristallicheskoi struktury i fiziko-khimicheskikh kharakteristik tekhnicheskogo ugljeroda [Dependence of electrical resistance on parameters of the crystal structure and physico-chemical characteristics of carbon black], *Polzunovskiy vestnik*, 2024, No 3, pp. 228–233. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.033
16. Nilsen, L.E., *Mechanical properties of polymers and composites*, New York: Marcel Dekker, INC, 1979.
17. Li, J.X., Silverstein, M., Hiltner, A., Baer, E., The ductile-to-quasi-brittle transition of particulate-filled thermoplastic polyester, *Journal of applied polymer science*, 1994, V. 52, pp. 255–267. URL: <https://doi.org/10.1002/app.1994.070520212>
18. Perepechko, I.I., *Vvedenie v fiziku polimerov* [Introduction to polymer physics], Moscow: Khimiya, 1978.
19. Kropotin, O.V., Rogachev, E.A., Kalenchuk, A.A., Influence of carbon black on the elastic modulus of composite materials based on linear low density polyethylene at various structural levels, *Mechanics of composite materials*, 2025, V. 61, pp. 67–78. DOI: 10.1007/s11029-025-10262-1

ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF BASALT PLASTICS FOR THE CONSTRUCTION OF PILE FOUNDATIONS IN THE FAR NORTH

B.S. YERMAKOV¹, Dr Sc. (Eng), D.V. NECHAEV¹, O.V. SHVETSOV¹, Cand Sc. (Eng),
S.A. VOLOGZHANINA², Dr Sc. (Eng)

¹ *Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 29 Politekhnicheskaya St,
195251 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: ermakov55@bk.ru*

² *Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II, 2 21st Line, Vasilievsky Island,
199106 St Petersburg, Russian Federation*

Received June 17, 2025

Revised July 1, 2025

Accepted July 4, 2025

Abstract—Building structures made of PCM have already found their application in construction projects in the temperate climate zone and are increasingly used in the construction of buildings and structures in the permafrost of Canada, the USA and a number of other countries. However, to date, there is almost no information on the preservation of the structure and properties of PCM under conditions of extremely low temperatures, high aggressiveness of the external environment and extracted products, in addition, in the Russian Federation there is no regulatory and technical documentation on the conditions of using PCM in the cold climate zone, which does not allow recommending PCM for the development of oil and gas fields in the permafrost. In this paper, a set of studies is carried out aimed at assessing the degradation of the structure and properties of basalt plastics and products made from them in the conditions of the Arctic and Subarctic regions of the Russian Federation and the development of a reference database on the properties of PCM under long-term operation in cold climates.

Keywords: PCM, material degradation, material resource, climatic tests, climatic factors of aging, basalt plastic

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-176-187

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the RF (topic No FSEG–2024–0009 “Development of service property degradation modes metal and composite materials for buildings in the permafrost”).

REFERENCES

1. Litvinenko, V.S., Petrov, Ye.I., Vasilevskaya, D.V., Yakovenko, A.V., Naumov, I.A., Ratnikov, M.A., Otsenka roli gosudarstva v upravlenii mineralnymi resursami [Assessment of the state's role in mineral resource management], *Zapiski Gornogo instituta*, 2023, V. 259, pp. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100
2. Buslaev, G., Tsvetkov, P., Lavrik, A., Kunshin, A., Loseva, E., Sidorov, D., Ensuring the Sustainability of Arctic Industrial Facilities under Conditions of Global Climate Change, *Resources*, 2021, No 10, p. 128. DOI: 10.3390/resources10120128
3. Zhdaneev, O.V., Obespechenie tekhnologicheskogo suvereniteta otraslei TEK Rossiiskoi Federatsii [Ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation's fuel and energy sector], *Zapiski Gornogo instituta*, 2022, V. 258, pp. 1061–1078. DOI: 10.31897/PMI.2022.107

