

Посвящается столетию со дня рождения академика РАН И. В. Горынина – ученого-материаловеда из поколения титанов..... 7

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Кондратьев Н. А., Хлусова Е. И., Мотовилина Г. Д., Беликова Ю. А. Имитационное моделирование процессов структурообразования при производстве листового проката толщиной менее 10 мм из высокопрочной бейнитно-мартенситной стали 10

Лю Ю., Ковалевская Ж. Г., Хуан Ц. Влияние термической обработки на строение и износостойкость сплава AlFeCoCrNiNb_{0,25} 25

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Новиков П. А., Косенко А. А., Попович А. А. Мониторинг изменений структуры катода LiNi_{0,8}Co_{0,1}Mn_{0,1}O₂ в литий-ионных аккумуляторах с применением in situ рентгеноструктурного анализа 36

Тюрина С. А., Карзакова В. С., Демин В. Л., Русинов П. О. Особенности и перспективы технологии металлизации полимерных изделий, получаемых методами аддитивного производства. Часть 1. Обзор и прикладные задачи высокотехнологичного производства.. 45

Тюрина С. А., Карзакова В. С., Демин В. Л., Русинов П. О. Особенности и перспективы технологии металлизации полимерных изделий, получаемых методами аддитивного производства. Часть 2. Технологические особенности получения медного покрытия на элементах СВЧ-техники..... 56

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дмитриев А. В., Кульницкий Б. А. Смятие нанопластинок терморасширенного графита между слоями окисленного каменноугольного пека при карбонизации и графитации 66

Ушканов А. А., Лазарева Н. Н., Охлопкова А. А. Исследование влияния механической активации базальтового волокна на трибологические свойства базальтопластиков на основе ПТФЭ 75

Злобина И. В., Бекренев Н. В., Егоров А. С., Анисимов А. В., Александрова Д. С., Чуриков Д. О. Пластическая деформация сформированных по технологии FDM полимерных композиционных материалов в процессе ультразвукового воздействия..... 85

Анисимов А. В., Лукичева Н. С., Петрова Д. А., Кузнецов А. Ю., Гладунова О. И., Дианкина Н. В. Поливолоконистые гибридные полимерные композиционные материалы (обзор)..... 97

Злобина И. В., Александрова Д. С., Егоров А. С., Анисимов А. В. Влияние волновых процессов различных типов на физические свойства и структуру полиэфирэфиркетона и композитов на его основе (обзор)..... 115

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Гежа В. В., Могильникова Н. А., Мельников П. В. Исследование структуры, механических и коррозионных свойств металла сварных швов, выполненных с применением мартенситно-аустенитных материалов типа 08X16H5M3AB 129

Сёмка Я. С., Приймак Е. Ю., Яковлева И. Л., Трушов В. А., Каменев С. В. Влияние силового параметра ротационной сварки трением на прочностные свойства соединения сталей 32Г2 и 10Х11Н23Т3МР 137

Губа С. В., Царьков Е. С., Бордюжин И. Г. Технологические аспекты и особенности автоматической аргодуговой сварки заглубленных трубных решеток из аустенитных сталей	147
Зорин А. Е. Перспективные подходы к повышению работоспособности сварных соединений	157
Сараев Ю. Н., Голиков Н. И., Дмитриев П. С., Семенов С. В., Штоколов С. А., Заварыкин Д. В. К вопросу о повышении эффективности монтажных и ремонтных технологий конструкций ответственного назначения, работающих в условиях низких климатических температур Севера	172
Сидоров М. М., Михайлов А. Ю. Научное обоснование применения ультразвуковой ударной обработки для управления остаточными напряжениями и обеспечения долговечности сварных соединений северного исполнения.....	183
Преображенский И. И., Лукьянов П. А., Шавкин С. В. Соединение ВТСП-материалов: выбор припоев и флюсов (обзор).....	193
КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ	
Вагапов Р. К., Ибатуллин К. А., Гайзуллин А. Д. Методические аспекты изучения углекислотной коррозии трубных сталей газопроводов.....	224
РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М. Сравнение эффективности низкотемпературных термического и радиационно-термического отжигов корпуса реактора.....	235
Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов.....	
	250

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.15–194:621.771.016

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ТОЛЩИНОЙ МЕНЕЕ 10 мм ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ БЕЙНИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

Н. А. КОНДРАТЬЕВ, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук,

Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, Ю. А. БЕЛИКОВА

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, г. Санкт-Петербург,

Шпалерная ул., 49. E-mail: nprk3@crism.ru

Поступила в редакцию 14.01.2026

После доработки 16.02.2026

Принята к публикации 18.02.2026

Проведено имитационное моделирование высокоскоростной термомеханической обработки образцов бейнитно-мартенситной хромоникельмолибденовой стали для выявления наиболее рациональных технологических режимов прокатки на непрерывных широкополосных станах. Исследовано влияние скорости, температуры и схем деформации на процессы структурообразования.

Ключевые слова: низкоуглеродистая легированная судостроительная сталь, пластометр GLEEBLE-3800, моделирование, термомеханическая обработка, рост

аустенитного зерна, динамическая рекристаллизация, процессы структурообразования, твердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-10-24

ЛИТЕРАТУРА

1. Kong J., Xie C. Effect of molybdenum on continuous cooling bainite transformation of low-carbon microalloyed steel // *Materials and Design*. – 2006. – V. 27, Is. 10. – P. 1169–1173.
2. Suzuki T., Ono Y., Miyamoto G., Furuhashi T. Effects of Si and Cr on bainite microstructure of medium carbon steels // *ISIJ International*. – 2010. – V. 50, Is. 10. – P. 1476–1482.
3. Kim S. J., Lee C. G., Lee T. H., Lee S. Effects of coiling temperature on microstructure and mechanical properties of high-strength hot-rolled steel plates containing Cu, Cr and Ni // *ISIJ International*. – 2000. – V. 40. – P. 692–698.
4. Challa V. S. A., Zhou W. H., Misra R. D. K., Malley R. O', Jansto S. G. The effect of coiling temperature on the microstructure and mechanical properties of a niobium–titanium microalloyed steel processed via thin slab casting // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – N 595. – P. 143–153.
5. Challa V. S. A., Misra R. D. K., Malley R. O', Jansto S. G. The effect of coiling temperature on the mechanical properties of ultrahigh-strength 700 MPa grade processed via thin-slab casting // *AISTech 2014 Proceedings*. – P. 2987–2997.
6. Горицкий В. М. Шнейдеров Г. Р., Гусева И. А. Исследование анизотропии ударной вязкости и склонности к расслоению сталей STRENX 650 MC И 700 MC // *Металлург*. – 2018. – № 8. – С. 29–38.
7. Капуткина Л. М., Мармулев А. В., Поляк Е. И., Эрман Г. Влияние условий охлаждения рулонов на неравномерность структуры и механических свойств горячекатаных высокопрочных автолистовых сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2012. – № 12 (690). – С. 14–18.
8. Капуткина Л. М., Мармулев А. В., Щетинин И. В., Эрман Г., Поляк Е. И. Исследование формирования неравномерности структуры и свойств в горячекатаной рулонной высокопрочной низкоуглеродистой стали // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2013. – № 9. – С. 43–47.
9. Гуськов О. П., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние технологии производства на структуру и свойства стали категории F40 улучшенной свариваемости // *Вопросы материаловедения*. – 2004. – № 2 (38). – С. 37–46.
10. Garcia de Andres C., Bartolome, M.J., Capdevila, C., San Martin, D., Caballero, F.G., Lopez, V., Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels // *Materials Characterization*. – 2001. – No 46. – P. 389–398.
11. Петров С. Н., Пташник А. В. Экспресс-метод определения границ бывшего аустенитного зерна в сталях бейнитно-мартенситного класса на основе картирования кристаллографических ориентировок превращенной структуры // *МиТОМ*. – 2019. – № 5.
12. Рыбин В. В., Рубцов А. С., Нестерова Е. В. Метод одиночных рефлексов (ОР) и его применение для электронномикроскопического анализа дисперсных фаз // *Заводская лаборатория*. – 1982. – № 5. – С. 21–26.
13. Соколов С. Ф. Исследование и моделирование эволюции микроструктуры и сопротивления деформации сталей при горячей обработке давлением // *Дис... канд. техн. наук*. – СПб., 2013. – 216 с.

14. Сошина Т. В., Зисман А. А., Хлусова Е. И. Влияние микролегирования ниобием на рекристаллизационные процессы в аустените низкоуглеродистых легированных сталей // Вопросы материала-ловедения. – 2019. – № 3 (99). – С. 128–147.
15. Кондратьев Н. А., Хлусова Е. И., Анисимов Д. М., Боровская О. Д. Выбор параметров высокоскоростной термомодеформационной обработки Cr-Ni-Mo стали на основании имитационного моделирования // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 1 (117). – С. 5–19.

УДК: 621.785:669.017.15

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРОЕНИЕ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВА AlFeCoCrNiNb_{0,25}

Ю. ЛЮ, Ж. Г. КОВАЛЕВСКАЯ, д-р техн. наук, Ц. ХУАН

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
634050, Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: kovalevskaya@tpu.ru

Поступила в редакцию 6.08.2025

После доработки 23.10.2025

Принята к публикации 5.11.2025

В представленной работе проведено исследование высокоэнтропийного сплава AlFeCoCrNiNb_{0,25} и определена связь между режимами его термообработки, строением и триботехническими характеристиками. В исходном литом состоянии и после термообработки при 900, 1000 или 1100°C с последующим охлаждением на воздухе сплав состоит из двух основных фаз (твердого раствора компонентов с ОЦК-решеткой и фазы Лавеса) и имеет дендритное доэвтектическое строение. С увеличением температуры термообработки меняется параметр кристаллической решетки твердого раствора и происходит измельчение первичной дендритной структуры. Сплав показывает лучшую износостойкость после термообработки при 1100°C, что обусловлено самым низким коэффициентом трения и структурными превращениями, произошедшими в сплаве в процессе термообработки.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав AlFeCoCrNiNb_{0,25}, термическая обработка, фазовый состав, микроструктура, сухое трение скольжения, износостойкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-25-35

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 25-49-00169.

ЛИТЕРАТУРА

1. Slobodyan M., Pesterev E., Markov A. Recent advances and outstanding challenges for implementation of high entropy alloys as structural materials // Materials Today Communications. – 2023. – V. 36. – P. 106422. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106422
2. Manzoni A., Daoud H., Völkl R., Glatzel U., Wanderka N. Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy // Ultramicroscopy. – 2013. – V. 132. – P. 212–215. DOI: 10.1016/j.ultramic.2012.12.015
3. Нестерова Е. Д., Бобкова Т. И., Мухамедзянова Л. В., Хроменков М. В., Сердюк Н. А. Формирование композиционных порошков мультикомпонентных сплавов системы Al_xNiCoFeCr методом механохимического синтеза // Вопросы материаловедения. – 2025. – № 2. – С. 75–85. DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-75-85

4. Arun S., Radhika N., Saleh B. Effect of additional alloying elements on microstructure and properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy system: a comprehensive review // *Metals and Materials International*. – 2025. – V. 31, N 2. – P. 285–324. DOI: 10.1007/s12540-024-01752-3
5. Dalan F. C., Sobrinho A. S. D. S., Nishihora R. K., Santos S. F., Martins G. V. Effect of Nb and Ti additions on microstructure, hardness and wear properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2025. – V. 1010. – P. 177117. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.177117
6. Ma S. G., Zhang Y. Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2012. – V. 532. – P. 480–486. DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.110
7. Jiang H., Han K., Li D., Cao Z. Synthesis and characterization of AlCoCrFeNiNb_x high-entropy alloy coatings by laser cladding // *Crystals*. – 2019. – V. 9 (1). – P. 56. DOI: 10.3390/cryst9010056
8. Термическая обработка в машиностроении. Справочник / Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахш-тадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.
9. Munitz A., Salhov S., Hayun S., Frage N. Heat treatment impacts the micro-structure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – V. 683. – P. 221–230. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.034
10. Zhang K., Fu Z. Effects of annealing treatment on phase composition and microstructure of CoCrFeNiTiAl high-entropy alloys // *Intermetallics*. – 2012. – V. 22. – P. 24–32. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.10.010
11. Jiang L., Jiang H., Lu Y., Wang T., Cao Z., Li T. Mechanical properties improvement of AlCrFeNi₂Ti_{0.5} high entropy alloy through annealing design and its relationship with its particle-reinforced microstructures // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2015. – V. 31 (4). – P. 397–402. DOI: 10.1016/j.jmst.2014.09.011
12. Wu M., Setiawan R. C., Li D. Y. Benefits of passive element Ti to the resistance of AlCrFeCoNi high-entropy alloy to corrosion and corrosive wear // *Wear*. – 2022. – V. 492. – P. 204231. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204231
13. Natovitz L., Edry I., Meshi L. Novel AlCrFeNiNb_{0.3} high entropy alloy: microstructure, properties and an unknown Nb-rich intermetallide // *Intermetallics*. – 2020. – V. 127. – P. 106965. DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106965
14. Shang G., Liu Z. Z., Fan J., Lu X. G. Effect of heat treatment on the microstructure and nanoindentation behavior of AlCoCrFeNi high entropy alloy // *Intermetallics*. – 2024. – V. 169. – P. 108302. DOI: 10.1016/j.intermet.2024.108302
15. Meshi L., Linden Y., Munitz A., Salhov S., Pinkas M. Retardation of the σ -phase formation in the AlCoCrFeNi multi-component alloy // *Materials Characterization*. – 2019. – V. 148. – P. 171–177. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.12.010
16. Jin B., Nie S., Fan N., Xing B., Yu H. Enhanced wear resistance of a multi-phase reinforced Al_{0.5}CrFeNi_{2.5}Si_{0.25} high-entropy alloy via annealing // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – V. 29. – P. 5180–5188. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.02.226
17. Zhang L., Wang, H., Li, J., Man, J. Evolution of the microstructure and mechanical properties of an sigma-hardened high-entropy alloy at different annealing temperatures // *Materials Science and Engineering: A*. – 2022. – V. 831. – P. 142140. DOI: 10.1016/j.msea.2021.142140

18. Cheng J. B., Liang X. B., Xu B. S. Effect of Nb addition on the structure and mechanical behaviors of CoCrCuFeNi high-entropy alloy coatings // Surface and Coatings Technology. – 2014. – V. 240. – P. 184–190. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.12.053
19. Leyland A., Matthews A. Design criteria for wear-resistant nanostructured and glassy-metal coatings // Surface and Coatings Technology. – 2004. – V. 177. – P. 317–324. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.09.011
20. Li Q., Lv S., Hu X., Lan Y., Liu J. Effects of Nb additions on the microstructure and tribological properties of Al_{0.25}CrFeNi_{1.75} high-entropy alloy // Intermetallics. – 2022. – V. 151. – P. 107715. DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107715
21. Li B., Zhang Z., Luo X., Chen K., Zhang J. Microstructure and friction properties of AlCrTiVNb_x high-entropy alloys via annealing manufactured by vacuum arc melting // Materials. – 2024. – V. 17, N 4. – P. 812. DOI: 10.3390/ma17040812
22. Jiang H., Jiang L., Qiao D., Lu Y., Wang T. Effect of niobium on microstructure and properties of the CoCrFeNb_xNi high entropy alloys // Journal of Materials Science & Technology. – 2017. – V. 33, N 7. – P. 712–717. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.09.01

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 661.834:621.355:539.26

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ КАТОДА LiNi_{0,8}Co_{0,1}Mn_{0,1}O₂ В ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ IN SITU РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

П. А. НОВИКОВ, канд. техн. наук, А. А. КОСЕНКО, А. А. ПОПОВИЧ, д-р техн. наук

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29Б

E-mail: novikov_pa@spbstu.ru

Поступила в редакцию 26.11.2025

После доработки 11.12.2025

Принята к публикации 15.12.2025

В данной работе представлены результаты in situ рентгенодифракционного исследования катодного материала LiNi_{0,8}Co_{0,1}Mn_{0,1}O₂, который рассматривается как один из наиболее перспективных для применения в современных литий-ионных аккумуляторах. Эксперименты проводились в режиме реального времени в ходе протекания электрохимических процессов заряда и разряда, что позволило проследить за изменением параметров кристаллической решетки и установить их взаимосвязь с механизмами интеркаляции и деинтеркаляции ионов лития.

Для анализа полученных данных использовался метод Ритвельда в сочетании с программным обеспечением TOPAS 5, что обеспечило высокую точность определения параметров элементарной ячейки. Установлено, что в процессе заряда параметр *a* монотонно уменьшается, тогда как параметр *c* демонстрирует нелинейную динамику: рост до напряжения 4,0 В сменяется снижением. При разряде наблюдается обратный характер изменения параметров.

Объем элементарной ячейки в ходе деинтеркаляции лития сокращается и достигает максимального уменьшения порядка 2% при напряжении 4,2 В по сравнению с полностью разряженным состоянием (2,7 В). Полученные результаты подтверждают устойчивость структуры материала при циклировании и позволяют оценить допустимый уровень внутренних напряжений, возникающих в процессе работы аккумулятора.

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, слоистый оксид, рентгеновская дифракция

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-36-44

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-665 от 6 августа 2025 г.)

ЛИТЕРАТУРА

1. Dunn B., Kamath H., Tarascon J.-M. Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices // Science. American Association for the Advancement of Science (AAAS). – 2011. – V. 334, N 6058. – P. 928–935.
2. Bhatt M. D., O'Dwyer C. Recent progress in theoretical and computational investigations of Li-ion battery materials and electrolytes // Physical Chemistry Chemical Physics (Royal Society of Chemistry). – 2015. – V. 17, N 7. – P. 4799–4844.
3. Nitta N. et al. Li-ion battery materials: present and future // Materials Today. – 2015. – V. 18, N 5. – P. 252–264.
4. Zhang Y., Song Y., Liu J. In Situ Polymerization Anchoring Effect Enhancing the Structural Stability and Electrochemical Performance of the $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ Cathode Material // ACS Appl. Mater. Interfaces. American Chemical Society. – 2023. – V. 15, N 15. – P. 19075–19084.
5. Xie Q., Cui Z., Manthiram A. Unveiling the Stabilities of Nickel-Based Layered Oxide Cathodes at an Identical Degree of Delithiation in Lithium-Based Batteries // Advanced Materials. – 2021. – V. 33, N 32. – P. 2100804.
6. Zhang J. et al. Nickel-rich layered cathode $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ mediated by a selective lattice doping towards high-performance lithium ion battery // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – V. 957. – P. 170400.
7. Zubi G. et al. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – V. 89. – P. 292–308.
8. Huang W. et al. Revealing Roles of Co and Ni in Mn-Rich Layered Cathodes // Advanced Energy Materials. – 2021. – V. 11, N 41. – P. 2102646.
9. Lee H. et al. Materials challenges in high-energy batteries enabling ultra-fast charging and non-flammable performance for electric vehicles // Front. Batter. Electrochem. – 2025. – V. 4. – P. 1636618.
10. Takegami D. et al. Valence study of $\text{Li}(\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ and $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$: The role of charge transfer and charge disproportionation // Phys. Rev. Materials. – 2024. – V. 8, N 5. – P. 055401.
11. Wu Z. et al. Ni-rich cathode materials for stable high-energy lithium-ion batteries // Nano Energy. – 2024. – V. 126. – P. 109620.
12. Mohanty D. et al. Unconventional irreversible structural changes in a high-voltage Li–Mn-rich oxide for lithium-ion battery cathodes // Journal of Power Sources. – 2015. – V. 283. – P. 423–428.
13. Hausbrand R. et al. Fundamental degradation mechanisms of layered oxide Li-ion battery cathode materials: Methodology, insights and novel approaches // Materials Science and Engineering: B. – 2015. – V. 192. – P. 3–25.