4. Shammazov, I.A., Batyrov, A.M., Sidorkin, D.I., Study of the Effect of Cutting Frozen Soils on the Supports of Above-Ground Trunk Pipelines, *Applied Sciences* (Switzerland), 2023, No 13, pp. 1–19. DOI: 10.3390/app13053139
5. Cherepovitsin, A.Ye., Tsvetkov, P.S., Yevseeva, O.O., Kritichesky analiz metodicheskikh podkhodov k otsenke ustoichivosti arkticheskikh neftegazovykh proektov [Critical analysis of methodological approaches to assessing the sustainability of Arctic oil and gas projects], *Zapiski Gornogo instituta*, 2021, V. 249, pp. 463–478. URL: <https://DOI.org/10.31897/PMI.2021.3.15>
6. Boyarintsev, A.V., Kompozitnaya protivopuchinnaya svaya [Composite anti-swelling pile], *Sovremennye issledovaniya transformatsii kriosferi i voprosi geotekhnicheskoi bezopasnosti sooruzhenii v Arktike*, 2021, pp. 67–70. DOI: 10.7868/9785604610848015
7. Vlasenko, F.S., Raskutin, A.Ye., Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov v stroitelnykh konstruktsiyakh [Application of polymer composite materials in building structures], *Trudy VIAM*, 2013, No 8, p. 3. EDN: RAEFMB
8. Frantsev, M.E., Opredelenie tselesoobraznosti ispolzovaniya armiruyushchikh materialov na osnove bazaltovogo volokna pri sozdanii otechestvennykh sudov iz kompozitov [Determining the feasibility of using basalt fiber-based reinforcement materials in the construction of domestic composite vessels], *Transportnye sistemy*, 2018, No 1, pp. 15–24. DOI: 10.46960/62045_2018_1_15
9. Pashkevich, N.V., Khloponina, V.S., Pozdnyakov, N.A., Avericheva, A.A., Analiz problem vosproizvodstva mineralno-syrievoi bazy defitsitnykh strategicheskikh poleznykh iskopaemykh [Analysis of the problems of reproducing the mineral resource base of scarce strategic minerals], *Zapiski Gornogo instituta*, 2024, V. 270, p. 1004–1023. EDN: HNTQBF
10. Semenov, V.V., Butorov, I.A., Problemy primeneniya polimernykh kompozitsionnykh materialov v promyshlennom i grazhdanskom stroitelstve [Problems of using polymer composite materials in industrial and civil construction], *Izv. vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost*, 2016, No 4 (19), pp. 129–137. EDN: XEDYQT
11. Rasheed R., et al., Techno-economic and environmental sustainability analysis of filament-winding versus pultrusion based glass-fiber composite technologies, *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, V. 30, No 13, pp. 36276–36293. DOI: 10.1007/s11356-022-24817-5
12. Makukhin, A.G., Sirovoi, G.V., Ratushnyak, A.Yu., Pultruziya kak tekhnologicheskyy protsess izgotovleniya izdelii iz kompozitsionnykh materialov [Pultrusion as a technological process for manufacturing composite materials], *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya*, 2016, No 1, pp. 99–106. EDN: VOGEDL
13. Reznichenko, V., et al., *Methods of manufacturing long-length power structures made of polymer composite materials*, BIO Web of Conferences, EDP Sciences, 2024, V. 145, p. 03048. DOI: 10.1051/bioconf/202414503048
14. Vorobei, V.V., Yevstratov, S.V., Novye napravleniya v sovremennoi tekhnologii namotki konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov [New trends in modern technology of winding composite materials structures], *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2009, V. 16, No 1, pp. 61–72. EDN: KUUDFV
15. Dvoeglazov, I.V., Razrabotka protsessa izgotovleniya skladchatykh zapolnitelei metodom transfernogo formovaniya [Development of the process for manufacturing folded fillers using

transfer molding], *Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossiiskoi aviakosmicheskoi otrasli*, 2016, pp. 700–703. EDN: WJPAWV

16. Gulyaev, A.I., Shurtakov, S.V., Kolichestvenny analiz mikrostruktury granichnogo sloya “volokno – matritsa” v ugleplastikakh [Quantitative analysis of the microstructure of the fiber-matrix boundary layer in carbon composites], *Trudy VIAM*, 2016, No 7 (43), pp. 65–74. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-8-8

17. Lepov, V.V., Okhlopkova, A.A., Razrabotki v oblasti severnogo i arkticheskogo materialovedeniya dlya promyshlennosti Respubliki Sakha (Yakutiya) [Developments in the field of northern and Arctic materials science for the industry of the Republic of Sakha (Yakutia)], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*, 2024, V. 28, No 4, pp. 627–640. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-4-627-640

18. Blaznov, A.N., et al., Vliyanie temperatury na prochnost bazalto- i stekloplastikov [The effect of temperature on the strength of basalt and fiberglass plastics], *Polzunovsky vestnik*, 2014, No 4–2, pp. 154–158. EDN: TUYTHZ

19. Startsev, O.V., Lebedev, M.P., Kichkin, A.K., Starenie polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviyakh ekstremalno kholodnogo klimata [Aging of polymer composite materials in an extremely cold climate], *Izv. Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No 1 (111), pp. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06

20. Lebedev, M.P., Startsev, O.V., Regularities of aging of polymer and polymer composite materials in the conditions of the far north, *Russian Chemical Bulletin*, 2023, V. 72, No 2, pp. 553–565. DOI: 10.1007/s11172-023-3819-1

21. Nefedov, N.I., et al., Eroziionnostoikie pokrytiya dlya zashchity izdelii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Erosion-resistant coatings for protecting polymer composite materials], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2014, No S3, pp. 25–27. EDN: TBVRKL

22. Semenova, L.V., Novikova, T.A., Nefedov, N.I., Klimaticheskaya stoikost i starenie lakokrasochnogo pokrytiya [Climate resistance and aging of the paint coating], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2014, No S3, pp. 31–34. EDN: TBVRLF

23. Menzilova, M.G., Lebedev, O.Yu., Issledovaniya vliyaniya ekspluatatsionnykh nagruzok na lakokrasochnye pokrytiya [Research on the impact of operational loads on paint and varnish coatings], *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*, 2024, No 2, pp. 8–13. EDN: WSHABX

24. Koretskaya, L.S., Aleksandrova, T.I., Strukturnye izmeneniya neizbezhny. Vliyanie vody na svoistva stekloplastikov [Structural changes are inevitable. The effect of water on the properties of fiberglass composites], *Polimernye truby*, 2011, No 1, pp. 38–41. EDN: VRWKDQ

25. Tian, H., et al., Quantification of water content during freeze–thaw cycles: A nuclear magnetic resonance based method, *Vadose Zone Journal*, 2018, V. 17, No 1, pp. 1–12. DOI.org/10.2136/vzj2016.12.0124

CORROSION AND PROTECTION OF METALS

UDC 620.196.2:669.15–194.56:621.762.5

INVESTIGATION OF INTERCRYSTALLINE CORROSION RESISTANCE OF SPECIMENS OF STAINLESS AUSTENITIC STEELS OBTAINED BY SELECTIVE LASER ALLOYING AFTER VARIOUS HEAT TREATMENT MODES

S.Yu. MUSHNIKOVA, Dr Sc. (Eng), O.N. PARMENOVA, Cand Sc. (Eng), D.N. CHAINIKOVA,
E.A. USHANOVA, Cand Sc. (Phys-Math), D.S. SOZINOV

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

Received October 3, 2025

Revised October 17, 2025

Accepted October 21, 2025

Abstract—Samples of stainless steels AISI 321 and AISI 316L were made by selective laser alloying (SLS). Samples were tested in the initial state and after heat treatment performed according to the following modes: SLS + austenitization; SLS + provoking heating; SLS + austenitization + provoking heating, for intercrystalline corrosion according to national standard GOST 6032-2017 (AMU method). It has been established that the intercrystalline corrosion resistance of samples from the studied stainless steels provides austenitization. In other modes, depending on the content of carbon and the stabilizer element (titanium), as well as on the metal structure formed during the SLS and thermal treatment, the samples may show a tendency to intercrystalline corrosion.

Keywords: austenitic steels, selective laser fusion, intercrystalline corrosion, austenitization

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-188-205

REFERENCES

1. Bazaleeva, K.O., Tsvetkova, E.V., Balakirev, E.V., Bazaleev, E.V., Kazakov, A.V., Mekhanicheskoe i ehlektrokhimicheskoe povedenie austenitnogo splava, sintezirovannogo metodom selektivnogo lazernogo plavleniya [Mechanical and electrochemical behavior of an austenitic alloy synthesized by selective laser melting], *Materialovedenie*, 2019, No 3, pp. 24–29.
2. Zeldovich, V.I., Khomskaya, I.V., Frolova, N.Yu., Kheifets, A.E., Abdullina, D.N., Petu-khov, E.A., Smirnov, E.B., Shorokhov, E.V., Klenov, A.I., Pilshchikov, A.A., Struktura i mekhanicheskie svoistva austenitnoi nerzhaveyushchei stali, poluchennoi metodom selektivnogo lazernogo plavleniya [Structure and mechanical properties of austenitic stainless steel obtained by selective laser melting] *Fizika metallov i metallovedenie*, 2021, V. 122, No 5, pp. 527–534.
3. Eliseev, D.P., Malashenkov, K.S., Otsenka kachestva i mekhanicheskikh svoistv obraztsov austenitnoy stali, poluchennykh s ispolzovaniem additivnoi tekhnologii [Evaluation of the quality and mechanical properties of austenitic steel samples obtained using additive technology], *Metally*, 2020, No 6, pp.77–83.
4. Popovich, A.A., Sufiyarov, V.Sh., Borisov, E.V., Polosov, I.A., Masaylo, D.V., Grigoriev, A.V., Anizotropiya mekhanicheskikh svoistv izdelii, izgotovlennykh metodom selektivnogo lazernogo plavleniya poroshkovykh materialov [Anisotropy of mechanical properties of products manufactured using selective laser melting of powdered materials], *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya*, 2016, No 3, pp. 4–11.
5. Bazaleeva, K.O., Tsvetkova, E.V., Balakirev, E.V., Termicheskaya stabilnost yacheistoi struktury austenitnogo splava, formiruemoi pri selektivnom lazernom splavlenii [Thermal stability of