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА.

Часть 1. Обзор и прикладные задачи высокотехнологичного производства

С. А. ТЮРИНА¹, В. С. КАРЗАКОВА¹, В. Л. ДЕМИН¹, П. О. РУСИНОВ²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», РТУ МИРЭА

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук» (ИФХЭ РАН)

Поступила в редакцию 10.11.25

После доработки 29.01.2026

Принята к публикации 5.02.2026

В работе представлен обзор методов нанесения металлических покрытий на полимерные изделия, в том числе полученные аддитивным способом. Проанализированы области применения, методологические подходы, современные исследования и перспективы развития. Описана доступная и безопасная методика химической металлизации 3D-печатных полимеров, не требующая специализированного оборудования и токсичных реактивов, что делает ее идеальной для многих отраслей производства.

Ключевые слова: 3D-печать, LCD-печать, химическая металлизация, меднение, технологии аддитивного производства, функциональные покрытия, электроника

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-45-55

Настоящее исследование было осуществлено в рамках реализации проекта «Разработка технологии получения наноструктурированных композиционных материалов нового поколения с низким удельным объемным электрическим сопротивлением и функциональных покрытий» в целях достижения результатов федерального проекта «Университеты для поколения лидеров» национального проекта «Молодежь и дети».

ЛИТЕРАТУРА

1. Dudek P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements // Arch. Metall. Mater. – 2013. – V. 58, Is. 4. – P. 1415–1418.
2. Layani M., Wang X., Magdassi S. Novel Materials for 3D Printing by Photopolymerization // Adv. Mater. – 2018. – V. 30, Is. 41. – Art. 1706344.
3. Wang X., Jian M., Zhou Z., Gou J., Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective // Composites Part B. – 2017. – V. 110. – P. 442–458.
4. Patent US 4863538 A: Deckard C. R. Method and apparatus for producing parts by selective sintering.
5. Boulaala M., Elmessaoudi D., Buj-Corral I., El Mesbahi J., Ezbakhe O., Astito A., El Mrabet M., El Mesbahi A. Towards design of mechanical part and electronic control of multi-material/multicolor fused deposition modeling 3D-printing // Adv. Manuf. Technol. – 2020. – V. 110. – P. 45–55.
6. Daminabo S. C., Goel S., Grammatikos S. A., Nezhad H. Y., Thakur V. K. Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D-printing): techniques for polymer material systems // Mater. Today Chem. – 2020. – V. 16. – Art. 100248.

7. Al Rashid A., Alim Khan Sh., Al-Ghamdi S. G., Koç M. Additive manufacturing of polymer nanocomposites: Needs and challenges in materials, processes, and applications // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – V. 14. – P. 910–941.
8. Angel K., Tsang H.H., Bedair S.S., Smith G.L., Lazarus N. Selective electroplating of 3D-printed parts // *Additive Manufacturing*. – 2018. – V. 20. – P. 164–172.
9. Hong Zh., Zhang Zh., You R., Chen J., Li Sh., Wang Y., Sun Y., Song B., Ji Zh., Loy D. A., Liang R. Dual-head multi-photon polymerization 3D printing for parallel additive manufacturing organic/inorganic materials in optics // *Additive Manufacturing*. – 2025. – V. 103. – Art. 104772.
10. Yousaf A., Al Rashid A., Polat R., Koç, M. Potential and challenges of recycled polymer plastics and natural waste materials for additive manufacturing // *Sustainable materials and technologies*. – 2024. – V. 41. – Art. 01103.
11. Воруничев Д.С., Костин М.С. Исследование профилограммной структуры микрополосковых СВЧ-модулей, изготовленных по аддитивной технологии трехмерной печати // *Russian Technological Journal*. – 2023. – V. 11, N 5. – P. 34–44. URL: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-34-44>
12. Иванов В.С., Гладкий Д.А., Воруничев Д.С. LPKF-LDS-технология производства трехмерных схем на пластиках // *Russian Technological Journal*. – 2021. – V. 9, N 1. – P. 48–57. URL: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-48-57>
13. Sun B., Dong W., Liu Ch., Xing Y., Sun J., Liang X., Duan H., Jia X. A critical review on additive manufacturing of continuous fiber-reinforced polymer composites: Materials, fabrication, structural design and novel functions // *Thin-Walled Structures*. – 2025. – V. 215, – Art. 113491.
14. Kong X., Sun G., Luo Q., Brykin V., Qian J. Experimental and theoretical studies on 3D-printed short and continuous carbon fiber hybrid reinforced composites // *Thin-Walled Struct.* – 2024. – V. 205. – Art. 112406.
15. Карзакова, В. С., Тюрина С. А., Демин В. Л. О характере поведения танина в роли сенсбилизатора для химического меднения при выдержке в его растворе и введении в объем материала // *Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2025): Сборник докладов Национальной научно-технической конференции с международным участием, Москва, 7–12 апреля 2025 года*. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2025. – С. 478–482.
16. Карзакова В. С., Тюрина С. А., Демин В. Л. Влияние времени выдержки объемно-сенсбилизированной смолы, используемой для печати LCD-методом, в растворе активатора на качество осаждения медного покрытия // *Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех - 2024): Международная научно-техническая конференция, Москва, 2–8 декабря 2024 года*. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. – С. 464–470.
17. Wright J. G., Charnay B. P., Rabinowitz J. A., Mariano R. G., Kanan M. W. Rapid prototyping of lab-scale electrolysis cells using stereolithography and electroless plating // *Device*. – 2023. – V. 1, Is. 2. – Art. ID 100049. ISSN: 2666-9986. DOI: 10.1016/j.device.2023.100049
18. Kucherov F. A., Romashov L. V., Ananikov V. P. Development of 3D+G printing for the design of customizable flow reactors // *Chemical Engineering Journal*. – 2022. – V. 430, Part 1. – Art. ID 132670. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132670

19. Gerges T., Semet V., Lombard P., Allard B., Cabrera M. Rapid 3D-Plastronics prototyping by selective metallization of 3D printed parts // Additive Manufacturing. – 2023. – V. 73. – Art. ID 103673. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103673
20. Perera A. T. K., Wu K., Wan W. Y., Song K., Meng X., Umezu S., Wang Y., Sato H. Modified polymer 3D-printing enables the formation of functionalized micro-metallic architectures // Additive Manufacturing. – 2023. – V. 61. – Art. ID 103317. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103317

УДК 678.067:621.793.16

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА.

Часть 2. Технологические особенности получения медного покрытия на элементах СВЧ-техники

С. А. ТЮРИНА¹, В. С. КАРЗАКОВА¹, В. Л. ДЕМИН¹, П. О. РУСИНОВ²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», РТУ МИРЭА

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук, ИФХЭ

Поступила в редакцию 10.11.2025

После доработки 29.01.2026

Принята к публикации 5.02.2026

В настоящей работе представлены результаты исследования по разработке и оптимизации технологии химической металлизации полимерных изделий, полученных методом масочной стереолитографии (mSLA, LCD), с целью создания функциональных медных покрытий для применения в СВЧ-технике. Основное внимание уделено разработке методики объемной сенсibilизации фотополимерной смолы с использованием дубильной кислоты (танина) в качестве альтернативы традиционным сенсibilизаторам. Изучено влияние параметров аддитивного процесса (сглаживания) на эффективность активации поверхности. Полученные результаты демонстрируют потенциал предложенной технологии для быстрого прототипирования и мелкосерийного производства легких полимерных компонентов СВЧ-устройств с проводящими поверхностями.

Ключевые слова: аддитивное производство, стереолитография (SLA), химическая металлизация, меднение, объемная сенсibilизация, СВЧ-техника

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-56-65

Настоящее исследование было осуществлено в рамках реализации проекта «Разработка технологии получения наноструктурированных композиционных материалов нового поколения с низким удельным объемным электрическим сопротивлением и функциональных покрытий» в целях достижения результатов федерального проекта «Университеты для поколения лидеров» национального проекта «Молодежь и дети».

ЛИТЕРАТУРА

1. Tyurina S., Karzakova V., Demin V. et al. Development and research of gradient polymer-metal materials obtained using additive technologies, with an assessment of their functional and mechanical properties // Polymers. – 2025. – V. 17, No 22. – P. 3014. DOI: 10.3390/polym17223014

2. Lopez A. G. et al. Optimization and fabrication by 3D-printing of a volcano smoke antenna for UWB applications // Proc. 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2013.
3. Воруничев Д. С., Костин М. С. Исследование профилограммной структуры микрополосковых СВЧ-модулей, изготовленных по аддитивной технологии трехмерной печати // Russian Technological Journal. – 2023. – Т. 11, № 5. – С. 34–44. URL: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-34-44>
4. Proyavin M. D. et al. Application of chemical metallization of photopolymer structures additive technology in the production of components for electronic devices // Micromachines. – 2023. – V. 14, N 10. – P. 1897. URL: <https://doi.org/10.3390/mi14101897>
5. Petrova M. et al. Electroless metallisation of ABS polymer samples produced by different technologies // Transactions of the Institute of Metal Finishing. – 2021. – V. 99, N 4. – P. 188–193.
6. Карзакова В. С., Тюрина С. А., Демин В. Л. Исследование и анализ технологии химической металлизации полимерных изделий, получаемых методами аддитивного производства // Труды междунар. науч.-техн. конф. «Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024)». – М.: РТУ МИРЭА, 2024.
7. Gerges T. et al. Rapid 3D-Plastronics prototyping by selective metallization of 3D printed parts // Additive Manufacturing. – 2023. – V. 73. – Art. 103673.
8. Shaikh M. S. N. M., Ahuja B. B. Effects of primary and secondary metallization techniques on the performance of electric discharge machining (EDM) electrode produced by additive manufacturing and composite coating // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 41. – P. 874–885.
9. Lu X. et al. Flexible ABS hollow waveguides with an inner copper coating for terahertz transmission // Optics & Laser Technology. – 2022. – V. 148. – P. 107700.
10. Liu S. et al. Copper coated PEEK hollow waveguide and durability investigations for low-loss and bendable transmission of low-frequency terahertz wave // Infrared Physics & Technology. – 2023. – V. 131. – P. 104674.
11. Dimitriadis A. I. et al. Polymer-based additive manufacturing of high-performance waveguide and antenna components // Proceedings of the IEEE. – 2016. – V. 105, N 4. – P. 668–676.
12. Feito S. M. et al. Gap waveguide slot array antenna based on a metal-only solution using additive manufacturing with multifunctional sum/difference radiation pattern // Scientific Reports. – 2025. – V. 15, N 1. – P. 5242.
13. Jafferson J. M., Vinu H., Sekaran K. A study of additive manufacturing technologies and metallizing techniques for microwave waveguide components // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 46. – P. 1328–1334.
14. Quint A. et al. Metallization Processes for 3D Printed Rectangular Waveguides in E-and D-Band // Proc. 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – IEEE, 2025. – P. 1–5.
15. Garcia-Tejero A., Burgos-Garcia M., Merli F. Broadband Metallized Plastic Waveguide Antenna with Robust Isolation Interface at 77 GHz // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2024. – V. 23, N 10. – P. 2875–2879.
16. Balanis C. A. Evolution of Antenna Technology: Apertures, waveguides, horns, and Vivaldi // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2024. – V. 66, N 6. – P. 29–36. DOI: [10.1109/MAP.2024.3428920](https://doi.org/10.1109/MAP.2024.3428920)
17. ГОСТ 25142-82 (СТ СЭВ 1156–78). Шероховатость поверхности. – М., 1982.

18. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М., 1973.
19. ASTM F1529-02. Standard Test Method for Sheet Resistance Uniformity Evaluation by In-Line FourPoint Probe with the Dual-Configuration Procedure.
20. Shan Y. et al. Reducing lateral stair-stepping defects in liquid crystal display-based vat photopolymerization by defocusing the image pattern // Additive Manufacturing. – 2022. – V. 52. – Art. 102653.
21. Tang J. F. et al. Pioneering techniques for achieving high-resolution, ultrasmooth surfaces via LCD 3D printing technology // Additive Manufacturing. – 2025. – V. 103. – Art. 104764

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 661.666.2

СМЯТИЕ НАНОПЛАСТИНОК ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА МЕЖДУ СЛОЯМИ ОКИСЛЕННОГО КАМЕННОУГОЛЬНОГО ПЕКА ПРИ КАРБОНИЗАЦИИ И ГРАФИТАЦИИ

А. В. ДМИТРИЕВ¹, канд. техн. наук, Б. А. КУЛЬНИЦКИЙ², д-р физ.-мат. наук

¹ ФГБОУ «Челябинский государственный университет»,

454001, Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129. E-mail: avdm@ya.ru

² ФГБНУ «Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов НИЦ „Курчатовский институт“», 108840, Москва, Троицк, ул. Центральная, 7а.

E-mail: boris@tisnum.ru avdm@ya.ru

Поступила в редакцию 15.08.2025

После доработки 24.11.2025

Принята к публикации 24.12.2025

Исследовали материал на основе смеси каменноугольного пека и на порядок меньшего по весу количества терморасширенного графита. Тонкие слои пека на поверхности сот графита отверждали кислородом воздуха при нагреве. После коксования и после графитации спрессованных заготовок неравномерные усадки фаз привели к механической деформации кристаллической структуры скрепленных с слоями пекового кокса стенок сот терморасширенного графита. После коксования размеры блоков мозаики в перпендикулярном слоям графита направлении снизились в два раза. После графитации межслоевое расстояние графита в стенках сот возросло вследствие усадки при остывании.

Ключевые слова: графит, монокристалл, каменноугольный пек, онионоподобная структура, термическое расширение, усадка, смятие, предел прочности, межплоскостное расстояние

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-66-74

ЛИТЕРАТУРА

1. Соседов В. П. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник. – М.: Металлургия, 1975. – 334 с.
2. Wang Y., Panzig J., Kiefler B. et al. Crystal Structure of Graphite under Room-Temperature Compression and Decompression // Scientific Reports. – 2012. – V. 2, Art. 520.
3. Wan J., Jiang J-W., Park H. et al. Irreversible crumpling of graphene from hydrostatic and biaxial compression // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2017. – N 51 (1). DOI: 10.1038/srep00520
4. Дмитриев А. В. Научные основы разработки способов снижения удельного электрического сопротивления графитизированных электродов. – Челябинск: ЧелГПУ, 2005. – 198 с.

5. Дмитриев А. В. Особенности микроструктуры углеродных материалов на основе каменно-угольного пека окисленного на поверхности сот ТРГ // Химия твердого топлива. – 2013. – Т. 47, № 6. – С. 48–54. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20446800> (дата обращения 24.12.2025)
6. Dmitriev A. V., Kulnitskiy B. A. Oxidative nanostructuring in thin films of coal tar pitch // Materials today: Proceedings. – 2018. – V. 5, N 12. – P. 26068–26072. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.08.031.
7. Привалов В. Е., Степаненко М. А. Каменноугольный пек: получение, переработка, применение. – М.: Металлургия, 1981. – 208 с.
8. Фиалков А. С. Углерод. Межслоевые соединения графита и композиты на его основе. – М.: АспектПресс, 1997. – 718 с.
9. Ершов А. А., Дмитриев А. В. Использование природного чешуйчатого графита в калибровке инструментальных методов исследования // Химия твердого топлива. – 2023. – Т. 47, № 4. – С. 55–63. DOI: 10.31857/S0023117723040035
10. Дмитриев А. В., Шанина О. М., Кульницкий Б. А. Тонкая структура кокса из каменноугольного пека, окисленного на поверхности пенографита // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Металлургия. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 149–156. DOI: 10.14529/met160122
11. Chen G. Weng W., Wu D. et al. Preparation and characterization of graphite nanosheets from ultrasonic powdering technique // Carbon. – 2004. – No 42. – P. 753–759.

УДК 678.743.41

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ

А. А. УШКАНОВ, Н. Н. ЛАЗАРЕВА, канд. техн. наук, А. А. ОХЛОПКОВА, д-р техн. наук
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова»,
677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Белинского, 58. E-mail:
alexanderushkanov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2025

После доработки 28.10.2025

Принята к публикации 3.12.2025

В работе приведены результаты трибологических и структурных исследований композитов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) и базальтового волокна (БВ) с добавлением ультрадисперсного ПТФЭ марки FORUM®. Трибологические исследования продемонстрировали существенное повышение износостойкости композитов по сравнению с чистым ПТФЭ, несмотря на небольшой рост коэффициента трения. Такое поведение свидетельствует о положительном влиянии механической обработки БВ на эксплуатационные параметры материалов. Структурные исследования показали аморфную природу БВ, образование вторичной структуры на поверхности трения ПКМ и неравномерность распределения волокон в матрице ПТФЭ. Установлено, что удаление замасливателя с поверхности волокон нецелесообразно для разработки фторкомпозитов триботехнического назначения. Полученные результаты подчеркивают эффективность планетарной шаровой мельницы «Активатор 2S» для механической обработки БВ с целью создания ПКМ с улучшенными трибологическими характеристиками.

Ключевые слова: полимер, ПКМ, трибология, износостойкость, защитный слой, полимерный композит, предварительная обработка, структура

ЛИТЕРАТУРА

1. Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2018. – V. 1. – P. 247–268. DOI: 10.1007/s42114-018-0023-8
2. Vikas G., Sudheer M. A Review on Properties of Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites // *American Journal of Materials Science*. – 2017. – V. 5. – P. 156–165. DOI: 10.5923/j.materials.20170705.07
3. Yan L., Chu F., Tuo W., Zhao X., Wang Y., Zhang P., Gao Y. Review of research on basalt fibers and basalt fiber-reinforced composites in China (I): Physicochemical and mechanical properties // *Polymers and Polymer Composites*. – 2020. – V. 9. – P. 1612–1624. DOI: 10.1177/0967391120977396
4. Swentek I., Thompson J., Meirson G., Ugresic V., Henning F. Comparison of basalt, glass, and carbon fiber composites using the high pressure resin transfer molding process // *Western University*. – 2016. – P. 1–25.
5. Машков Ю. К. На основе политетрафторэтилена, оптимизация их состава и технологии // *Вестник СибАДИ*. – 2010. – № 4 (18). – С. 17–21.
6. Mehra N., Mu L., Ji T., Zhu J. Thermal conduction in polymer composites // *Polymer-Based Multifunctional Nanocomposites and Their Applications*. – 2019. – V. 3. – P. 77–110. DOI: 10.1016/B978-0-12-815067-2.00003-2
7. Стручкова Т. С., Васильев А. П., Чо Дж.-Х., Влияние оксида алюминия на свойства политетрафторэтилена // *Арктика XXI век. Технические науки*. – 2014. – № 1 (2). – С. 3–10.
8. Рыбин В. А. Физико-химическое исследование базальтового волокна с защитными щелочестойкими покрытиями // дис. ... канд. хим. наук. – Новосибирск, 2016. – 143 с.
9. Кузьмин К. Л. Влияние химического состава и поверхностной модификации на механические свойства алюмосиликатных волокон // дис. ... канд. хим. наук. – Москва, 2017. – 148 с.
10. Eduard K., Rainer G., Jona S. Basalt, glass and carbon fibers and their fiber reinforced polymer composites under thermal and mechanical load // *AIMS Materials Science*. – 2016. – V. 3, Is. 4. – P. 1561–1576. DOI: 10.3934/matersci.2016.4.1561
11. Охлопкова А. А., Васильев С. В., Гоголева О. В. Исследование влияния базальтового волокна на физико-механические характеристики композитов на основе политетрафторэтилена // *Арктика. XXI век. Технические науки*. – 2014. – № 1 (2). – С. 11–18.
12. Жуковская Е. С., Павлов Ю. В., Попов С. С., Гутников С. И. Стадия ионного обмена в технологии получения непрерывных базальтовых волокон // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2020. – № 2. – С. 99–103. DOI: 10.17513/mjpf.130187
13. Prasad V., Talupula S. A review on reinforcement of basalt and aramid (Kevlar 129) fibers // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – V. 2. – P. 5993–5998. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.202
14. Negrov D. A., Putintsev V. Yu. Improvement of pressing technology of products from polytetrafluoroethylene // *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* – 2021. – V. 14. – P. 564–571.

15. Цветников А. К. Энерго- и ресурсосберегающие материалы на основе ультрадисперсного низкомолекулярного политетрафторэтилена // Вестник ДВО РАН. – 2021. – № 5 (219). – С. 79–94.
16. Vasiliev A. P., Struchkova T. S., Nikiforov L. A., Okhlopkova A. A., Grako-vich P. N., Shim E. L., Cho J.-H. Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Composites with Carbon Fiber and Layered Silicate Fillers // Molecules. – 2019. – V. 2. – P. 224. DOI: 10.3390/molecules24020224
17. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. – 2018. – V. 1. – P. 3–39. DOI: 10.1016/j.aiepr.2018.05.001
18. Dangsheng X. Friction and wear properties of UHMWPE composites reinforced with carbon fiber // Materials letters. – 2005. – V. 2–3. – P. 175–179.
19. Fan X., Li G., Guo Y., Zhang L., Xu Y., Zhao F., Zhang G. Role of reinforcement types and silica nanoparticles on tribofilm growth at PTFE-Steel interface // Tribology International. – 2020. – V. 143. – P. 106035. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106035

УДК 678.073:534

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СФОРМИРОВАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ FDM ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

И. В. ЗЛОБИНА^{1,2}, канд. техн. наук, Н. В. БЕКРЕНЕВ¹, д-р техн. наук, А. С. ЕГОРОВ^{1,2}, канд. хим. наук, А. В. АНИСИМОВ³, д-р техн. наук, Д. С. АЛЕКСАНДРОВА^{1,2}, Д. О. ЧУРИКОВ¹

¹ ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина», 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77. E-mail: zlobinaiv@sstu.ru

² ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

³ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18.

Поступила в редакцию 22.09.2025

После доработки 5.12.2025

Принята к публикации 18.12.2025

Выполнены исследования процесса ультразвуковой контактной обработки монослоя, полученного по аддитивной технологии FDM филаментами из термопластов полиамид-6 (ПА-6) и полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), армированными жгутами (препрегами) углеродных волокон, пропитанных эпоксидным связующим (ЭД-20+ПЭПА). Используются резонансные частоты 22 и 44 кГц. Установлено, что ультразвуковые колебания при воздействии на композитные монослои ПА-6 и ПЭЭК в течение 30 с вызывают их деформацию соответственно на 5 и 0,5 мкм при частоте 22 кГц. При частоте 44 кГц деформация достигает 10 и 1 мкм. При этом в области воздействия источника ультразвука отмечается местное повышение температуры до (40-43)°С для ПА-6 и (46-55)°С для ПЭЭК. При нагреве до аналогичных температур и статичном силовом воздействии деформация монослоя на ПА-6 составила 2 мкм, для монослоя ПЭЭК деформация не обнаружена. На оптических микрофотографиях в области силового воздействия в условиях ультразвуковых колебаний отмечаются микроволны, а на частоте 44 кГц – проявления интенсивного течения и перемешивания связующего. При нагреве со статичным нагружением наблюдается ровная морфология поверхности, отмечается закрытие имевшихся микропузырьков газа и микротрещин. Таким образом, в

условиях контактного воздействия ультразвука происходят изменения морфологии поверхности и структуры материала монослоя, свидетельствующие о его уплотнении, что может способствовать усилению механического и физического контакта связующего и наполнителя и, соответственно, повышению его физико-механических свойств. При прочих равных условиях предпочтительнее использование ультразвука больших частот.

Ключевые слова: аддитивные технологии, композитный монослой, филаменты, армированные непрерывным углеродным волокном, ультразвук, частота, пластическая деформация, температура нагрева, морфология поверхности

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-85-96

Аналитические исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ «Курчатовский институт».

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФ 23-79-00039.

ЛИТЕРАТУРА

1. Габова М. А. Применение композиционных материалов при добыче нефти и газа // Вестник ГУУ. – 2012. – № 10. – С. 88–92.
2. Балашов А. В., Маркова М. И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618> (дата обращения 18.12.2025)
3. Петров В. М., Безпальчук С. Н., Яковлев С. П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9, № 4. – С. 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776
4. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.
5. Matsuzaki, R., Ueda, M., Namiki, M., et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation in Scientific reports. – March, 2016. – V. 6.
6. Копытина М., Карпова Т., Сацкая З., Куликова С., Ерошкина Е., Антонов Ф. Аддитивные технологии для композитных материалов // Аддитивные технологии. – 2019. – № 3. – С. 48.
7. Microwave processing of materials / National Materials Advisory Board. – Washington: National Academies Press, 1994. – 150 p.
8. Архангельский Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник – Саратов: Научная книга, 2011.
9. Singh I., Kumar Bajraia P., Malika D., Kumar Sharma A., Kumar P., Feasibility study on microwave joining of 'green' composites // Akademeia. – 2011. – N 1 (1). – P. 1–6.
10. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1968. – 312 с.
11. Злобина И. В., Бекренев Н. В. О механизме повышения механических характеристик отвержденных полимерных композиционных материалов под действием СВЧ электромагнитного поля // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 158–169.
12. Jaegeun T., Lee K., Lee K.-H. Microwave heating of carbon-based solid materials // Carbon Letters. – 2014. – V. 15, N 1. – P. 15–24.

13. Kwak M. et al. Microwave Curing of Carbon-Epoxy Composites: Penetration depth and material characterisation // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, August. – V. 7. – P. 18–27.
14. Студенцов В. Н., Пятаев И. В. Влияние колебательных воздействий на процессы структурообразования в полимерах // Журнал прикладной химии. – 2014. – Т. 87, вып. 3. – С. 389–392.
15. Студенцов В. Н., Мизинцов А. А. Модифицирование армированных полимерных материалов // Химические волокна. – 2001. – № 5. – С. 29–32.
16. Черемухина И. В., Студенцов В. Н., Мурадов А. Б., Кузнецов В. А. Различные способы физической модификации армированных реактопластов // Пластические массы. – 2007. – № 4. – С. 12–16.
17. Чернышев В. М. Демпфирование колебаний механических систем покрытиями из полимерных материалов. – М.: Наука, 2009. – 288 с.
18. Паршина Л. В., Рябов В. М., Ярцев Б. А. Рассеяние энергии при колебаниях неоднородных композиционных структур. 1: Постановка задачи // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. – 2018. – Т. 5 (63), вып. 2. – С. 300–309.
19. Паршина Л. В., Рябов В. М., Ярцев Б. А. Рассеяние энергии при колебаниях неоднородных композиционных структур. 2: Метод решения // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. – 2018. – Т. 5 (63), вып. 4. – С. 678–688.
20. Беляев Н. М. Соппротивление материалов. – М.: Гостехиздат, 1956. – 856 с.

УДК 678.067.2

ПОЛИВОЛОКНИСТЫЕ ГИБРИДНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ (ОБЗОР)

А. В. АНИСИМОВ, д-р техн. наук, Н. С. ЛУКИЧЕВА, Д. А. ПЕТРОВА, канд. техн. наук,
А. Ю. КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук, О. И. ГЛАДУНОВА, Н. В. ДИАНКИНА
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18. E-mail: nvkm@sutd.ru

Поступила в редакцию 1.12.2025

После доработки 10.12.2025

Принята к публикации 18.12.2025

В обзоре приведены основные направления современных исследований, касающихся создания поливолоконистых гибридных полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных непрерывными наполнителями из волокон различной природы. Описано два подхода к созданию гибридных ПКМ: первый – межслоевой (формование гибридных ламинатов с монослоями из различных волокон), второй – внутрислоевой (формование композитов, армированных гибридными материалами, сотканными из различных волокон). Описаны преимущества и недостатки каждого. Показано, что путем сочетания разнотипных армирующих волокон возможно создать новое поколение конструкционных и защитных материалов с заданным комплексом эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, гибридные материалы, гибридные ламинаты, гибридные армирующие ткани

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-97-114

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-13-20053. URL: <https://rscf.ru/project/25-13-20053>) и средств софинансирования: Санкт-Петербургского научного фонда (договор № 25-13-20053 от 12.08.2025) и квалифицированного заказчика: НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» (договор № 23-09/2/25/11-296 от 15.07.2025).

ЛИТЕРАТУРА

1. Hamza M. S. Fabrication and Characterization of Hybrid Laminate Unsaturated Polyester Composites – 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/312135846_Fabrication_and_Characterization_of_Hybrid_Laminate_Unsaturated_Polyester_Composites (дата обращения: 25.09.2025)
2. Venkateswara B. P., Boggarapu V., Rajani D. et al. Investigation on mechanical and thermal behaviour of graphene bonded carbon/Kevlar hybrid fabric polymer composites // Journal of Engineering and Applied Science. – 2024. – N 71. – Art. 113. URL: <https://jeas.springeropen.com/articles/10.1186/s44147-024-00448-0> (дата обращения: 25.09.2025)
3. Анисимов А. В., Лишевич И. В., Саргсян А. С. и др. Разработка и исследование нового гибридного антифрикционного полимерного композиционного материала с диэлектрическими свойствами // Вопросы материаловедения. – 2025 – № 1 (121). – С. 90–98.
4. Witten E., Mathes V. Der europäische Markt für Faserverstärkte Kunststoffe / Composites 2024 Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Ausblicke // AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. – 2025. URL: <https://www.avk-tv.de/avk-marktbericht-2024/> (дата обращения 20.09.2025)
5. Ahmad F. Ab. G., Jamaluddin M. Hardness, tensile and microstructure assessment of carbon/glass hybrid composite laminate // Journal of Mechanical Engineering. – 2018. – N 15 (2). – P. 91–105.
6. Murugan R., Lakshmi Narasimhan R., Harish A. Effect of fiber orientation on effective stacking sequence of glass/carbon hybrid composite laminates for structural applications // Advances in Engineering Research (AER). – 2018. – N 142. – P. 204–209.
7. Murugan R., Ramesh R., Padmanabhan K. Investigation on static and dynamic mechanical properties of epoxy based woven fabric glass/carbon hybrid composite laminates // Procedia Engineering. – 2014. – V. 97. – P. 459–468.
8. Zhang C., Huang J., Li X., Zhang C. Numerical study of the damage behavior of carbon fiber/glass fiber hybrid composite laminates under low-velocity impact // Fibers and Polymers. 2020. – N 21 (12). – P. 2873–2887.
9. Журковский М. Е., Самойленко В. В., Фирсов В. В. и др. Исследование прочностных свойств гибридных материалов на основе углеродных и стеклянных тканей // Южно-Сибирский научный вестник. – 2018. – № 2 (22). – С. 21–27. DOI: 10.25699/SSSB.2018.22.15453
10. Erbayrak E., Yuncuoglu U., Kahraman Y., Gumus B. E. An experimental and numerical determination on low-velocity impact response of hybrid composite laminate // Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering. – 2020. – N 45. – P. 1485–1500.
11. Mohd F. B. I., Aidah J. Impact properties of hybrid fibre reinforced polymer composite laminates // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2020. – V. 3, N 9. – P. 2763–2766.

12. Azeem M., Haji Ya. H., Alam M. A., Sultan T. H., Ali M., Sattar M., Ahmad T., Hatami H., Sadique R., Mokhtar A. A., Mustapha M., Khan M. A., Masood F. Macroscale assessment of low-velocity impact on hybrid composite laminates // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. – 2021. – N 52 (10). – P. 1101–1111.
13. Satkar A., Mache A., Kulkarni A. Numerical investigation on perforation resistance of glass-carbon/epoxy hybrid composite laminate under ballistic impact // *Materials Today Proceedings*. – 2022. – N 59 (1). – P. 1–8.
14. Wang M., Pan Zh., Cai Q. et al. Effects of carbon/kevlar hybrid ply and intercalation sequence on mechanical properties and damage resistance of composite laminates under quasi-static indentation // *Polymers*. – 2024. – N 16 (13). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/13/1801> (дата обращения: 25.09.2025)
15. Hu L. Influence of layer angle and fiber type on the impact resistance of composite laminates // *Advances in Engineering Technology Research*. – 2025. – N 14 (1). – P. 846.
16. Xiang Yu., Zhang Zh. W., Yang X. et al. Failure mechanism of carbon /ultra-high molecular weight polyethylene twill fiber reinforced hybrid laminates under ballistic impact // *Materials & Design*. – 2022. – N 216. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026412752200199X?via%3Dihub> (дата обращения: 25.09.2025)
17. Li Y., Xian X. J., Choy C. L., Guo M., Zhang Z. Compressive and flexural behavior of ultra-high-modulus polyethylene fiber and carbon fiber hybrid composites // *Composites Science and Technology*. – 1999. – V. 59, Is. 1. – P. 13–18. DOI: 10.1016/S0266-3538(98)00056-6
18. Li Zh., Xue Y., Sun B., Gu B. Ballistic penetration damages of hybrid plain-woven laminates with carbon, Kevlar and UHMWPE fibers in different stacking sequences // *Defence Technology*. – 2023. – N 26. – P. 23–38.
19. Xu Y., Hong Zh., Guangyan H. Ballistic performance of UHMWPE laminate/modified aramid fabric composite structure based on support vector machine (SVM) method // *Composites Part B: Engineering*. – 2025. – N 307. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836825007619?via%3Dihub> (дата обращения: 25.09.2025)
20. Priyanka P., Mali H. S., Dixit A. Carbon–Kevlar intraply hybrid fabric polymer composites: mechanical performance // *Iranian Polymer Journal*. – 2023. – N 32. – P. 633–645.
21. Medeiros R. J., Nóbrega S. H. Sh., Aquino E. M. F. Failure theories on carbon/kevlar hybrid fabric based composite laminate: notch and anisotropy effects // *Materials Research*. – 2019. – N 22 (3). URL: <https://www.scielo.br/j/mr/a/yjnMpTPBMkkW68P7fH7byrn/?lang=en> (дата обращения: 20.09.2025)
22. Li X., Wu H., Yuan M. Low-velocity impact behavior of carbon-Kevlar fiber intraply hybrid composites // *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*. – 2025. – V. 65, Is. 6. – P. 1060–1069.
23. Hu Yu., Shi Ya., Liu D. et al. Damage tolerance of 2-dimensional UHMWPE/CF hybrid woven laminates subjected to low-velocity impact // *Materials & Design*. – 2020. – N 191 (6). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520301386?via%3Dihub> (дата обращения: 25.09.2025)
24. Кудинов В. В., Корнеева Н. В., Крылов И. К. и др. Гибридные полимерные композиционные материалы // *Физика и химия обработки материалов*. – 2008. – № 2. – С. 32–37.

25. Румянцева В. С., Лукичева Н. С., Штягина Л. М. Получение и исследование свойств композиционных материалов на основе стеклоткани и сверхвысокомодульного волокна с использованием фенолформальдегидной смолы в качестве связующего // Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы: тез. докл. 14-й всерос. науч. и студ. конф. – 2025. – Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. – Санкт-Петербург: ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2025. – С. 84–86
26. Кулагина Г. С., Кан А. Ч., Железина Г. Ф., Левакова Н. М. Антифрикционные материалы на основе полимерных волокон // Труды ВИАМ. – 2022. – № 11. DOI: [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-11-48-59](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-11-48-59). URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1939 (дата обращения: 25.09.2025)
27. Begum Sh., Fawzia S., Hashmi M. S. J. Polymer matrix composite with natural and synthetic fibres // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2020. – V. 3, N 6. – P. 547–564.
28. Seydibeyoglu M. Ö., Dogru A., Wang J. et al. Review on hybrid reinforced polymer matrix composites with nanocellulose, nanomaterials, and other fibers // *Polymers*. – 2023 – N 15 (4). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/4/984> (дата обращения: 25.09.2025)
29. Nguyen H., Zatar W., Mutsuyoshi H. Mechanical properties of hybrid polymer composite // *Hybrid Polymer Composite Materials*. – 2017. – P. 83–113.
30. Jomboh K. J., Garkida A., Alemaka E. M. et al. Properties and applications of natural, synthetic and hybrid fiber reinforced polymer composite: A review // *AIMS Materials Science*. – 2024. – V. 4, N 11. – P. 774–801.
31. Ismail S. O., Akpan E., Dhaka H. N. Review on natural plant fibres and their hybrid composites for structural applications: Recent trends and future perspectives // *Composites Part C: Open Access*. – 2022. – N 9. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682022000858?via%3Dihub> (дата обращения: 25.09.2025)
32. Santos Felipe R. C. T., Barbosa Felipe R. N., Caldas Batista A. C. M., Aquino E. M. F. Polymer Composites Reinforced with Hybrid Fiber Fabrics // *Materials Research*. – 2017. – N 20 (2). – P. 555–567. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2016-0587
33. Hufenbach W., Gude M., Ebert C. Hybrid 3D-textile reinforced composites with tailored property profiles for crash and impact applications // *Composites Science and Technology*. – 2009. – N 69 (9). – P. 1422–1426.
34. Patel D. K., Waas A. M. Damage and failure modelling of hybrid three-dimensional textile composites: a mesh objective multi-scale approach // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2016. – N 374. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0036> (дата обращения: 25.09.2025)

УДК 678.073:539

ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА И КОМПОЗИТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ (ОБЗОР)

И. В. ЗЛОБИНА^{1,2}, канд. техн. наук, Д. С. АЛЕКСАНДРОВА^{1,2},
А. С. ЕГОРОВ^{1,2}, канд. хим. наук, А. В. АНИСИМОВ³, д-р техн. наук

¹ ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина», 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77.