the cellular structure of an austenitic alloy formed by selective laser melting], *Metally*, 2016, No 3, pp. 31–39.

6. Ilyinykh, A.V., Mekhanicheskie svoistva stali 12KH18N10T, poluchennoi metodom selektivnogo lazernogo splavleniya [Mechanical properties of 12Kh18N10T steel obtained by selective laser melting], *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2018, No 55, pp. 103–109.

7. Barakhtin, B.K., Zhukov, A.S., Deev, A.A., Voznyuk, A.V., Vliyanie khimicheskogo sostava poroshkovogo syriya na prochnost materiala posle selektivnogo lazernogo plavleniya [Influence of the chemical composition of powder raw materials on the strength of the material after selective laser melting], *Metal-lovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2018, No 6, pp. 48–52.

8. Kuznetsov, P.A., Zisman, A.A., Petrov, S.N., Goncharov, I.S., Struktura i mekhanicheskie svoistva austenitnoi stali 316L, poluchennoi metodom selektivnogo lazernogo splavleniya [Structure and mechanical properties of austenitic steel 316L obtained by selective laser melting], *Deformatsiya i razrushenie metal-lov*, 2016, No 4, pp. 9–13.

9. Barakhtin, B.K., Zhukov, A.S., Bobyr, V.V., Shakirov, I.V., Kuznetsov, P.A., Faktory povysheniya prochnosti metallov, poluchennykh selektivnym lazernym splavlenniem poroshkov [Factors that increase the strength of metals obtained by selective laser melting of powders], *Voprosy materialovedeniya*, 2018, No 3 (95), pp. 68–73.

10. Staritsyn, M.V., Kuznetsov, P.A., Petrov, S.N., Mikhailov, M.S., Kompozitnaya struktura kak uprochnyayushchy faktor nerzhaveyushchei austenitnoi khromonikelevoi additivnoi stali [Composite structure as a strengthening factor for stainless austenitic chromium-nickel additive steel], *Fizika metallov i metal-lovedenie*, 2020, V. 4, No 4, pp. 1–7.

11. Chigal, V., *Mezhkristallitnaya korroziya nerzhaveyushchikh stalei* [Intergranular Corrosion of Stainless Steels], Leningrad: Khimiya, 1969.

12. Pogodin, V.P., Bogoyavlensky, V.L., Sentyurev, V.P., *Mezhkristallitnaya korroziya i kor-rozionnoe rastreskivanie nerzhaveyushchikh stalei v vodnykh sredakh* [Intergranular corrosion and corrosion cracking of stainless steels in aqueous environments], Moscow: Atomizdat, 1970.

13. Sokol, I.Ya., Ulyanin, E.A., Feldgandler, E.G., et al., *Struktura i korroziya metallov i splavov* [Structure and corrosion of metals and alloys]: reference book, Moscow: Metallurgiya, 1989.

14. Semenova, I.V., Florianovich, G.M., Khoroshilov, A.V., *Korroziya i zashchita ot kor-rozii* [Corrosion and Anti-Corrosion Protection], Moscow: Fizmatlit, 2002.

15. Laleh, M., Hughes, A.E., Xu, W., et al., On the unusual intergranular corrosion resistance of 316L stainless steel additively manufactured by selective laser melting, *Corros. Sci.*, 2019, No 16.

16. Laleh, M., Hughes, A.E., Xu, W., Gibson, I., Tan, M.Y., A critical review of corrosion characteristics of additively manufactured stainless steels, *International Materials Reviews*, 2020. URL: <https://doi.org/10.1080/09506608.2020.1855381>

17. Liu, W., Liu, C., Wang, Y., Zhang, H., Ni, H., Effect of heat treatment on the corrosion resistance of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion, *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, V. 32, pp. 3896–3912.