E-mail: zlobinaiv@sstu.ru

² ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

³ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18.

Поступила в редакцию 22.09.2025

После доработки 5.12.2025

Принята к публикации 18.12.2025

Настоящая работа посвящена обзору исследований, рассматривающих влияние различных видов ионизирующего и неионизирующего воздействия на свойства полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) и композитов на его основе. В рассмотренных исследованиях описываются изменения физических свойств ПЭЭК, таких как кристалличность, температуры фазовых переходов, а также протекание процессов сшивки и деградации полимерных цепей в зависимости от вида применяемого воздействия. Описываются макроскопические последствия происходящих изменений. Приведенные в настоящем обзоре работы позволяют как выбрать подходящий метод влияния на свойства изделий из ПЭЭК и его композитов, так и оценить возможности, перспективы и ограничения применения таких изделий в условиях воздействия высокоэнергетических излучений. Ввиду того, что в отечественных изданиях тематика освещена недостаточно, обзор выполнен по зарубежной литературе.

Ключевые слова: полиэфирэфиркетон, композитные материалы, неионизирующее воздействие, ионизирующее воздействие, физико-механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-115-128

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 23-79-00039 «Обоснование методологии комплексного модифицирования композиционных материалов для экстремальных условий эксплуатации на основе изучения фазово-структурных превращений под влиянием электрофизических воздействий различного частотного диапазона».

ЛИТЕРАТУРА

1. Liaw C. Y. et al. Interlayer bonding strength of 3D-printed PEEK specimens // *Soft matter*. – 2021. – V. 17, N 18. – P. 4775–4789.
2. Hanemann T. et al. Material extrusion 3D-printing of PEEK-based composites // *Polymers*. – 2023. – V. 15, N 16. – P. 3412.
3. Xu Q. et al. Enhanced interlayer strength in 3D-printed poly (ether ether ketone) parts // *Additive Manufacturing*. – 2022. – V. 55. – P. 102852.
4. Collinson D. W. et al. Direct evidence of interfacial crystallization preventing weld formation during fused filament fabrication of poly (ether ether ketone) // *Additive Manufacturing*. – 2022. – V. 51. – P. 102604.
5. Chen M. et al. The microwave processability of semicrystalline polymers // *Polymer Engineering & Science*. – 1993. – V. 33, N 17. – P. 1122–1131.
6. Littlefield A. G., Bartolucci S. F., Mauer J. A. A study on the use of graphene-peek composites as high temperature adhesives: mechanical properties and microwave activation // *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. – American Society of Mechanical Engineers. – 2017. DOI: 10.1115/IMECE2017-70412

7. Mohoppu M. et al. Rapid Microwave Bonding of Thermoplastics Substrates with Electromagnetically Susceptible Graphene/Poly (ether ether ketone) Segregated Nanoformulates // *ACS Applied Engineering Materials*. – 2025. – V. 3, N 8. – P. 2683–2696.
8. Zhang G. et al. Microwave sintering of poly-ether-ether-ketone (PEEK) based coatings deposited on metallic substrate // *Scripta materialia*. – 2006. – V. 55, N 7. – P. 621–624.
9. Ai J. R., Li S., Vogt B. D. Increased strength in carbon-poly (ether ether ketone) composites from material extrusion with rapid microwave post processing // *Additive Manufacturing*. – 2022. – V. 60. – P. 103209.
10. Qu H. et al. Ultrasonic-assisted reinforcement and annealing treatment of additive manufacturing polyether-ether-ketone // *Polymer Composites*. – 2023. – V. 44, N 3. – P. 1684–1695.
11. Khatri B., Roth M. F., Balle F. Ultrasonic welding of additively manufactured PEEK and carbon-fiber-reinforced PEEK with integrated energy directors // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2022. – V. 7, N 1. – P. 2.
12. Tao W. et al. Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding // *Journal of manufacturing processes*. – 2019. – V. 37. – P. 196–202.
13. Suzuki N. et al. Rapid formation of hydroxyapatite layer on polyetheretherketone by vacuum ultraviolet irradiation and microwave heating techniques // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. – 2016. – V. 124, N 1. – P. 49–54.
14. Gou Q. et al. Surface Modification of PEEK fabric via UV Irradiation, Air Plasma, and Oxygen Plasma: Effects on Adhesion to Epoxy Resin // *Surfaces and Interfaces*. – 2025. – P. 106644.
15. Hegazy E. S. A., Sasuga T., Seguchi T. Irradiation effects on aromatic polymers: 3. Changes in thermal properties by gamma irradiation // *Polymer*. – 1992. – V. 33, N 14. – P. 2911–2914.
16. Rival G., Paulmier T., Dantras E. Influence of electronic irradiations on the chemical and structural properties of PEEK for space applications // *Polymer Degradation and Stability*. – 2019. – V. 168. – P. 108943.
17. Rival G., Dantras E., Paulmier T. Electronic irradiation ageing in the vicinity of glass transition temperature for PEEK space applications // *Polymer Degradation and Stability*. – 2020. – V. 181. – P. 109305.
18. Kornacka E. M., Przybytniak G., Nowicki A. Radical processes initiated by ionizing radiation in PEEK and their macroscopic consequences // *Polymers for Advanced Technologies*. – 2019. – V. 30, N 1. – P. 79–85.
19. Almas N. et al. Mechano-chemical properties of electron beam irradiated polyetheretherketone // *Polymers*. – 2022. – V. 14, N 15. – P. 3067.
20. Al Lafi A. G. FTIR spectroscopic analysis of ion irradiated poly (ether ether ketone) // *Polymer degradation and stability*. – 2014. – V. 105. – P. 122–133.
21. Al Lafi A. G., Parker D. J., Hay J. N. The crosslinking of poly (ether ether ketone): Thermally and by irradiation // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2015. – V. 132, N 22.
22. Rashed K. et al. Investigation of effects induced by 57 MeV ⁵⁶Fe ions and 9 MeV protons on additively manufactured PEKK for space application // *Polymer Testing*. – 2024. – V. 132. – P. 108354.

УДК 621.791.754'293:669.14.018.295

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКИХ И КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАРТЕНСИТНО-
АУСТЕНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТИПА 08X16H5M3AB**

В. В. ГЕЖА, канд. техн. наук, Н. А. МОГИЛЬНИКОВА, П. В. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 10.11.2025

После доработки 17.11.2025

Принята к публикации 24.11.2025

Исследована структура, механические и коррозионные свойства металла сварных швов, выполненных аргонодуговой сваркой вольфрамовым неплавящимся электродом, ручной дуговой сваркой покрытыми электродами и механизированной сваркой в смеси газов с применением мартенситно-аустенитных материалов типа 08X16H5M3AB.

Ключевые слова: мартенситно-аустенитная структура, высокопрочные стали, аргонодуговая сварка вольфрамовым неплавящимся электродом (TIG), ручная дуговая сварка покрытым электродом (MMA), механизированная сварка в смеси газов (MAG)

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-129-136

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев С. Б., Головченко В. С., Горбач В. Д., Руссо В. Л. Основы сварки судовых конструкций. – СПб.: Судостроение, 2006. – 552 с.
2. Сварка и свариваемые материалы: Справ. изд. / Под ред. Волченко В. Н., Макарова Э. Л. – М.: Металлургия, 1991. – Т. 1: Свариваемость материалов. – 528 с.
3. Lippold J. C., Juhas M. C., Dalder E. N. C. The relationship between microstructure and fracture behavior of fully austenitic type 316L weld filler materials at 4.2 K // Metallurgical Transactions A. – 1985. – V. 16. – P. 1835–1848.
4. David S. A., Goodwin G. M., Braski D. N. Solidification behavior of austenitic stainless steel filler metals // Welding Journal. – 1979. – N 58 (11). – P. 330–336.
5. Arata Y., Matsuda F., Katayama S. Solidification Crack Susceptibility in Weld Metals of Fully Austenitic Stainless Steels (Report 1): Fundamental Investigation on Solidification Behavior of Fully Austenitic and Duplex Microstructures and Effect of Ferrite on Microsegregation // Transactions of JWRI. – 1976. – V. 5 (2). – P. 135.
6. Мушникова С. Ю. Влияние азота на коррозионные и коррозионно-механические свойства стали со структурой азотистого мартенсита / Блинов В. М., Калинин Г. Ю., Костина М. В. и др. // Металлы. – 2003. – № 4. – С. 84–92.
7. Липпольд Д., Котецки Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. – 467 с.
8. Сварка и свариваемые материалы: Справ. изд. / Под ред. Волченко В. Н., Макарова Э. Л. – М.: Металлургия, 1996. – Т. 2(3): Технология и оборудование. – 574 с.
9. Азбукин В. Г., Башаева Е. Н., Мещерякова Т. Н. и др. Повышение структурной стабильности мартенситной стали с регулируемым а- \rightarrow у превращением при отпуске // МиТОМ. – 1982. – № 9. – С. 10–13.

10. Лукин В. И., Ковальчук В. Г., Голев Е. В., Ходакова Е. А. Сварка высокопрочных коррозионно-стойких сталей // Труды ВИАМ. – 2015. – № 5. – С. 20–28.
11. Eichelman G. H., Hull F. C. The effect of composition on the temperature of spontaneous transformation of austenite to martensite in 18-8-type stainless steel // Transactions of the American Society for Metals. – 1953. – V. 45. – P. 77–104.
12. Kotecki D. J. Weld Dilution and Martensite Appearance in Dissimilar Metal Joining // International Institute of Welding (IIW) Document II-1438-01. – American Council of the International Institute of Welding, Miami, 2001.
13. Лазько В. Е., Лукин В. И., Максимович Т. Л. Особенности сварки высокопрочных коррозионно-стойких сталей большой толщины в термоупрочненном состоянии // Сварочное производство. – 2001. – № 11. – С. 3–6

УДК 621.791.14:[669.141.24+669.15–194.56]

ВЛИЯНИЕ СИЛОВОГО ПАРАМЕТРА РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЕЙ 32Г2 И 10Х11Н23Т3МР

Я. С. СЁМКА^{1,2}, Е. Ю. ПРИЙМАК^{1,2}, канд. техн. наук, И. Л. ЯКОВЛЕВА³, д-р техн. наук,
В. А. ТРУШОВ^{1,2}, С. В. КАМЕНЕВ¹, канд. техн. наук

¹ ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», 460018, Оренбург,
пр. Победы, 13. E-mail: elena-pijmak@yandex.ru

² АО «Завод бурового оборудования», 460026, пр. Победы, 118

³ Институт физики металлов УрО РАН, 620990 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

Поступила в редакцию 8.10.2025

После доработки 15.10.2025

Принята к публикации 27.10.2025

В рамках исследования были определены прочностные свойства при растяжении сварных соединений, полученных из углеродистой стали 32Г2 и аустенитной нержавеющей стали 10Х11Н23Т3МР. Процесс ротационной сварки заготовок (диаметром 73 мм и толщиной стенки 12 мм) варьировался по усилию на этапе трения. Результаты показали, что оптимальные прочностные и пластические характеристики сварного соединения 32Г2 – 10Х11Н23Т3МР достигаются при наименьшем усилии трения (70 кН), при прочих неизменных параметрах сварки (сила проковки 280 кН, частота вращения 800 об/мин, осадка при трении 6 мм). Повышение усилия трения до 140 кН и 210 кН приводит к хрупкому разрушению вдоль сварного стыка с минимальной пластической деформацией.

Дополнительный металлографический и фрактографический анализ с использованием сканирующей электронной микроскопии показал, что причиной снижения прочности и пластичности в таких случаях является образование протяженной карбидной фазы (Ti,V)C вдоль зоны контакта сталей, способствующей охрупчиванию.

Ключевые слова: ротационная сварка трением, разнородное соединение, сварное соединение, микроструктура, механические свойства, зона сопряжения, карбиды титана

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-137-146

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00333, <https://rscf.ru/project/25-29-00333/>

ЛИТЕРАТУРА

1. Martinsen K., Hu S. J., Carlson B. E. Joining of dissimilar materials // CIRP Ann. – 2015. – Is. 2, N 64. – P. 679–699.
2. Виль В. И. Сварка металлов трением. – М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.
3. Лебедев В. К. и др. Сварка трением: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1987. – 236 с.
4. Kurt A., Uygur I., Paylasan U. Effect of Friction Welding Parameters on Mechanical and Microstructural Properties of Dissimilar AISI 1010-ASTMB22 Joints // Welding Journal. – 2011. – N 90. – P. 102–106.
5. Li P., Li J., Salman M., Liang L., Xiong J., Zhang F. Effect of Friction Time on Mechanical and Metallurgical Properties of Continuous Drive Friction Welded Ti6Al4V/SUS321 Joints // Materials and Design. – 2014. – N 56. – P. 649–656.
6. Токарев А. С. Исследование эксплуатационных характеристик комбинированных соединений из стали 10X17H13M2T, полученных по различным технологиям // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20, № 6. – С. 206–212. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-6-206-212
7. Заводов С. А., Поляков А. Н., Павлов Л. А., Шатульский А. А. Разработка технологии ротационной сварки трением для изготовления детали «ротор» // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2023. – № 2 (65). – С. 126–131.
8. Бакрадзе М. М., Свиридов А. В., Овсепян С. В. и др. Особенности ротационной сварки трением гранулируемых и деформируемых жаропрочных никелевых сплавов // Сварочное производство. – 2022. – № 10. – С. 21–27.
9. Саморуков М. Л., Свиридов А. В., Рассохина Л. И., Битюцкая О. Н. Ротационная сварка трением литых и деформируемых полуфабрикатов жаропрочного никелевого сплава вж159 // Труды ВИАМ. – 2020. – № 1 (85). – С. 15–23. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-15-23
10. Бровко В. В. Применение прессовых методов сварки для соединений труб из высоколегированной стали // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 7–8. – С. 40–43.

УДК 621.791.754'293:669.15–194.56

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ
АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ТРУБНЫХ РЕШЕТОК
ИЗ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ**

С. В. ГУБА, Е. С. ЦАРЬКОВ, И. Г. БОРДЮЖИН

АО «НИКИМТ–Атомстрой», 127410, Москва, Алтуфьевское ш., 43, стр. 2.

E-mail: GubaSV@atomrus.ru

Поступила в редакцию 27.10.2025

После доработки 31.10.2025

Принята к публикации 11.12.2025

В статье представлен новый разработанный способ многопроходной автоматической аргонодуговой сварки труб малых диаметров (до 20 мм) и толщин стенки (до 4 мм) с заглубленной трубной решеткой из аустенитных сталей. Показано, что применение дистанционно управляемого оборудования, стандартных сварочных материалов и оптимальных параметров сварки обеспечивает формирование высококачественных сварных соединений, удовлетворяющих стандартам атомной промышленности, где особенно необходима сварка труб малых диаметров в ограниченных и труднодоступных пространствах при повышенных требованиях к качеству шва.

Ключевые слова: автоматическая аргодуговая сварка, трубная решетка, вольфрамовый электрод, сварной шов, ЖМТ-реактор

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-147-156

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжов С. Б., Зубченко А. С., Степанов В. С., Климов Н. Н. и др. Конструкционные материалы элементов активной зоны и первого контура реакторной установки СВБР-100 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Обеспечение безопасности АЭС». – 2009. – Вып. 24. – С. 123–131.
2. Каховский Н. И., Фартушный В. Г., Ющенко К. А. Электродуговая сварка сталей: Справочник. – 1975.
3. Носов С. И., Алексеенок П. А., Гуденко А. С., Змиенко Д. С. Термическая стабильность аустенитно-ферритных Cr–Ni–Nb сварных швов, дополнительно легированных кремнием // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 22–26.
4. Рунов А. Е. Исследование склонности к образованию горячих трещин хромоникелевой аустенитной и аустенитно-ферритной сталей // Сварочное производство. – 1971.
5. Sourmail T. Precipitation in creep resistant austenitic stainless steels // Materials Science and Technology. – 2001. – V. 17 (1). – P. 1–14.
6. Патент СССР № 897444, МПК В 23 К 31/06: Способ сварки труб в трубную доску. – Оpubл. 15.01.1982.
7. Патент РФ № RU 2586176C2, МПК В 23 К 37/04: Способ соединения пакета труб с трубными решетками и устройство для его осуществления. – Оpubл. 10.06.2016.
8. Патент КНР № CN 107150183A: Полностью автоматическое устройство для сварки труб и листового металла, а также система контроля работы устройства и метода сварки. – Оpubл. 12.09.2017.
9. НП-107-21: Правила устройства и безопасной эксплуатации корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутрикорпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2021. – 44 с.
10. Патент РФ № RU 2847901C1: Способ многопроходной автоматической аргодуговой сварки труб в заглублённую трубную решетку из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса без оплавления торцов труб. – Оpubл. 15.10.2025

УДК 621.791.052:620.17

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А. Е. ЗОРИН, д-р техн. наук

ООО «НИИ Транснефть», 117186, г. Москва, Севастопольский проспект, д. 47а

Поступила в редакцию 20.10.2025

После доработки 13.11.2025

Принята к публикации 17.12.2025

В настоящей статье представлены результаты исследований, направленных на повышение работоспособности сварных соединений. Была установлена взаимосвязь между различными уровнями данных о сварном соединении (режим сварки, формируемая

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал

«Вопросы материаловедения»

структура, базовые и специальные механические характеристики). Результаты позволили связать указанные данные разных уровней, что дает возможность при отсутствии необходимых сведений уточнить их на основании доступной информации другого уровня, а также расширить область применения и увеличить значимость фактических данных о сварном соединении, которые могут быть получены на этапе его эксплуатации. Кроме того, была изучена механическая неоднородность металла шва. Комплексные экспериментальные исследования включали проведение механических испытаний различных зон металла шва с использованием миниатюрных образцов. Результаты коррелировали с результатами испытаний, проведенных по стандартным методикам, таким образом появляется возможность изучения работоспособности металла дефектных зон, конструкций со сложной геометрией, различных зон сварных соединений и т.д. Установлено, что металл исследованных продольных швов труб магистральных нефтепроводов не имеет выраженной механической неоднородности.