18. Fouchereau, A., Maskrot, H., Lomello, F., Bosonnet, S., Gharbi, O., Gwinner, B., Laghoutaris, P., Schuster, F., Vivier, V., Puga, B., Triple structuration and enhanced corrosion performance of 316L in Laser-Powder Bed Fusion, *Corrosion Science*, 2024, No 228.
19. Ghanavati, R., Naffakh-Moosavy, H., Moradi, M., Mazzucato, F., Valente, A., Bagherifard, S., Saboori, A., Design optimization for defect-free AISI 316 L/IN718 functionally graded materials produced by laser additive manufacturing, *Materials Characterization*, 2025, V. 220.
20. National standard GOST 1497–2023: *Metally. Metody ispytany na rastyazhenie* [Metals. Tensile testing methods].
21. ASTM A240: *Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications*.
22. GOST 6032–2017: *Stali i splavy korrozionno-stoikie. Metody ispytany na stojkost protiv mezhkristallitnoi korrozii* [Corrosion-resistant steels and alloys. Methods of testing for resistance to intergranular corrosion].
23. GOST 2999–75: *Metally i splavy. Metod izmereniya tverdosti po Vickersu* [Metals and alloys. Vickers hardness measurement method].
24. Parmenova, O.N., *Stojkost k pittingovoi i shchelevoi korrozii nerzhaveyushchikh stalei austenitnogo klassa v morskoi vode* [Resistance to pitting and crevice corrosion of austenitic stainless steels in seawater]: thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), St Petersburg, 2019.
25. Qi, X., Gao, X., Ma, C., Huang, R., Huang, F., Liu, J., Zhang, S., Effect of heat treatment on the intergranular corrosion of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting, *Materials Characterization*, 2025, V. 220, p. 114648.

RADIATION MATERIALS SCIENCE

UDC 621.039.531:669.15–194.56:539.421

FEATURES OF THE TEMPERATURE AND THE DAMAGE DOSE EFFECTS ON FRACTURE TOUGHNESS AND FATIGUE CRACK GROWTH RATE IN AUSTENITIC STEEL AFTER 45 YEARS OF OPERATION AS PART OF THE WWER

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), A.J. MINKIN, V.N. FOMENKO, Cand Sc. (Eng),

V.I. SMIRNOV, Cand Sc. (Eng), N.E. PIROGOVA, Cand Sc. (Eng),

A.A. SOROKIN, Cand Sc. (Eng)

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

Received June 24, 2025

Revised September 15, 2025

Accepted September 17, 2025

Abstract—The fracture toughness and fatigue tests of specimens from austenitic stainless steel of 18Cr–10Ni–Ti grade (Russian analog of AISI 321 steel) irradiated during 45 years as a part of the core baffle in the Pressure Water Reactor of WWER-440 type were performed. Specimens had a various neutron damage doses from 14.4 to 43.0 dpa. The fracture toughness tests were performed

over a temperature range from -100 to 290°C . The fatigue crack growth rate (FCGR) tests were determined over a temperature range from 20 to 290°C . The temperature and dose dependences of fracture toughness and FCGR are constructed. It was found that a drastic decrease of fracture toughness and an increase of FCGR occurs at the transition from classical ductile mechanism or fatigue fracture mechanism to a mixed fracture mechanism (including intergranular fracture). The role of martensitic transformation during specimens testing and generating helium in steel during irradiation in a WWER reactor has been revealed. This role is manifested in the intergranular fracture at test temperatures when the martensitic transformation is realized in combination with the helium weakening of grain boundaries. A phenomenological model explaining the results is proposed.

Keywords: austenitic steel, irradiation, fracture toughness, fatigue crack growth rate, martensitic transformation, intergranular fracture