Ключевые слова: сварное соединение, сварной шов, термический цикл сварки, структура сварного соединения, прогнозирование механических характеристик, трещины в металле шва, неоднородность металла шва, миниатюрные образцы

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-157-171

ЛИТЕРАТУРА

1. Идрисов Р. Х., Идрисов К. Р., Кормаков Д. С. Анализ аварийности магистральных трубопроводов России // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 2. – С. 44–46.
2. Аладинский В. В., Мельникова А. В. Формирование требований к геометрии и свойствам сварных соединений труб, обеспечивающих надежность трубопроводов // Наука и техника в газовой промышленности. – 2009. – № 4 (40). – С. 43–48.
3. Голиков Н. И., Аммосов А. П. Прочность сварных соединений резервуаров и трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях Севера. – Якутск: Издательский дом Северо-Восточного федерального университета, 2012. – 232 с.
4. Зорин А. Е., Временко А. В., Колесников О. И., Гончаров Н. Г., Юшин А. А., Скорняков А. А. Разработка эмпирической модели прогнозирования механических характеристик металла сварных соединений для оценки их работоспособности в процессе эксплуатации нефтепроводов и резервуаров // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 7. – С. 138–144.
5. Макаров Э. Л., Якушин Б. Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 487 с.
6. ГОСТ 1497-84: Металлы. Методы испытаний на растяжение.
7. ГОСТ 9454-78: Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенных температурах.
8. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х т. Пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 448 с.
9. Савкин А. Н., Андроник А. В., Корадди Р. Методика определения коэффициентов уравнения скорости роста трещины при циклическом нагружении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – Т. 82. – № 1. – С. 57–63.
10. Мамонтов В. А., Кужахметов Т. А., Иксанов Р. У., Ван Тинь Д. Построение диаграммы усталостного разрушения моделей судовых валов // Вестник АГТУ. – 2008. – № 5 (46). – С. 44–49.

11. ГОСТ 5639-82: Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
12. ГОСТ 5640-2020: Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского.
13. ГОСТ 8233-56: Сталь. Эталоны микроструктуры.
14. Окерблом Н. О., Демянцевич В. П., Байкова И. П. Проектирование технологии изготовления сварных конструкций. – Л.: Судпром ГИЗ, 1963. – 602 с.
15. Колганов Л. А. Сварочное производство. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. – 512 с.
16. Лупачев В. Г. Ручная дуговая сварка. – М.: Высшая школа, 2010. – 416 с.
17. Виноградов В.С. Оборудование и технология дуговой автоматической и механизированной сварки. – М.: Академия, 2001. – 319 с.
18. Зорин А. Е. Анализ структурных и термических процессов при сварке (для оптимизации технологии вырезки кольцевых сварных соединений трубопроводов) // Нефть, газ и бизнес. – 2011. – № 6. – С. 67–70.
19. Зорин А. Е., Деркач Д. В., Шерматов Д. Н., Кадыров Р. О., Зорин Е. Е. Исследование механической неоднородности металла шва с использованием миниатюрных образцов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2025. – Т. 15. – № 3. – С. 242–251.
20. Хасанов Р. Н., Гафарова В. А., Пивоваров В. Ю., Кузеев И. Р. Особенности разрушения тонких стальных образцов при растяжении // Нефтегазовое дело. – 2019. – № 2. – С. 94–111.
21. Волков И. А., Игумнов Л. А., Шишулин Д. Н., Тарасов И. С., Гусева М. А. Оценка усталостной долговечности компактного образца с концентраторами при термоциклическом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. – Т. 78. – № 3. – С. 333–349.
22. Самигуллина Л. Г. Разработка метода оценки остаточного ресурса нефтегазопроводов на основе испытаний микрообразцов: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19. – СПб., 2020. – 122 с.
23. Рахимкулов Р. Р. Сопоставление значений величины вязкости разрушения K_{Ic} , полученной на образцах с шевронной прорезкой и по стандартной методике для стали СтЗсп // Нефтегазовое дело. – 2010. – № 2. – С. 59–64.
24. BS CWA 15627-2007 Small Punch Test Method for Metallic Materials.
25. ГОСТ 25.506-85: Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
26. ASTM E 1304-97 (2020): Standard Test Method for Plane-Stain (Chevron-Notch) Fracture Toughness of Metallic Material.

УДК 621.791.016:620.171.32–974

**К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНТАЖНЫХ И РЕМОНТНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ КОНСТРУКЦИЙ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ
В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР СЕВЕРА**

Ю. Н. САРАЕВ¹, д-р техн. наук, Н. И. ГОЛИКОВ¹, д-р техн. наук, П. С. ДМИТРИЕВ¹,
С. В. СЕМЕНОВ¹, С. А. ШТОКОЛОВ², Д. В. ЗАВАРЫКИН²

¹ *Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1. E-mail: saraev.7s@yandex.ru*

² *Группа компаний «ВЭЛДНОВА», 350020, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Красная, д. 155/2*

Поступила в редакцию 15.08.2025

После доработки 31.10.2025

Принята к публикации 4.12.2025

Изложенный в статье материал является продолжением исследований, направленных на поиск путей повышения эффективности монтажных и ремонтных технологий конструкций ответственного назначения, работающих в условиях низких климатических температур Севера (см. статью Сараева Ю.Н., Горбача В.Д., Голикова Н.И. «Методология совершенствования технологий производства и ремонта судовых конструкций на основе комплексного применения современных технологий, источников питания и сварочных материалов», опубликованную в журнале «Вопросы материаловедения», 2025, № 1, с. 135–151).

Новые результаты были получены на основе разработки методов адаптивного импульсного управления характеристиками тепломассопереноса, обеспечиваемого за счет полного контроля за системой «источник питания – дуга – сварочная ванна – изделие» при различных возмущающих воздействиях. В статье изложены результаты исследований нового поколения сварочных и наплавочных электродов отечественного производства. Представленная концепция не охватывает всех многочисленных примеров, направленных на обеспечение эксплуатационной надежности конструкций на Севере, но позволяет проиллюстрировать один из немногих эффективных вариантов комплексного подхода к решению этих задач.

Ключевые слова: сварка, наплавка, тепломассоперенос, плавление, кристаллизация, структура, свойства, низкие климатические температуры, адаптивные импульсные технологии

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-172-182

Работа выполнена за счет средств Федерального бюджета, проект FWRS-2024-0034, и договора о сотрудничестве между ИФТПС ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск и группой компаний «Велднова», Краснодар.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слепцов О. И. и др. Технологическая прочность сварных соединений при низких температурах / отв. ред. В. П. Ларионов; АН СССР, Сиб. отд-ние, Якут. фил., Ин-т физ.-техн. проблем Севера. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1984. – 102 с.
2. Сараев Ю. Н., Гладковский С. В., Голиков Н. И. и др. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур // Научные технологии в проектах РФ. Сибирь. – Томск, 2017. – С. 134–202.
3. Кащенко Д. А., Брусницын Ю. Д., Баранов А. В. и др. Разработка электродов для сварки магистральных трубопроводов и морской техники из высокопрочных низколегированных хладостойких сталей // Сварочное производство. – 2017. – № 2. – С. 21–29.

4. Bai X., Colegrove P., Ding J. et al. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 124. – P. 504–516.
5. Сараев Ю. Н., Горбач В. Д., Голиков Н. И. Методология совершенствования технологий производства и ремонта судовых конструкций на основе комплексного применения современных технологий, источников питания и сварочных материалов // *Вопросы материаловедения*. – 2025. – № 1 (121). – С. 135–151. ISSN 1994-6716.
6. Сараев Ю. Н., Полетика И. М., Козлов А. В., Хомченко Е. Г. Формирование структуры и свойств сварных соединений в условиях регулируемого тепловложения при импульсно-дуговой сварке // *Физическая мезомеханика*. – 2005. – Т. 8, № 5. – С. 137–140.
7. Сидоров М. М., Голиков Н. И., Сараев Ю. Н., Тихонов Р. П. Управление уровнем остаточных напряжений в стыковых соединениях труб из низколегированных сталей ударно-механической обработкой // *Тяжелое машиностроение*. – 2023. – № 10. – С. 23–28.
8. Калинин В. Т., Рыбин В. В., Малышевский В. А. и др. Перспективы использования минерального и техногенного сырья Мурманской области для производства сварочных материалов и флюсов // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 3 (59). – С. 409–414.
9. Сараев Ю. Н., Лунев А. Г., Семенчук В. М., Непомнящий А. С. Кинетические особенности тепломассопереноса в условиях сварки и наплавки // *Известия вузов. Физика*. – 2019. – Т. 62, № 9 (741). – С. 34–40.
10. Bai X., Colegrove P., Ding J. et al. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 124. – P. 504–516.
11. Li Y., Su Ch., Zhu J. et al. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // *Results in Engineering*. – 2022. – V. 13. – P. 100330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>
12. Сараев Ю. Н., Лунев А. Г., Киселев А. С., Гордынец А. С., Тригуб М. В. Комплекс для исследования процессов тепломассопереноса при дуговой сварке // *Автоматическая сварка*. – 2018. – № 8. – С. 1–8.
13. Cheng Y., Wang Q., Jiao W. et al. Detecting dynamic development of weld pool using machine learning from innovative composite images for adaptive welding // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – V. 56, Part A. – P. 908–915. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.059>
14. Yang D., Wang G., Zhang G. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – V. 244. – P. 215–224. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec>
15. Wu K., Ding N., Yin T., Zeng M. et al. Effects of single and double pulses on microstructure and mechanical properties of weld joints during high-power double-wire GMAW // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – V. 35. – P. 728–734.
16. Saraev Yu. N., Lunev A. G., Perovskaya M. V., Semenchuk V. M., Gladkovsky S. V. Features of formation of structure and physical and mechanical properties of permanent welded joints of low-alloy steels by methods of adaptive pulse control of energy parameters of welding mode // *Materials Science Forum*. – 2018. – V. 938. – P. 124–131.

17. Saraev, Yu. N. Adaptive pulse technological processes of welding and pad weld is a new high-performance method of obtaining of permanent joints of high-strength steels // World J. Engineering. – 2011. – V. 8. – P. 989.
18. Scotti F.M., Teixeira F. R., da Silva L. J. et al. Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – V. 57. – P. 23–35. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024>
19. Liu C., Bhole S. D. Challenges and developments in pipeline weldability and mechanical properties // Science and Technology of Welding and Joining. – 2013. – V. 18, Is. 2. – P. 169–181.
20. Волков С. С., Коновалов А. В., Шестель Л. А. Исследование возможности применения ультразвуковой обработки для снижения остаточных напряжений и деформаций в сварных соединениях // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – № 2 (719). – С. 3–10. – DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-2-3-10>
21. Слепцов О. И., Михайлов В. Е., Петушков В. Г. и др. Повышение прочности сварных конструкций для Севера. – Новосибирск: Наука, 1989. – 223 с.

УДК 621.791.011:621.9.048.6

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ
ОБРАБОТКИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СЕВЕРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

М. М. СИДОРОВ¹, канд. техн. наук, А. Ю. МИХАЙЛОВ^{1,2}

¹ *Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1. E-mail: sidorovmm@bk.ru*

² *ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», 677000, г. Якутск, ул. Белинского, д. 58*

Поступила в редакцию 5.11.2025

После доработки 4.12.2025

Принята к публикации 9.12.2025

Исследована эффективность ультразвуковой ударной обработки (УУО) для управления остаточными напряжениями в сварных соединениях из низколегированной стали 10ХСНД-3, полученных сваркой при комнатной и отрицательной (–35°C) температурах. Методология включала ручную дуговую сварку с УУО в различных режимах мощности (340, 420 и 500 Вт), применяемой как в горячем состоянии, так и после полного остывания соединения. Остаточные напряжения измерялись рентгеновским методом. Установлено, что УУО трансформирует растягивающие остаточные напряжения в сжимающие. Наиболее эффективной является послесварочная обработка полностью остывшего сварного соединения на мощности 500 Вт, обеспечивающая формирование сжимающих напряжений до –337 МПа. Результаты применимы для повышения долговечности сварных металлоконструкций северного и арктического исполнения.

Ключевые слова: сварные соединения, послесварочная обработка, низколегированная сталь, остаточные сварочные напряжения, ультразвуковая ударная обработка

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-183-192

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по госуниверситетскому заданию СО РАН, шифр проекта FWRS-2024-0034, рег. № Н????? 124032600078-1ИОКТР 124032600078-1.

Авторы выражают благодарность своей группе из отдела технологий сварки и металлургии за помощь в подготовке сварных проб и проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков Н. И. Остаточные напряжения при сварке конструкций в условиях низких климатических температур // Сварочное производство. – 2018. – № 11. С. 31–34.
2. Кулиев В. Д., Бакуменко Н. А., Константинова Н. Е., Гудкова Н. Н. Влияние остаточных напряжений на прочность и долговечность сварных элементов конструкции // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2006. – № 2. – С. 56–59.
3. Палаев А. Г., Красников А. А. Анализ причин возникновения остаточных сварочных напряжений и методов их выявления и снижения // Территория Нефтегаз. – 2023. – № 11–12. – С. 72–85.
4. Прокопьев Л. А., Голиков Н. И., Сараев Ю. Н. Развитие трещин в поле остаточных напряжений сварных соединений трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях холодного климата // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2024. – № 5. – С. 159–169. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.159-169
5. Леонов В. П., Мизецкий А. В. Влияние локальных остаточных сварочных напряжений на начальную стадию развития трещин в сварных соединениях // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 4 (56). – С. 54–65.
6. Yoshitani N. Optimal Control of Steel Strip Temperature in Continuous Annealing Processes // Materials Science and Engineering Serving Society. – 1998. – P. 303–308. DOI: 10.1016/B978-044482793-7/50069-2
7. Zhi M., Xiaohong P. Research and Application on Two-Stage Fuzzy Temperature Control System for Industrial Heating Furnace // Journal of Computers. – 2009. – N 7 (2). – P. 756–759. DOI: 10.1109/ICICTA.2009.418
8. Hazel Br., Boudreault E., Côté J., Godin S. Robotic post-weld heat treatment for in situ repair of stainless-steel turbine runners // Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, CARPI – 2014. DOI: 10.1109/CARPI.2014.7030051
9. Новиков И. А., Ножницкий Ю. А., Шибяев С. А. Мировой опыт в исследовании и применении технологического процесса лазерной ударной обработки металлов (обзор) // Авиационные двигатели. – 2022. – № 2 (15). – С. 59–82. DOI: 10.54349/26586061_2022_1_59
10. Пономарев К. Е., Стрельников И. В., Антонов А. А., Капустин О. Е. Анализ различных видов вибрационной обработки алюминиевых сварных конструкций // Сварочное производство. – 2021. – № 2. – С. 45–49. DOI: 10.34641/SP.2021.1035.2.007
11. Pandya N. M., Kalyankar V. D., Naik H. V. Influence of Post-Welding Heat Treatment on the Impact Toughness of Welded Joints of P91 Steel // Metal Science and Heat Treatment. – 2021. – V. 63. – No 5–6. – P. 269–279. – DOI: 10.1007/s11041-021-00682-w
12. Горбач В. Д., Михайлов В. С. Поверхностное упрочнение сварных соединений с целью повышения коррозионно-усталостной долговечности судовых конструкций // Судостроение. – 2000. – № 4 (731). – С. 45–48.
13. Макаров В. Ф., Белобородов В. С. Повышение надежности и долговечности деталей ГТД методами упрочняющей обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Т. 16, № 1 (181). – С. 9–14.

14. Блюмин А. А., Пазиков А. А., Боркин П. И., Шевченко В. Г. Опыт индукционной термической обработки сварных соединений трубопроводов из аустенитной стали в составе эксплуатируемого оборудования // Индукционный нагрев. – 2008. – № 4 (6). – С. 20–26.
15. Rezanov V. A., Fedin V. M., Bashlykov A. V. et al. Differential hardening of welded rail joints // VNIIZhT Bulletin (Railway Research Institute Bulletin). – 2013. – No 2. – P. 32–36
16. Слепцов О. И., Шульгинов Б. С., Михайлов В. Е. и др. Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера. – Новосибирск: Наука – 2012. – 183 с.
17. Сараев Ю. Н., Каманцев И. С., Григорьева А. А. и др. Численная оценка усталостного разрушения сварных соединений, полученных дуговой сваркой с управляемым и неуправляемым тепловложением и ударно-механической обработкой // Динамика систем, механизмов и машин. – 2020. – Т. 8. – № 4. – С. 162–170.
18. Антонов А. А., Летуновский А. П. Снижение остаточных сварочных напряжений методом ультразвуковой ударной обработки // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. – № 2(30). – С. 21–26.
19. Лобанов Л. М., Кирьян В. И., Кныш В. В., Прокопченко Г. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (обзор) // Автоматическая сварка. – 2006. – № 9. – С. 3–11.
20. Пичугин С. С., Шитиков В. С., Головков А. Н. Неразрушающие методы оценки остаточных напряжений // Труды ВИАМ. – 2024. – № 1 (131). – С. 101–112. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112
21. Сидоров М. М. Влияние ультразвуковой ударной обработки на механические свойства и перераспределение остаточных напряжений сварных соединений трубопроводов, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера: дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2014. – 132 с.
22. Сидоров М. М., Голиков Н. И., Сараев Ю. Н., Тихонов Р. П. Управление уровнем остаточных сварочных напряжений в стыковых соединениях труб из низколегированных сталей ударно-механической обработкой // Тяжелое машиностроение. – 2023. – № 10. – С. 23–28.
23. Golikov, N. I., Sidorov, M. M., Investigation of the redistribution of residual stresses in cyclic loading of welded joints // Welding International. – 2014. – V. 28. – No. 12. P. 970–972. DOI: 10.1080/09507116.2014.884328

УДК 621.791.3:537.312.6

СОЕДИНЕНИЕ ВТСП-МАТЕРИАЛОВ: ВЫБОР ПРИПОЕВ И ФЛЮСОВ (ОБЗОР)

И. И. ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ, канд. хим. наук, П. А. ЛУКЬЯНОВ,

С. В. ШАВКИН, канд. физ.-мат. наук

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123098, Москва, пл. Академика Курчатова, 1. E-mail: preo.ilya@yandex.ru*

Поступила в редакцию 4.05.2025

После доработки 11.08.2025

Принята к публикации 4.09.2025

Приведен обзор составов припоев и флюсов, которые могут быть использованы для соединения ленточных проводов на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

© 2026

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал

«Вопросы материаловедения»

Рассмотрены фазовые диаграммы наиболее часто используемых припоев, как содержащих свинец, так и бессвинцовых. Отмечены основные методы нанесения припоев, среди которых погружение образцов ВТСП-лент в расплавленный припой, соединение внахлест с приложением давления, диффузионное соединение с использованием стабилизирующих слоев серебра, а также соединение с использованием индукционного нагрева. Подбор химического состава припоев и флюсов, а также выбор режимов пайки оказывают существенное влияние на свойства ВТСП-лент.