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-124-4-206-231

REFERENCES

1. Carter, R.G., Gamble, R.M., Assessment of the fracture toughness of irradiated stainless steel for BWR core shrouds, *Proceedings of Int. Conf. Fontevraud 5 "Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to Light Water NPPs' Safety, Performance and Reliability"*, Avignon, France, 2002.
2. Demma A., Carter R., Jenssen A. et al. Fracture Toughness of Highly Irradiated Stainless Steels in Boiling Water Reactors // *13th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, Toronto: Canadian Nuclear Society, 2007, pp. 1286–1303.
3. Margolin, B.Z., Minkin, A.I., Smirnov, V.I., Fedorova, V.A., Kokhonov, V.I., Kozlov, A.V., Evseev, M.V., Kozmanov, E.A., Issledovanie vliyaniya neitronnogo oblucheniya na staticheskuyu i tsiklicheskuyu treshchinostoikost khromonikelevoi austenitnoi stali [Study of the effect of neutron irradiation on the static and cyclic fracture resistance of chromium-nickel austenitic steel], *Voprosy materialovedeniya*, 2008, No 1 (53), pp. 111–122.
4. Chopra, O.K., *Degradation of LWR Core Internal Materials due to Neutron Irradiation*, NUREG/CR-7027, U.S. NRC, Argonne National Laboratory, 2010.
5. Smirnov, V.I., Margolin, B.Z., Lapin, A.N., Kokhonov, V.I., Sorokin, A.A., Issledovanie vliyaniya neitronnogo oblucheniya na vyazkost razrusheniya stali 08Kh18N10T i metalla ee svarnykh shvov [Study of the effect of neutron irradiation on the fracture toughness of 08Kh18N10T steel and its weld metal], *Voprosy materialovedeniya*, 2011, No 1 (65), pp. 167–183.
6. Chopra, O.K., Rao, A.S., A review of irradiation effects on LWR core internal materials – Neutron embrittlement, *J. Nucl. Mater.*, 2011, No 412, pp. 195–208.
7. Minkin, A.I., Margolin, B.Z., Smirnov, V.I., Sorokin, A.A., Razvitie modeli dlya prognozirovaniya staticheskoi treshchinostoikosti austenitnykh materialov v usloviyakh neitronnogo oblucheniya [Development of a model for predicting the static fracture resistance of austenitic materials under neutron irradiation conditions], *Voprosy materialovedeniya*, 2013, No 3 (75), pp. 107–119.
8. Hure, J., Tanguy, B., Ritter, C., Bourganel, S., Sefta, F., Extensive investigation of the mechanical properties of a Chooz A internal component, *Proceedings of Int. Conf. Fontevraud 9 "Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to Light Water NPPs' Safety, Performance and Reliability"*, Avignon, France, 2018.

9. Shahinian, P., Watson, H.E., Smith, H.H., Effect of Neutron Irradiation on Fatigue Crack Propagation in Types 304 and 316 Stainless Steels at High Temperatures, *Effect of Radiation on Substructure and Mechanical Properties of Metals and Alloys. ASTM STP 529*, ASTM, 1973, pp. 493–508.
10. James, L.A., The effect of fast neutron irradiation upon the fatigue crack propagation behavior of two austenitic stainless steel, *J. Nucl. Mater.*, 1976, V. 59, pp. 183–191.
11. Lloyd, G.J., Interpretation of the influences of irradiation upon fatigue crack propagation in austenitic stainless steels, *J. Nucl. Mater.*, 1982, V. 110, pp. 20–27.
12. Fedorova, V.A., Margolin, B.Z., Prognozirovaniye skorosti rosta ustalostnoi treshchiny v auste-nitnykh stalyakh s uchetom vliyaniya neitronnogo oblucheniya i vodnoi sredy [Prediction of the rate of fatigue crack growth in austenitic steels, taking into account the effects of neutron irradiation and water environment], *Voprosy materialovedeniya*, 2008, No 3 (55), pp. 96–110.
13. Chopra, O.K., Shack, W.J., *Crack Growth Rates and Fracture Toughness of Irradiated Austenitic Stainless Steels in BWR Environments*, NUREG/CR-7027. U.S. NRC, Argonne National Laboratory, 2008.
14. Margolin, B.Z., Minkin, A.I., Smirnov, V.I., Sorokin, A.A., Kokhonov, V.I., Vliyanie neitron-nogo oblucheniya na skorost rosta ustalostnykh treshchin v austenitnoi stali 08KH18N10T i metalle ee svarnykh soedineniy [Effect of neutron irradiation on the rate of growth of fatigue cracks in austenitic steel 08Kh18N10T and the metal of its welded joints], *Voprosy materialovedeniya*, 2013, No 2 (74), pp. 123–138.
15. Margolin, B., Sorokin, A., Smirnov, V., Potapova, V., Physical and mechanical modelling of neutron irradiation effect on ductile fracture. Part 1: Prediction of fracture strain and fracture toughness of austenitic steels, *J. Nucl. Mater.*, 2014, V. 452, pp. 595–606.
16. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Shvetsova V. A., Minkin A. I., Potapova V. A., Smirnov V. I. Vliyanie radiatsionnogo raspukhaniya i osobennostei deformirovaniya na protsessy razrushe-niya obluchennykh austenitnykh stalei pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhenii. Ch. 1: Plastichnost i treshchinostoikost stali [The effect of radiation swelling and deformation features on the fracture processes of irradiated austenitic steels under static and cyclic loading. Part 1: Plasticity and Fracture Resistance of Steel], *Vop-rosy materialovedeniya*, 2016, No 3 (87), pp. 159–191.
17. Margolin, B.Z., Minkin, A.I., Smirnov, V.I., Sorokin, A.A., Shvetsova, V.A., Potapova, V.A., Vliyanie radiatsionnogo raspukhaniya i osobennostei deformirovaniya na protsessy razrusheniya obluchennykh austenitnykh stalei pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhenii. Ch. 2: Skorost rosta ustalostnykh treshchin [The effect of radiation swelling and deformation features on the fracture processes of irradiated austenitic steels under static and cyclic loading. Part 2: The rate of growth of fatigue cracks], *Voprosy materialovedeniya*, 2016, No 3 (87), pp. 192–209.
18. Maksimkin, O.P., Pryamye i obratnye martensitnye prevrashcheniya v reaktornykh stalyakh, obluchennykh neitronami i zaryazhennymi chastitsami [Direct and reverse martensitic transformations in reactor steels irradiated with neutrons and charged particles], *Vestnik NYAC RK*, 2015, Is. 3 (63), pp. 113–123.
19. Gusev, M.N., Maksimkin, O.P., Osipov, I.S., Garner, F.A., Anomalous large deformation of 12Cr18Ni10Ti austenitic steel irradiated to 55 dpa at 310°C in the BN-350 reactor, *J. Nucl. Mater.*, 2009, V. 386–388, pp. 273–276.