Ключевые слова: высокотемпературные сверхпроводники, припои, флюсы, лужение, критический ток

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-193-223

задания НИЦ Работа проведена в рамках выполнения государственного «Курчатовский институт»

ЛИТЕРАТУРА

1. Park Y., Lee M., Ann H., Choi Y.H., Lee H. A superconducting joint for GdBa₂Cu₃O_{7-δ}-coated conductors // NPG Asia Materials. – 2014. – N 6 (5). – P. e98–e98.
2. Kato J., Sakai N., Miyata S., Konishi M., Yamada Y., Chikumoto N., Nakao K., Izumi T., Shiohara Y. Optimization of the diffusion joint process for the Ag layers of YBCO coated conductors // Physica C: Superconductivity and its applications. – 2007. – N 463. – P. 747–750.
3. Руднев И. А., Анищенко И. В. Физические принципы создания магнитолевитационных систем на основе высокотемпературных сверхпроводящих композитов второго поколения (Обзор) // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91 (12). – С. 1813–1847.
4. Hartwig Z. S., Vieira R. F., Sorbom B. N., Badcock R. A., Bajko M., Beck W. K., Castaldo B., Craighill C.L., Davies M., Zhou L. VIPER: an industrially scalable high-current high-temperature superconductor cable // Superconductor Science and Technology. – 2020. – N 33 (11). – P. 11LT01.
5. Munaretto S., Kleiner A., Churchill R. M., Corona D., Looby T., d'Abusco M. S., Wingen, A. Impact of error fields and error field correction on heat fluxes in SPARC // Nuclear Fusion. – 2025. – N 65 (4). – P. 046007.
6. Polak M., Zhang W., Parrell J., Cai X. Y., Polyanskii A., Hellstrom E. E., Larbales-tier D. C., Majoros M. Current transfer lengths and the origin of linear components in the vol-tage-current curves of Ag-sheathed BSCCO components // Superconductor Science and Technology. – 1997. – N 10 (10). – P. 769.
7. Chang M. S., Salleh M. M., Halin D. S. A short review: Properties of superconducting solder // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – N 957(1). – Art. 012059.
8. Islam R. A., Chan Y. C., Jillek W., Islam S. Comparative study of wetting behavior and mechanical properties (microhardness) of Sn–Zn and Sn–Pb solders // Microelectronics Journal. – 2006. – N 37 (8). – P. 705–713.
9. Gokcen N. A. The Bi–Pb (bismuth-lead) system // Journal of phase equilibria. – 1992. – N 13 (1). – P. 21–32.
10. Aksoy C. A., Mousavi T., Brittles G., Grovenor C. R., Speller S. C. Lead-free solders for superconducting applications // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – N 26 (3). – P. 1–3.

11. Ye L., Li X., Zhang M., Zhu Q., Sun X. Composition design, microstructure and mechanical properties of bismuth-doped In–Sn-based low-temperature solder alloy // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2024. – N 35 (19). – P. 1303.
12. Matuszek K., Kar M., Pringle J. M., MacFarlane D. R. Phase change materials for renewable energy storage at intermediate temperatures // *Chemical reviews*. – 2022. – N 123 (1). – P. 491–514.
13. Ito S., Aparicio L. E., Atake Y., Yamamoto H., Onji T., Tomita M. Initial study on press welding with indium applied to high-temperature superconducting DC feeder cables // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2023. – N 33 (5). – P. 1–5.
14. Tsui Y., Surrey E., Hampshire D. Soldered joints – an essential component of demountable high temperature superconducting fusion magnets // *Superconductor Science and Technology*. – 2016. – N 29 (7). – P. 075005.
15. Canavan E. R., Leidecker H., Panashchenko L. Conductance degradation in HTS coated conductor solder joints // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – N 102 (1). – P. 012032.
16. Liu X. J., Inohana Y., Takaku Y., Ohnuma I., Kainuma R., Ishida K., Moser Z., Gasior W., Pstrus J. Experimental determination and thermodynamic calculation of the phase equilibria and surface tension in the Sn–Ag–In system // *Journal of electronic materials*. – 2002. – N 31. – P. 1139–1151.
17. Liu Y. M., Chuang T. H. Interfacial reactions between In₁₀Ag solders and Ag substrates // *Journal of electronic materials*. – 2000. – N 29. – P. 1328–1332.
18. Karakaya I., Thompson W. T. The Ag–Sn (silver–tin) system // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. – 1987. – N 8 (4). – P. 340–347.
19. Saunders N., Miodownik A. P. The Cu–Sn (copper–tin) system // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. – 1990. – N 11 (3). – P. 278–287.
20. Yen Y. W., Chen S. W. Phase equilibria of the Ag–Sn–Cu ternary system // *Journal of materials research*. – 2004. – N 19 (8). – P. 2298–2305.
21. Swenson D. The effects of suppressed beta tin nucleation on the microstructural evolution of lead-free solder joints // *Lead-Free Electronic Solders: A Special Issue of the Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2006. – P. 39–54.
22. Moser Z., Dutkiewicz J., Gasior W., Salawa J. The Sn–Zn (tin–zinc) system // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. – 1985. – N 6 (4). – P. 330–334.
23. Li Y. C., Chang C.H., Pasana A. S., Hsiao H. M., Yen Y. W. Interfacial reactions in lead-free solder/Cu–2.0 Be (Alloy 25) couples // *Journal of Electronic Materials*. – 2021. – N 50. – P. 903–913.
24. Li F., Pu C., Li C., Yang J., Jia Y., Geng C., Zhang X., Bao Q., Guo S., Yi J., Zhang J. Study on the effects of Ag addition on the mechanical properties and oxidation resistance of Sn–Zn lead-free solder alloy by high-throughput method // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2023. – N 34 (4). – P. 322.
25. Havlík R., Drienovský M., Gerhátová Ž., Babincová P., Kusý M., Gogola P., Palcut M. Phase constitution, microstructure and corrosion performance of binary Sn–Bi alloys // *Journal of Materials Research and Technology* – 2025 – N 36 – P. 173–181.
26. Chen S., Wang X., Guo Z., Wu C., Liu Y., Liu Y., Su X. Investigation of the microstructure, thermal properties, and mechanical properties of Sn–Bi–Ag and Sn–Bi–Ag–Si low temperature lead-free solder alloys // *Coatings*. – 2023. – N 13 (2). – P. 285.

27. Zhao W., Li Y., Xu B., Yang H. Experimental investigation and modeling of vapor-liquid equilibria for Bi–Zn and Bi–Sn–Zn systems at 10 Pa // *Calphad*. – 2021. – N 74. – P. 102287.
28. Lin O. J., Ariff M., Hanim A. Thermal and Mechanical Stability of Bismuth Doped Sn–Ag–Cu Lead-free Solder: A Comprehensive Review // *Pertanika Journal of Science & Technology*. – 2025. – N 3.
29. Rai D. Thermodynamic data for Sn (IV) dioxides and hydroxido complexes: a critical review // *Journal of Solution Chemistry*. – 2022. – N 51 (10). – P. 1169–1186.
30. Cui Y., Xian J.W., Zois A., Marquardt K., Yasuda H., Gourlay C.M. Nucleation and growth of Ag₃Sn in Sn–Ag and Sn–Ag–Cu solder alloys // *Acta Materialia*. – 2023. – N 249. – P. 118831.
31. Ismail N., Yusoff W. Y., Amat A., Manaf N. A., Ahmad N. A review of extreme condition effects on solder joint reliability: Understanding failure mechanisms // *Defence Technology*. – 2024. – N 41 (37). DOI: 10.1016/j.dt.2024.05.013
32. Tatsumi H., Kaneshita S., Kida Y., Sato Y., Tsukamoto M., Nishikawa H. Highly efficient soldering of Sn–Ag–Cu solder joints using blue laser // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – N 82. – P. 700–707.
33. Subramanian K. N., Suganuma K., Kim K. S. Sn–Zn low temperature solder // *Lead-Free Electronic Solders: A Special Issue of the Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2007. – P. 121–127.
34. Xu S., Li Y., Jing X., Paik K. W., He P., Zhang S. The grain refinements effect of Zn alloying on low-temperature Sn–Bi–In lead-free solder // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – N 29. – P. 2272–2278.
35. Mousavi T., Aksoy C. A., Grovenor C. R., Speller S. C. Microstructure and superconducting properties of Sn–In and Sn–In–Bi alloys as Pb-free superconducting solders // *Superconductor Science and Technology*. – 2015. – N 29 (1). – P. 015012.
36. Said R. M., Salleh M. A., Saud N., Ramli M. I. Superconducting lead-free solder joint: a short review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – N 957 (1). – Art. 012047.
37. Mei Z., Holder H. A., Van der Plas H. A. Low-temperature solders // *Hewlett Packard Journal*. – 1996. – N 47. – P. 91–98.
38. Tsui Y., Mahmoud R. A., Surrey E., Hampshire D. Superconducting and mechanical properties of low-temperature solders for joints // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2016. – N 26 (3). – P. 1–4.
39. Zhang L., Chen B., Zhang S., Lu C. Geometrical structures and hydrogen storage performance of medium sized Mg₃LaH_n–(n = 9–20) anions // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2025. – N 102. – P. 1161–1167.
40. Фадеева И. В., Фомин А. С., Баринов С. М., Давыдова Г. А., И., И. Селезнева Преображенский И. И., Русаков М. К., Фомина А. А., Синтез и свойства марганецсодержащих кальцийфосфатных материалов // *Неорганические материалы* – 2020. – Т. 56 (7). – С. 738–745
41. Fadeeva I. V., Deyneko D. V., Knotko A. V., Olkhov A. A., Slukin P. V., Davydova G. A., Trubitsyna T. A., Preobrazhenskiy I. I., Gosteva A. N., Antoniac I. V., Rau J. V. Antibacterial composite material based on polyhydroxybutyrate and Zn-doped brushite cement // *Polymers*. – 2023. – N 15 (9). – 2106.

42. Law C. M., Wu C. M., Yu D. Q., Wang L., Lai J. K. Microstructure, solderability, and growth of intermetallic compounds of Sn–Ag–Cu–RE lead-free solder alloys // *Journal of Electronic Materials*. – 2006. – N 35. – P. 89–93.
43. Kang H., Rajendran S. H., Jung J. P. Low melting temperature Sn–Bi solder: Effect of alloying and nanoparticle addition on the microstructural, thermal, interfacial bonding, and mechanical characteristics // *Metals*. – 2021. – N 11 (2). – P. 364.
44. Wang B., Li W., Zhang S., Li X., Pan K. Effect of electric current stressing on mechanical performance of solders and solder joints: A review // *Journal of Materials Science*. – 2022. – N 57 (37). – P. 17533–17562.
45. Veselý P., Dušek K., Froš D. Toward reducing no-clean flux spatter during reflow soldering: Investigating the effect of flux type, solder mask, and solder pad design // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – N 81. – P. 696–706.
46. Fujiwara K., Asahi M. A., Tsurumi, S. H., Takeuchi Y. O. Water-soluble flux for Pb-alloy Josephson device packaging // *IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology*. – 1987. – N 10 (2). – P. 258–262.
47. Jellesen M. S., Minzari D., Rathinavelu U., Møller P., Ambat R. Corrosion failure due to flux residues in an electronic add-on device // *Engineering failure analysis*. – 2010. – N 17 (6) – P. 1263–1272.
48. Bharath Krupa Teja M., Sharma A., Das S., Das K. A review on nanodispersed lead-free solders in electronics: synthesis, microstructure and intermetallic growth characteristics // *Journal of Materials Science*. – 2022. – N 57 (19). – P. 8597–8633.
49. Zhang S., Li F., Yang G., Xu S., Han Z., Fan Z., Jiang P., Chen Y. Enhanced electrical and mechanical performances of soldered joint between copper stabilized REBCO superconducting tapes // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2019. – N 29 (5). – P. 1–7.
50. Khatibi G., Kotas A. B., Lederer M. Effect of aging on mechanical properties of high temperature Pb-rich solder joints // *Microelectronics Reliability*. – 2018. – N 85. – P. 1–11.
51. Bagrets N., Barth C., Weiss K. P. Low temperature thermal and thermo-mechanical properties of soft solders for superconducting applications // *IEEE transactions on applied superconductivity*. – 2013. – N 24 (3). – P. 1–3.
52. Preuss A., Fietz W. H., Immel F., Kauffmann-Weiss S., Wolf M.J. Critical current degradation of coated conductors under soldering conditions // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2018. – N 28 (4). – P. 1–5.
53. Watterson A., Hubbard A., Diaz-Pacheco R., Francis A., Granetz R., Logan J., Golfinopoulos T., Kaplan A., Michael P., Murray R., Sanabria C., Schweiger S., Toland T., Vieira R. Performance assessment of PIT VIPER cables following long-duration solder exposure during manufacturing // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2025. – V. 35. – Is. 5. – Art. 4601505. DOI: 10.1109/TASC.2025.3527947
54. Преображенский И.И., Гурьев В.В., Диев Д.Н., Наумов А.В., Поляков А.В., Мосеев К.В., Макаренко М.Н., Шавкин С.В. Влияние сжимающих механических нагрузок на распределение критического тока в пакетах ВТСП-лент // *Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования*. – 2024. – Т. 2 (2). – С. 31–41.
55. Преображенский И.И., Гурьев В.В., Диев Д.Н., Наумов А.В., Поляков А.В., Мосеев К.В., Макаренко М.Н., Шавкин С.В. Анализ изменений токонесущей способности ВТСП лент второго поколения после приложения сжимающей механической нагрузки // *Физика металлов и металловедения*. – 2025. . – Т. 6. – С. 1–9.

56. Троицкий А.В., Маркелов А. В., Молодык А. А., Демихов Т. Е., Антонова Л. Х., Михайлова Г. Н., Михайлов Б.П., Просвирин Д. В. Свойства низкоомных соединений ленточных высокотемпературных сверхпроводников, полученных методом пайки // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 474 (1). – С. 28–30.
57. Lin K., Ling H., Hu A., Wu Y., Gao L., Hang T., Li M. Growth behavior and formation mechanism of porous Cu₃Sn in Cu/Sn solder system // Materials Characterization. – 2021. – N 178. – P. 111271.
58. Wang R., Yan Y., Li W., Li Z. Preparation of Sn₄₂Bi₅₈ and Sn_{64.7}Bi₃₅Ag_{0.3} soldering pastes for Cu–Al direct soldering and study of their performance // Materials Chemistry and Physics. – 2025. – N 336. – P. 130547. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130547>
59. Kodentsov A., Wojewoda-Budka J., Litynska-Dobrzynska L., Zieba P., Wierzbicka-Miernik A. Formation of intermetallic compounds in reaction between Cu–Ni alloys and solid Sn—a new look at the prominent effect of Ni // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – N 858. – P. 157677.
60. Zheng J., Ma H., He R., Lu Y., Song H., Cui C., Zhang Y., Bai C., Guo Y., Liu Z., Cai C. Low-resistance and strong-adhesion soldering of second-generation high-temperature superconductor tapes within a short time // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2017. – N 27 (5). – P. 1–6.
61. Tu K. N., Thompson R. D. Kinetics of interfacial reaction in bimetallic Cu–Sn thin films // Acta Metallurgica. – 1982. – N 30 (5). – P. 947–952.
62. Preuss A., Fietz W. H., Immel F., Kauffmann-Weiss S., Wolf M. J. Critical current degradation of coated conductors under soldering conditions // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2018. – N 28 (4). – P. 1–5.
63. Li W., Guo L., Li D., Liu Z. Q. Research Overview on the Electromigration Reliability of SnBi Solder Alloy // Materials. – 2024. – N 17 (12). – P. 848.
64. Bagrets N., Celentano G., Augieri A., Nast R., Weiss K. P. Investigation of soldered REBCO tape–copper joints for superconducting applications // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – N 26 (4). – P. 1–4.
65. Li Y., Chen S., Dong F., Dye J., Yan Y., Gao C., Zhai Y., Park D. Metal-Insulation REBCO Pancake Coil with Solder Surface Shunt: Testing and Modeling // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2025. – August. – P. 1–5. DOI:10.1109/TASC.2025.3530388
66. Ito S., Tamura R., Yamamoto H., Onji T., Tomita M. Press-welding between high-temperature superconducting tape conductors with low-temperature solders including indium // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2024. – January. – P. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2024.3512512
67. Balashov N. N., Degtyarenko P. N., Ivanov S. S., Kopylov S. I., Gorbunova D. A., Molodyk A. A., Samoilenkov S., Sytnikov V., Zheltov V. V. Low-resistance soldered joints of commercial 2G HTS wire prepared at various values of applied pressure // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2018. – N 28 (4). – P. 1–4.
68. Han H., Kim C., Lee D., Nam J., Kim S., Park T., Moon C., Nam T., Lee B.J., Park I. Localized electromagnetic induction heating system for rapid soldering of interfaces between integrated circuit and printed circuit board // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2025. – N. 165. – P. 109001.
69. Drienovsky M., Michalcova E., Pekarčíková M., Palcut M., Frolek L., Gogola P., Jančuška I., Mišík J., Gömöry F. Induction soldering of coated conductor high-temperature

superconducting tapes with lead-free solder alloys // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2018. – N 28 (4). – P. 1–5.

70. Kunwar A., Shang S., Råback P., Wang Y., Givernaud J., Chen J., Ma H., Song X., Zhao N. Heat and mass transfer effects of laser soldering on growth behavior of interfacial intermetallic compounds in Sn/Cu and Sn–3.5 Ag0.5/Cu joints // Microelectronics Reliability. – 2018. – N 80. – P. 55–67.

71. Wang W., Wang M., Han L., Chen Y., Liu L., Yang F., Li M., Yu Z., Zhao Y. Low-resistance joints for YBCO-coated conductors with Ag nanoparticle paste // Superconductor Science and Technology. – 2023. – N 36 (8). – P. 085016.

72. Huang D., Chen D., Dong H., Wang K., Chu W. K., Wang T., Wang M., Zhu K., Gu H., Ren Z., Ding, F. High-field critical current density enhancement in GdBCO coated conductors by cooperative defects // Superconductor Science and Technology. – 2023. – N 36 (6). – P. 065003.

73. Maebatake T., Ichinose Y., Yamada K., Mori N., Teranishi R., Inoue M., Kiss T., Yoshizumi M., Izumi T., Kaneko K., Munetoh S., Mukaida M. Joint properties of REBCO coated conductors // Physica C: Superconductivity and its applications. – 2011. – N 471 (21–22). – P. 987–989.

74. Watanabe T., Kamata T., Maebatake T., Teranishi R., Kiss T., Yamada K., Kaneko K., Yoshizumi M., Izumi T. Study of factors in joint resistance for GdBCO coated conductors // Physics Procedia. – 2013. – N 45. – P. 165–168.