20. Gusev, M.N., Maksimkin, O.P., Garner, F.A., Peculiarities of plastic flow involving “deformation waves” observed during low-temperature tensile tests of highly irradiated 12Cr18Ni10Ti and 08Cr16Ni11Mo3 steels, *J. Nucl. Mater.*, 2010, V. 403, Is. 1–3, pp. 121–125.
21. Margolin, B., Shvetsova, V., Sorokin, A., Minkin, A., Pirogova, N., Mechanisms of plastic deformation and fracture of austenitic chromium-nickel steel irradiated during 45 years in WWER-440, *J. Nucl. Mater.*, 2021, V. 549.
22. Margolin, B., Pirogova, N., Sorokin, A., Morozov, A., Correlation between grain boundary strength determined by impact test of miniature specimen and stress corrosion cracking resistance of irradiated austenitic steels used for the internals of WWER-type and PWR-type nuclear reactors, *Engineering Failure Analysis*, 2021, No 127, pp. 1–18.
23. Miura, T., Fujii, K., Fukuya, K., Micro-mechanical investigation for effects of helium on grain boundary fracture of austenitic stainless steel, *J. Nucl. Mater.*, 2015, V. 457, pp. 279–290.
24. Malaplate, J., Vincent, L., Averty, X., Henry, J., Marini, B., Characterization of He embrittlement of a 9Cr-1Mo steel using local approach of brittle fracture, *J. Eng. Fracture Mechanics*, 2008, No 75, pp. 3570–3580.
25. Margolin, B.Z., Pirogova, N.E., Sorokin, A.A., Kokhonov, V.I., Issledovanie mekhanizmov korrozionnogo rastreskivaniya pod napryazheniem obluchennykh austenitnykh khromonikelevykh stalei, ispolzuemykh dlya vnutrikorpusnykh ustroystv reaktorov tipa VVER i PWR [Research on the mechanisms of stress corrosion cracking of irradiated austenitic chromium-nickel steels used for internal devices of VVER and PWR reactors], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, No 2 (102), pp. 174–199.
26. Fukuya, K., Nishioka, H., Fujii, K. Fracture behavior of austenitic stainless steels irradiated in PWR, *J. Nucl. Mater.*, 2008, No 378, pp. 211–219.
27. Toivonen, A., Aaltonen, P., Karlsen, W., Ehrnsten, U., Massoud, J.-P., Boursier, J.-M., Post-irradiation SCC investigations on highly irradiated core internals component materials, *Proc. of Fontevraud 6 Conference “Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs”*, 18–22 Sept. 2006, Royal Abbey, France.
28. Pokor, C., Massoud, J.-P., Wintergerst, M., Toivonen, A., Ehrnsten, U., Karlsen, W., Determination of the time to failure curve as a function of stress for a highly irradiated AISI 304 stainless steel after constant load tests in simulated PWR water environment, *Proc. of Fontevraud 7 Conference “Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs”*, Avignon, France, 2010.
29. National standard GOST 5632–72: *Stali vysokolegirovannye i splavy korrozionno-stoikie, zharostoi-kie i zharoprochnye. Marki* [High-alloy steels and corrosion-resistant, heat-resistant, and high-temperature alloys. Brands].
30. Margolin, B.Z., Varovin, A.Ya., Minkin, A.I., Gurin, D.A., Glukhov, V.A., Issledovanie sostoyaniya metalla vnutrikorpusnykh ustroystv reaktora VVER posle 45 let ehkspluatatsii. Soobshchenie 1. Programma issledovaniy, oborudovanie i vyrezka trepanov iz VKU [Research on the condition of the metal of the VVER reactor’s internal devices after 45 years of operation. Report 1. Research program, equipment, and cutting of trepanns from the VKR], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, No 3 (103), pp. 135–143.
31. Pirogova, N.E., Dzhalandinov, A.D., Margolin, B.Z., Derkach, R.V., Minkin, A.I., Issledovanie sostoyaniya metalla vnutrikorpusnykh ustroystv reaktora VVER posle 45 let ehkspluatatsii. Soobshchenie 2. Raschetno-ehksperimentalnoe opredelenie flyuensa bystrykh