75. Berthet G., Jung W., Park H., Hahn S., Lee S. Comparison of the Electrical Properties of Copper Diffusion-Bonded Joints and Solder Joints for (RE) Ba₂Cu₃O_{7-δ} Tapes // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2025. – January. – P. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2025.3530325

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

УДК 620.193.4:669.15–194.2

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ГАЗОПРОВОДОВ

Р. К. ВАГАПОВ, д-р техн. наук, канд. хим. наук, К. А. ИБАТУЛЛИН, канд. хим. наук,
А. Д. ГАЙЗУЛЛИН

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,

142717, Московская обл., г. о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, д. 15, стр. 1.

E-mail: R_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru

Поступила в редакцию 11.08.2025

После доработки 23.09.2025

Принята к публикации 23.09.2025

Исследована стойкость к углекислотной коррозии трубных сталей в условиях конденсации влаги на верхней образующей трубы и при переменном смачивании водой трубы при частичном заполнении ее жидкостью, возникающих на газовых месторождениях. Для испытаний использованы коррозионная установка и стенд, моделирующие эти основные коррозионно-опасные условия внутри скважинного оборудования и промышленных газопроводов. Для усиления коррозионного воздействия на стали агрессивных эксплуатационных сред газовых месторождений в дополнение к традиционному однократному изъятию гравиметрических стальных образцов применено их многократное

извлечение, удаление продуктов коррозии и последующее использование в коррозионных опытах. Оценено влияние данных методических подходов на усиление общей и локальной скоростей углекислотной коррозии. Обсуждены возможные причины полученных результатов коррозионных испытаний и влияние на них образующихся продуктов коррозии.

Ключевые слова: методы испытаний, коррозионная установка, испытательный стенд, конденсация влаги, переменное смачивание, локальная коррозия, продукты коррозии, углеродистые и низколегированные стали

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-224-234

ЛИТЕРАТУРА

1. Слугин П. П., Полянский А. В. Оптимальный метод борьбы с углекислотной коррозией трубопроводов на Бованенковском НГКМ // Наука и техника в газовой промышленности. – 2018. – Т. 74, № 2. – С. 104 – 109.
2. Условия протекания углекислотной коррозии на объектах добычи Ачимовских отложений, методы контроля и прогнозирования / А. Ю. Корякин, В. Ф. Кобычев, И. В. Колинченко и др. // Газовая промышленность. – 2017. – Т. 761, № 12. – С. 84–89.
3. Влияние углекислоты в природном газе газоконденсатной залежи нижнемеловых отложений Юбилейного нефтегазоконденсатного месторождения на эксплуатацию УКПГ-НТС / И. И. Байдин, А. Н. Харитонов, А. В. Величкин и др. // Наука и техника в газовой промышленности. – 2018. – Т. 74, № 2. – С. 23–35.
4. Опыт разработки месторождения на шельфе Российской Федерации, оборудованного подводно-добычным комплексом / В. Е. Петренко, М. Ф. Нуриев, М. Б. Шевелев и др. // Газовая промышленность. – 2018. – Т. 777, № 11. – С. 8–13.
5. Научный анализ технического состояния и защиты скважинного оборудования и промысловых трубопроводов ПАО «Газпром» в условиях добычи и транспортировки коррозионно-агрессивного газа. Часть 1 / П. П. Слугин, И. Р. Ягафаров, Р. Р. Кантюков и др. // Газовая промышленность. – 2023. – Т. 854, № 9. – С. 64–71.
6. Вагапов Р. К., Ибатуллин К. А. Оценка локальных дефектов на внутренней поверхности газопроводов, транспортирующих CO₂-содержащую продукцию // Дефектоскопия. – 2022. – № 10. – С. 49–56. DOI: 10.31857/S0130308222100050
7. Corrosion behavior of X65 steel at different depths of pitting defects under local flow conditions / D. Zhang, L. Yang, Z. Tan et al. // Experimental Thermal and Fluid. – 2020. – V. 124. – Art. 110333. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110333
8. Pitting corrosion failure analysis of a wet gas pipeline / H. Mansoori, R. Mirzaee, F. Esmaeilzadeh et al. // Engineering Failure Analysis. – 2017. – V. 82. – P. 16–25. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.08.012
9. Андреев Н. Н., Сивоконь И. С. Методология лабораторного тестирования ингибиторов углекислотной коррозии для нефтепромысловых трубопроводов // Практика противокоррозионной защиты. – 2014. – Т. 74, № 4. – С. 36–43.
10. Temporal evolution of sweet oilfield corrosion scale: Phases, morphologies, habits, and protection / G. R. Joshi, K. Cooper, X. Zhong et al. // Corrosion Science. – 2018. – V. 142. – P. 110–118. DOI: 10.1016/j.corsci.2018.07.009
11. Васечкина И. А., Гладченкова Ю. С., Амежнов А. В. Влияние химического состава и структурных характеристик трубных сталей на их коррозионную стойкость в условиях эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов Западной Сибири // Металлург. – 2023. – № 5. – С. 20–27. DOI: 10.52351/00260827_2023_05_20

12. Слугин П. П., Васильев В. Г., Ягафаров И. Р. и др. Внедрение инновационных решений при оценке коррозионных рисков углекислотной коррозии объектов добычи газа ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2024 – Т. 874. – С. 54–67.
13. Vagapov R. K., Zapevalov D. N. Corrosion activity of operating conditions for the steel equipment and pipelines in the plants extracting CO₂-containing gases // Metallurgist. – 2021. – V. 65. – P. 50–61. DOI: 10.1007/s11015-021-01132-x
14. Вагапов Р. К. Стойкость сталей в эксплуатационных условиях газовых месторождений, содержащих в добываемых средах агрессивный CO₂ // Материаловедение. – 2021. – № 8. – С. 41–47. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-8-41-47
15. Key challenges for internal corrosion modeling of wet gas pipelines / N. Laycock, V. Metri, S. Ra et al. // Corrosion. – 2024. – V. 80, N 12. – P. 1146–1163. DOI: 10.5006/4532
16. Вагапов Р. К., Запечалов Д. Н., Ибатуллин К. А. Оценка коррозионной стойкости материалов в условиях конденсации влаги и наличия диоксида углерода // Вопросы материаловедения. – 2020. – Т. 101, № 1. – С. 163–175. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-101-1-163-175
17. Новый метод оценки стойкости сталей к локальной углекислотной коррозии на газовых объектах / Р. Р. Кантюков, Д. Н. Запечалов, Р. К. Вагапов и др. // Металлург. – 2024. – № 2. – С. 24–29. DOI: 10.52351/00260827_2024_2_24
18. Matamoros-Velozza A., Barker R., Vargas S., Neville A. Mechanistic insights of dissolution and mechanical breakdown of FeCO₃ corrosion films // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2021. – V. 13, N 4. – P. 5741–5751. DOI: 10.1021/acscami.0c18976
19. Chemistry and structure of the passive film on mild steel in CO₂ corrosion environments / J. Han, D. Young, H. Colijn et al. // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2009. – V. 13, N 48. – P. 6296–6302. URL: <https://doi.org/10.1021/ie801819y>
20. Вагапов Р. К., Михалкина О. Г. Исследование продуктов углекислотной коррозии методом рентгеновской дифракции // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – Т. 88, № 9. – С. 35–41. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-9-35-41
21. Elgaddafi R., Ahmed R., Shah S. The effect of fluid flow on CO₂ corrosion of high-strength API carbon steels // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2021. – V. 86. – Art. 103739. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103739
22. Nešić S. Effects of multiphase flow on internal CO₂ corrosion of mild steel pipelines // Energy & Fuels. – 2012. – V. 26, N 7. – P. 4098–4111. DOI: 10.1021/ef3002795
23. Yang L., Zhang D., Fan H. et al. Investigating the micro-turbulent corrosion mechanism of pipeline defects based on a combined experimental and simulation approach // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2022. – V. 106. – Art. 104745. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104745
24. CO₂ corrosion resistance of carbon steel in relation with microstructure changes / N. Ochoa, C. Vega, N. Pebere et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2015. – V. 156. – P. 198–205. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2015.02.047
25. Беликов С. В., Сергеева К. И., Ашихмина И. Н. и др. Изучение закономерностей структурообразования при термической обработке нефтепроводных труб повышенной эксплуатационной надежности из стали 13ХФА // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2012. – № 4. – С. 43–48.
26. Choi Y.-S., Nešić S., Jung H.-G. Effect of alloying elements on the corrosion behavior of carbon steel in CO₂ environments // Corrosion. – 2018. – V. 74, N 5. – P. 566–576. DOI: 10.5006/2705

27. Gupta K. K., Haratian S., Mishin O. V. et al. The impact of minor Cr additions in low alloy steel on corrosion behavior in simulated well environment // *Npj Mater. Degrad.* – 2023. – V. 7. – P. 1–12. DOI: 10.1038/s41529-023-00393-y
28. Гудов А. Г., Бурмасов С. П., Житлухин Е. Г. и др. Влияние неметаллических включений на склонность стали к локальной коррозии // *Металлург.* – 2023. – № 12. – С. 11–18. DOI: 10.52351/00260827_2023_12_11

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*Посвящается Владимиру Александровичу Николаеву и
Александру Михайловичу Крюкову – пионерам в обосновании и продвижении
пострадиационного отжига корпусов водо-водяных реакторов.*

УДК 621.039.531:539.4:621.785.3

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕРМИЧЕСКОГО И РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГОВ КОРПУСА РЕАКТОРА

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Е. В. ЮРЧЕНКО, канд. техн. наук,
А. М. МОРОЗОВ, канд. техн. наук
*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,
191015, г. Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49. E-mail: margolinbz@yandex.ru,
nrc3@crism.ru*

Поступила в редакцию 13.11.2025

После доработки 18.11.2025

Принята к публикации 8.12.2025

Проведено сопоставление влияния двух типов пострadiационных низкотемпературных отжигов корпусов водо-водяных реакторов: термического отжига (ТО) и радиационно-термического отжига (РТО). ТО – это отжиг ранее облученного металла за счет нагрева корпуса неработающего реактора до температуры, превышающей температуру облучения при эксплуатации; РТО – это отжиг за счет кратковременного дополнительного облучения корпуса реактора при температуре, превышающей температуру облучения при эксплуатации. Представлены экспериментальные результаты по трещиностойкости, механическим свойствам и микротвердости для корпусной реакторной стали марки 15Х2МФА-А в различных состояниях: исходном, после нейтронного облучения, после нейтронного облучения и последующего ТО и после нейтронного облучения и последующего РТО.

В результате проведения ТО и РТО определены коэффициенты восстановления предела текучести, микротвердости и референсной температуры, контролирующей трещиностойкость. Выполнено сравнение эффективности ТО и РТО по критерию восстановления определяемых вышеуказанных характеристик.

Рассмотрена возможность периодического применения РТО в качестве компенсирующего мероприятия для продления срока эксплуатации реакторов.

Ключевые слова: низкотемпературный термический отжиг; низкотемпературный радиационно-термический отжиг; коэффициент восстановления свойств; радиационное охрупчивание; предел текучести; трещиностойкость; микротвердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-235-249

ЛИТЕРАТУРА

1. Nichols R. W., Harries D. R. Brittle fracture and irradiation effects in ferritic pressure vessel steels // Proc. of the Symp. On Radia Effects on Metals and Neutron Dosimetry, ASTM STP. – 1963. – No 341. – P. 162–198.
2. Hawthorne J. R. Radiation embrittlement / Briant C., Banerji S. (Eds.) // Embrittlement of engineering alloys. – New York: Academic Press, 1983.
3. Ибрагимов Ш. Ш., Ляшенко В. С., Завьялов А. И. Исследование свойств и структуры металлов и некоторых сталей после облучения их быстрыми нейтронами // Атомная энергия. – 1960. – Т. 8, вып.5. – С. 413–419.
4. Действие ядерных излучений на материалы / Доклад П. А. Платонова // Доклады Совещания. 6–10 дек. 1960. – Москва: Изд. Акад. Наук С. 106 –СССР, 1962. –120.
5. Pachur D. Radiation annealing mechanisms of low-alloy reactor pressure vessel steels dependent on irradiation temperature and neutron fluence // Nuclear Technology. – 1982. – N 59. – P. 463–475.
6. Amayev A. D., Kryukov A. M., Sokolov M. A. Recovery of transition temperature of irradiated WWER-440 vessel metal by annealing // Radiation Embrittlement of Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels, ASTM. – 1993. – V. STP 1170. – P. 369–379.
7. Крюков А. М. Обоснование продления радиационного ресурса корпусов реакторов ВВЭР-440: дисс. ... д-ра техн. наук. – М., 1994. – 163 с.
8. Alekseenko N. N., Amaev A. D., Gorynin I. V., Nikolaev V. A. Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels // Am. Nucl. Soc. – La Grangeark, Illin., USA, 1997.
9. Николаев В. А., Баданин В. И., Морозов А. М. Суммирование повреждений при отжиге и повторном облучении корпусной стали // Атомная энергия. – 1984. – Т. 57, вып. 3. – С. 165–167.
10. Brumovsky M., Ahlstrand R., Brynda J., Debarberis L., Kohopaa J., Kryukov A., Server W. Annealing and Re-embrittlement of reactor pressure vessel materials. State of the art report ATHENA WP-4 // AMES Report. – 2008. – N 19.
11. Амаев А. Д., Крюков А. М., Николаев В. А. и др. Способ восстановительной термической обработки стальных изделий // Бюллетень изобретений и открытий. – 1984. – № 46. – А.С. №1129926 СССР.
12. ASTM E 1921-01: Standard test method for determination of reference temperature, T_0 , for ferrite steels in the transition range // Annual Book of ASTM Standarts. – Section 3, V. 03.01. – P. 1068–1084.
13. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Fomenko V. N., Kostylev V. I. Further Improvement of the Prometey Model and Unified Curve Method. Part 2: Improvement of the Unified Curve Method // Eng. Fract. Mech. – 2018. – V. 191. – P. 383–402.
14. ГОСТ Р 59115.14-2021: Национальный стандарт Российской Федерации. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора.
15. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Prometey local approach to brittle fracture: development and application // Eng. Fracture Mech. – 2008. – V. 75, Is. 11. – P. 3483–3498.
16. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G. Radiation embrittlement modeling in multiscale approach to brittle fracture of RPV steel // Int. J. of Fracture. – 2012. – V. 179, Is. 1–2. – P. 87–108.

17. Марголин Б. З., Сорокин А. А., Беляева Л. А. Моделирование радиационного упрочнения нержавеющей ферритно-мартенситных и аустенитных сталей посредством облучения в ионном ускорителе. Ч. 1: Разработка методологии выбора режима ионного облучения ферритно-мартенситных сталей // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 2 (118). – С. 187–211.
18. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Варовин А. Я., Рогожкин С. В., Никитин А. А. Исследование влияния пострадиационного отжига на восстановление свойств материалов опорных конструкций корпусов реакторов ВВЭР-440. Ч. 2: Анализ особенностей влияния отжига материала после низкотемпературного облучения // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 1 (109). – С. 184–198.

*Dedicated to the centenary of the birth of Academician of the Russian Academy of Sciences
I. V. Gorynin – a materials scientist from the generation of titans*..... 7

METALS SCIENCE. METALLURGY

Kondratiev N.A., Khlusova E.I., Motovilina G.D., Belikova Yu.A. Simulation modeling of structure formation processes in the production of rolling sheet products less than 10 mm made of high-strength bainite-martensitic steel 10

Liu Yu., Kovalevskaya Zh.G., Huang J. Effect of heat treatment on the structure and wear resistance of AlFeCoCrNiNb_{0.25} alloy 25

FUNCTIONAL MATERIALS

Novikov P.A., Kosenko A.A., Popovich A.A. Monitoring of changes in the cathode structure LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ in lithium-ion batteries using in situ X-ray diffraction analysis..... 36

Tyurina S.A., Karzakova V.S., Demin V.L., Rusinov P.O. Features and prospects of metallization technology for polymer products produced by additive manufacturing. Part 1. Review and applied challenges of high-tech manufacturing 45

Tyurina S.A., Karzakova V.S., Demin V.L., Rusinov P.O. Features and prospects of metallization technology for polymer products produced by additive manufacturing methods. Part 2. Technological features of obtaining copper plating on microwave equipment elements..... 56

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

Dmitriev A.V., Kulnitsky B.A. Crushing of thermally expanded graphite nanoplates between layers of oxidized coal tar pitch during carbonization and graphitization 66

Ushkanov A.A., Lazareva N.N., Okhlopkova A.A. Study of the influence of mechanical activation of basalt fibers on the tribological properties of PTFE-based basalt plastics 75

Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Egorov A.S., Anisimov A.V., Aleksandrova D.S., Churikov D.O. Plastic deformation of polymer composite materials formed by FDM technology under ultrasonic exposure..... 85

Anisimov A.V., Lukicheva N.S., Petrova D.A., Kuznetsov A.Yu., Gladunova O.I., Diankina N.V. Multifiber hybrid polymer composite materials (Review)..... 97

Zlobina I.V., Aleksandrova D.S., Egorov A.S., Anisimov A.V. Influence of various types of wave processes on the physical properties and structure of polyetheretherketone and polyetherketone-based composites (Review) 115

WELDING, WELDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES

Gezha V.V., Mogilnikova N.A., Melnikov P.V. Research of the structure, mechanical, and corrosion properties of welded joint metals performed with 08Kh16N5M3AB martensitic-austenitic materials 129

Semka Ya.S., Priymak E.Yu., Yakovleva I.L., Trushov V.A., Kamenev S.V. Influence of the power parameter of rotary friction welding on the strength properties of the dissimilar joint from 32G2 and 10Kh11N23T3MR steels 137

Guba S.V., Tsarkov E.S., Bordyuzhin I.G. Technological aspects and features of automatic argon-arc welding of tube sheets of austenitic steels 147

Zorin A.E. Promising approaches to improving the operability of welded joints 157

<i>Saraev Yu.N., Golikov N.I., Dmitriev P.S., Semenov S.V., Shtokolov S.A., Zavarykin D.V.</i> On the issue of improving the efficiency of installation and repair technologies of critical structures operating in the conditions of low temperatures of the North	172
<i>Sidorov M.M., Mikhailov A.Yu.</i> Scientific substantiation of the use of ultrasonic impact treatment for residual stress management and ensuring the durability of welded joints of the northern design	183
<i>Preobrazhenskiy I.I., Lukyanov P.A., Shavkin S.V.</i> Connecting high-temperature superconductors: solder and flux selection (Review)	193
CORROSION AND PROTECTION OF METALS	
<i>Vagapov R.K., Ibatullin K.A., Gaizullin A.D.</i> Methodological aspects of studying carbon dioxide corrosion of gas pipe steels	224
RADIATION MATERIALS SCIENCE	
<i>Margolin B.Z., Yurchenko E.V., Morozov A.M.</i> Comparison of the effectiveness of low-temperature thermal and radiation-thermal annealing of RPV	235
Guidelines for authors of the scientific and technical journal “Voprosy Materialovedeniya”.	
Manuscript requirements	250

METALS SCIENCE. METALLURGY

UDC 669.15–194:621.771.016

SIMULATION MODELING OF STRUCTURE FORMATION PROCESSES IN THE PRODUCTION OF ROLLING SHEET PRODUCTS LESS THAN 10 mm MADE OF HIGH-STRENGTH BAINITE-MARTENSITIC STEEL

N.A. KONDRATIEV, E.I. KHLUSOVA, Dr Sc. (Eng), G.D. MOTOVILINA,
Cand. Sc. (Eng), Yu.A. BELIKOVA

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,
Russian Federation. E-mail: npk3@crism.ru*

Received January 14, 2025

Revised February 16, 2025

Accepted February 18, 2025

Abstract—Simulation modeling of high-speed thermal deformation processing of bainitic chromium-molybdenum steel samples was conducted to identify the most efficient rolling conditions on continuous wide-strip mills. The influence of deformation rate, temperature, and deformation patterns on structure formation processes was studied.