neutronov i povrezhdayushchei dozy [Research of the condition of the metal of the inside devices of the VVER reactor after 45 years of operation. Report 2. Calculation and experimental determination of the fast neutron fluence and damaging dose], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, No 3 (103), pp. 144–156.

32. Kuleshova, E.A., Fedotova, S.V., Gurovich, B.A., Frolov, A.S., Maltsev, D.A., Margolin, B.Z., Minkin, A.I., Sorokin, A.A., Issledovanie sostoyaniya metalla vnutrikorpusnykh ustroystv reaktora VVER posle 45 let ekspluatatsii. Soobshchenie 3. Mikrostruktura i fazovy sostav [Research of the condition of the metal of the VVER reactor internal devices after 45 years of operation. Report 3. Microstructure and phase composition], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, No 3 (103), pp. 157–180.

33. ASTM E1820–24: *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*.

34. Rays, G., *Matematicheskie metody v mekhanike razrusheniya, T. 2: Matematicheskie osnovy teo-rii razrusheniya* [Mathematical Methods in Fracture Mechanics, Mathematical Foundations of Fracture Theory], G. Libovits (Ed.), Moscow: Mir, 1975, V. 2.

35. Nikolaev, V.A., Margolin, B.Z., Fomenko, V.N., Ryadkov, L.N., Primenenie malorazmernykh obraztsov s glubokimi bokovymi kanavkami dlya prognozirovaniya temperaturnoi zavisimosti vyazkosti razrusheniya. Ch. 1: Eksperimentalno-raschetnye issledovaniya [Application of small-sized samples with deep side grooves for predicting the temperature dependence of fracture viscosity. Part 1: Experimental and computational studies], *Voprosy materialovedeniya*, 2008, No 3 (55), pp. 41–59.

36. National standard GOST R 59115.6–2021: *Obosnovanie prochnosti oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Metody opredeleniya kharakteristik treshchinostoikosti konstruktsion-nykh materialov* [Justification of the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Methods for determining the fracture resistance characteristics of structural materials].

37. Ivanova, V.S., Shanyavsky, A.A., *Kolichestvennaya fraktografiya. Ustalostnoe razrushenie* [Quantitative fractography. Fatigue failure], Chelyabinsk: Metallurgiya, 1988.

38. Belozarov, S.V., Neustroev, V.S., Shamardin, V.K., Studying Helium Accumulation in Austenitic Steels for Evaluating Radiation Damage in Internals of Water-Moderated Water-Cooled Power Reactors, *The Physics of Metals and Metallography*, 2008, V. 106, No 5, pp. 503–509.

39. Margolin, B.Z., Morozov, A.M., Pirogova, N.E., Grigoriev, M.N., Metodika otsenki prochnosti granits zeren austenitnykh stalei po rezultatam ispytany miniatyurnykh obraztsov na udarny izgib [Method for assessing the strength of grain boundaries in austenitic steels based on the results of impact bending tests on miniature samples], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, No 2 (102), pp. 164–173.