Keywords: low-carbon alloy shipbuilding steel, GLEEBLE-3800 plastometer, modeling, thermomechanical processing, austenite grain growth, dynamic recrystallization, structure formation processes, hardness

DOI: 10-24

REFERENCES

1. Kong, J., Xie, C., Effect of molybdenum on continuous cooling bainite transformation of low-carbon microalloyed steel, *Materials and Design*, 2006, V. 27, Is. 10, pp. 1169–1173.
2. Suzuki, T., Ono, Y., Miyamoto, G., Furuhashi, T., Effects of Si and Cr on bainite microstructure of medium carbon steels, *ISIJ International*, 2010, V. 50, Is. 10, pp. 1476–1482.

3. Kim, S.J., Lee, C.G., Lee, T.H., Lee, S., Effects of coiling temperature on microstructure and mechanical properties of high-strength hot-rolled steel plates containing Cu, Cr and Ni, *ISIJ International*, 2000, V. 40, pp. 692–698.
4. Challa, V.S.A., Zhou, W.H., Misra, R.D.K., Malley, R.O', Jansto, S.G., The effect of coiling temperature on the microstructure and mechanical properties of a niobium–titanium microalloyed steel processed via thin slab casting, *Materials Science and Engineering: A*, 2014, No 595, pp.143–153.
5. Challa, V.S.A., Misra, R.D.K., Malley, R.O', Jansto, S.G., The Effect of Coiling Temperature on the Mechanical Properties of Ultrahigh-Strength 700 MPa Grade Processed via Thin-Slab Casting, *AISTech 2014 Proceedings*, pp. 2987–2997.
6. Goritsky, V.M., Shneiderov, G.R., Guseva, I.A., Issledovanie anizotropii udarnoi vyazkosti i sklonnosti k rassloeniyu stali STREX 650 MS I 700 MS [Study of the anisotropy of impact strength and susceptibility to delamination of STREX 650 MS and 700 MS steels], *Metallurg*, 2018, No 8, pp. 29–38.
7. Kaputkina, L.M., Marmulev, A.V., Polyak, E.I., Erman, G., Vliyanie uslovii okhlazhdeniya rulonov na neravnomernost struktury i mekhanicheskikh svoystv goryachekatanykh vysokoprochnykh avtolistovykh stali [Influence of cooling conditions on the unevenness of the structure and mechanical properties of hot-rolled high-strength automotive sheet steels], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2012, No 12 (690), pp. 14–18.
8. Kaputkina, L.M., Marmulev, A.V., Shchetinin, I.V., Erman, G., Polyak, E.I., Issledovanie formirovaniya neravnomernosti struktury i svoystv v goryachekatanoi rulonnoi vysokoprochnoi nizkouglerodistoi stali [Research on the formation of uneven structure and properties in hot-rolled high-strength low-carbon steel], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*, 2013, No 9, pp. 43–47.
9. Guskov, O.P., Motovilina, G.D., Khlusova, E.I., Vliyanie tekhnologii proizvodstva na strukturu i svoystva stali kategorii F40 uluchshennoi svarivaemosti [The impact of production technology on the structure and properties of F40 improved weldability steel], *Voprosy materialovedeniya*, 2004, No 2 (38), pp. 37–46.
10. Garcia de Andres, C., Bartolome, M.J., Capdevila, C., San Martin, D., Caballero, F.G., Lopez, V., Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels, *Materials Characterization*, 2001, No 46, pp. 389–398.
11. Petrov, S.N., Ptashnik, A.V., Ekspres-metod opredeleniya granits byvshego austenitnogo zerna v stalyakh beinitno-martensitnogo klassa na osnove kartirovaniya kristallograficheskikh orientirovok prevrashchennoi struktury [An express method for determining the boundaries of former austenitic grains in bainitic-martensitic steels based on mapping the crystallographic orientations of the transformed structure], *MITOM*, 2019, No 5.
12. Rybin, V.V., Rubtsov, A.S., Nesterova, E.V., Metod odinochnykh reflektsov (OR) i ego primeneniye dlya elektronnomikroskopicheskogo analiza dispersnykh faz [The single-reflection method (SR) and its application for electron microscopic analysis of dispersed phases], *Zavodskaya laboratoriya*, 1982, No 5, pp. 21–26.
13. Sokolov, S.F., *Issledovanie i modelirovaniye evolyutsii mikrostruktury i soprotivleniya deformatsii stali pri goryachei obrabotke davleniem* [Research and modeling of the evolution of

the microstructure and deformation resistance of steels during hot pressure treatment]: Thesis for degree of Candidate of Sciences (Eng), St Petersburg, 2013.

14. Soshina, T.V., Zisman, A.A., Khlusova, E.I., Vliyanie mikrolegirovaniya niobiem na rekristallizatsionnye protsessy v austenite nizkouglerodistykh legirovannykh stali [Effect of niobium micro-alloying on recrystallization processes in austenite of low-carbon alloyed steels], *Voprosy materialovedeniya*, 2019, No 3 (99), pp. 128–147.

15. Kondratiev, N.A., Khlusova, E.I., Anisimov, D.M., Borovskaya, O.D., Vybor para-metrov vysokoskorostnoi termodeformatsionnoi obrabotki Cr-Ni-Mo stali na osnovanii imitatsionnogo modelirovaniya [Selection of parameters for high-speed thermomechanical processing of Cr-Ni-Mo steel based on simulation modeling], *Voprosy materialovedeniya*, 2024, No 1 (117), pp. 5–19.

UDC: 621.785:669.017.15

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF $\text{AlFeCoCrNiNb}_{0.25}$ ALLOY

YUANXUN LIU, Zh.G. KOVALEVSKAYA, Dr Sc. (Eng.), JINGRUI HUANG

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave, 634050 Tomsk, Russian Federation.

E-mail: kovalevskaya@tpu.ru

Received August 6, 2025

Revised October 23, 2025

Accepted November 5, 2025

Abstract—This study investigates the $\text{AlFeCoCrNiNb}_{0.25}$ high-entropy alloy, establishing the correlation between heat treatment regimes, microstructure, and tribotechnical properties. In both as-cast condition and after heat treatment at 900, 1000, or 1100°C followed by air cooling, the alloy exhibits a dendritic hypoeutectic structure comprising two primary phases: a body-centered cubic (BCC) solid solution phase and a Laves phase. With increasing heat treatment temperature, the lattice parameter of the solid solution phase undergoes modification accompanied by refinement of the primary dendritic structure. The alloy demonstrates optimal wear resistance following 1100°C treatment, attributable to the lowest coefficient of friction and structural transformations occurring during thermal processing.

Keywords: high-entropy $\text{AlFeCoCrNiNb}_{0.25}$ alloy, heat treatment, phase composition, microstructure, wear resistance

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-25-35

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation, project No 25-49-00169.

REFERENCES

1. Slobodyan, M., Pesterev, E., Markov, A., Recent advances and outstanding challenges for implementation of high entropy alloys as structural materials, *Materials Today Communications*, 2023, V. 36, p. 106422. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106422

2. Manzoni, A., Daoud, H., Völkl, R., Glatzel, U., Wanderka, N., Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy, *Ultramicroscopy*, 2013, V. 132, pp. 212–215. DOI: 10.1016/j.ultra-mic.2012.12.015
3. Nesterova, E.D., Bobkova, T.I., Mukhamedzhanova, L.V., Khromenkov, M.V., Serdyuk, N.A., Formirovanie kompozitsionnykh poroshkov multikomponentnykh splavov sistemy Al_xNiCoFeCr metodom mekhanokhimicheskogo sinteza [Formation of composite powders of multicomponent alloys of the Al_xNiCoFeCr system by mechanochemical synthesis], *Voprosy materialovedeniya*, 2025, No 2, pp. 75–85. DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-75-85
4. Arun, S., Radhika, N., Saleh, B., Effect of additional alloying elements on microstructure and properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy system: a comprehensive review, *Metals and Materials International*, 2025, V. 31, No 2, pp. 285–324. DOI: 10.1007/s12540-024-01752-3
5. Dalan, F.C., Sobrinho, A.S.D.S., Nishihara, R.K., Santos, S.F., Martins, G.V., Effect of Nb and Ti additions on microstructure, hardness and wear properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, V. 1010, p. 177117. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.177117
6. Ma, S.G., Zhang, Y., Effect of Nb addition on the microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2012, V. 532, pp. 480–486. DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.110
7. Jiang, H., Han, K., Li, D., Cao, Z., Synthesis and characterization of AlCoCrFeNiNb_x high-entropy alloy coatings by laser cladding, *Crystals*, 2019, V. 9 (1), p. 56. DOI: 10.3390/cryst9010056
8. *Termicheskaya obrabotka v mashinostroenii* [Heat treatment in mechanical engineering]: Handbook, Yu.M. Lakhtin, A.G. Rakhshadt (Eds.), Moscow: Mashinostroenie, 1980.
9. Munitz, A., Salhov, S., Hayun, S., Frage, N., Heat treatment impacts the micro-structure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, V. 683, pp. 221–230. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.034
10. Zhang, K., Fu, Z., Effects of annealing treatment on phase composition and microstructure of CoCrFeNiTiAl high-entropy alloys, *Intermetallics*, 2012, V. 22, pp. 24–32. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.10.010
11. Jiang, L., Jiang, H., Lu, Y., Wang, T., Cao, Z., Li, T., Mechanical properties improvement of AlCrFeNi₂Ti_{0.5} high entropy alloy through annealing design and its relationship with its particle-reinforced microstructures, *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, V. 31 (4), pp. 397–402. DOI: 10.1016/j.jmst.2014.09.011
12. Wu, M., Setiawan, R.C., Li, D.Y., Benefits of passive element Ti to the resistance of AlCrFeCoNi high-entropy alloy to corrosion and corrosive wear, *Wear*, 2022, V. 492, p. 204231. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204231
13. Natovitz, L., Edry, I., Meshi, L., Novel AlCrFeNiNb_{0.3} high entropy alloy: microstructure, pro-perties and an unknown Nb-rich intermetallide, *Intermetallics*, 2020, V. 127, p. 106965. DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106965
14. Shang, G., Liu, Z.Z., Fan, J., Lu, X.G., Effect of heat treatment on the microstructure and nanoindentation behavior of AlCoCrFeNi high entropy alloy, *Intermetallics*, 2024, V. 169, p. 108302. DOI: 10.1016/j.intermet.2024.108302
15. Meshi, L., Linden, Y., Munitz, A., Salhov, S., Pinkas, M., Retardation of the σ -phase formation in the AlCoCrFeNi multi-component alloy, *Materials Characterization*, 2019, V. 148, pp. 171–177. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.12.010

16. Jin, B., Nie, S., Fan, N., Xing, B., Yu, H., Enhanced wear resistance of a multi-phase reinforced $\text{Al}_{0.5}\text{CrFeNi}_{2.5}\text{Si}_{0.25}$ high-entropy alloy via annealing, *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, V. 29, pp. 5180–5188. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.02.226
17. Zhang, L., Wang, H., Li, J., Man, J. Evolution of the microstructure and mechanical properties of an sigma-hardened high-entropy alloy at different annealing temperatures, *Materials Science and Engineering: A*, 2022, V. 831, p. 142140. DOI: 10.1016/j.msea.2021.142140
18. Cheng, J.B., Liang, X.B., Xu, B.S., Effect of Nb addition on the structure and mechanical behaviors of CoCrCuFeNi high-entropy alloy coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2014, V. 240, pp. 184–190. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.12.053
19. Leyland, A., Matthews, A., Design criteria for wear-resistant nanostructured and glassy-metal coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2004, V. 177, pp. 317–324. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.09.011
20. Li, Q., Lv, S., Hu, X., Lan, Y., Liu, J., Effects of Nb additions on the microstructure and tribological properties of $\text{Al}_{0.25}\text{CrFeNi}_{1.75}$ high-entropy alloy, *Intermetallics*, 2022, V. 151, p. 107715. DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107715
21. Li, B., Zhang, Z., Luo, X., Chen, K., Zhang, J., Microstructure and friction properties of AlCrTiVNb_x high-entropy alloys via annealing manufactured by vacuum arc melting, *Materials*, 2024, V. 17, No 4, p. 812. DOI: 10.3390/ma17040812
22. Jiang, H., Jiang, L., Qiao, D., Lu, Y., Wang, T., Effect of niobium on microstructure and properties of the $\text{CoCrFeNb}_x\text{Ni}$ high entropy alloys, *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, V. 33, No 7, pp. 712–717. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.09.01

UDC 661.834:621.355:539.26

MONITORING OF CHANGES IN THE CATHODE STRUCTURE $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ IN LITHIUM-ION BATTERIES USING IN SITU X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS

P.A. NOVIKOV, Cand. Sc. (Eng), A.A. KOSENKO, A.A. POPOVICH, Dr Sc. (Eng)

Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 29 B Politekhnicheskaya St, 195251 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: novikov_pa@spbstu.ru

Received November 26, 2025

Revised December 11, 2025

Accepted December 15, 2025

Abstract—This study presents the results of *in situ* X-ray diffraction analysis of the cathode material $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ which is considered one of the most promising candidates for next-generation lithium-ion batteries. The experiments were carried out under real operating conditions during continuous charge–discharge cycling, which enabled direct monitoring of structural evolution and provided insights into the mechanisms of lithium intercalation and deintercalation.

The Rietveld refinement method, implemented through the TOPAS 5 software package, was applied to evaluate the lattice parameters of the material and to determine the origins of their variation. It was established that during charging the lattice parameter *a* decreases steadily due to the oxidation of transition metal ions, while parameter *c* exhibits non-linear behavior: it increases up to 4.0 V as a result of enhanced electrostatic repulsion between oxygen layers and subsequently decreases, likely due to lithium extraction from transition-metal sites. The discharge process is accompanied by the opposite trends.

The unit cell volume was found to contract continuously during lithium deintercalation, reaching a maximum reduction of approximately 2% at 4.2 V compared to the fully discharged state at 2.7 V. These findings demonstrate the structural stability of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ during electrochemical cycling and provide valuable information for assessing the mechanical stresses that arise during battery operation.

Keywords: lithium-ion batteries, layered oxide, X-ray diffraction

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-36-44

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No 075-15-2025-665 dated 6 August 2025)"

REFERENCES

1. Dunn, B., Kamath, H., Tarascon, J.-M., Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices, *Science. American Association for the Advancement of Science (AAAS)*, 2011, V. 334, N 6058, pp. 928–935.
2. Bhatt, M.D., O'Dwyer, C., Recent progress in theoretical and computational investigations of Li-ion battery materials and electrolytes, *Physical Chemistry Chemical Physics (Royal Society of Chemistry)*, 2015, V. 17, No 7, pp. 4799–4844.
3. Nitta, N., et al., Li-ion battery materials: present and future, *Materials Today. Elsevier BV*, 2015, V. 18, No 5, pp. 252–264.
4. Zhang, Y., Song, Y., Liu, J., In Situ Polymerization Anchoring Effect Enhancing the Structural Stability and Electrochemical Performance of the $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ Cathode Material, *ACS Appl. Mater. Interfaces. American Chemical Society*, 2023, V. 15, No 15, pp. 19075–19084.
5. Xie, Q., Cui, Z., Manthiram, A., Unveiling the Stabilities of Nickel-Based Layered Oxide Cathodes at an Identical Degree of Delithiation in Lithium-Based Batteries, *Advanced Materials*, 2021, V. 33, No 32.
6. Zhang, J., et al., Nickel-rich layered cathode $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ mediated by a selective lattice doping towards high-performance lithium ion battery, *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, V. 957.
7. Zubi, G., et al., The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, V. 89, pp. 292–308.
8. Huang, W., et al., Revealing Roles of Co and Ni in Mn-Rich Layered Cathodes, *Advanced Energy Materials*, 2021, V. 11, No 41.
9. Lee, H., et al., Materials challenges in high-energy batteries enabling ultra-fast charging and non-flammable performance for electric vehicles, *Front. Batter. Electrochem.*, 2025, V. 4.
10. Takegami, D., et al., Valence study of $\text{Li}(\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ and $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$: The role of charge transfer and charge disproportionation, *Phys. Rev. Materials*, 2024, V. 8, No 5.
11. Wu, Z., et al., Ni-rich cathode materials for stable high-energy lithium-ion batteries, *Nano Energy*, 2024, V. 126.
12. Mohanty, D., et al., Unconventional irreversible structural changes in a high-voltage Li–Mn-rich oxide for lithium-ion battery cathodes, *Journal of Power Sources*, 2015, V. 283, pp. 423–428.
13. Hausbrand, R., et al., Fundamental degradation mechanisms of layered oxide Li-ion battery cathode materials: Methodology, insights and novel approaches, *Materials Science and Engineering: B*, 2015, V. 192, pp. 3–25.

FEATURES AND PROSPECTS OF METALLIZATION TECHNOLOGY FOR POLYMER PRODUCTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING.

Part 1. Review and applied challenges of high-tech manufacturing

S.A. TYURINA¹, V.S. KARZAKOVA¹, V.L. DEMIN¹, P.O. RUSINOV²

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

“MIREA – Russian Technological University”, RTU MIREA

² Federal State Budgetary Institution of Science A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, IPCE RAS

Received November 10, 2025

Revised January 29, 2026

Accepted February 5, 2026

Abstract—This paper presents an overview of methods for applying metallic coatings to polymer products, including those produced by additive manufacturing. Application areas, methodological approaches, current research, and development prospects are analyzed. An accessible and safe method for chemical metallization of 3D-printed polymers is described. It requires no specialized equipment or toxic reagents, making it ideal for many manufacturing industries.

Keywords: 3D printing, LCD printing, chemical metallization, copper plating, additive manufacturing technologies, functional coatings, electronics

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-45-55

ACKNOWLEDGMENTS

This study was carried out as part of the project “Development of a technology for producing new-generation nanostructured composite materials with low specific volume electrical resistance and functional coatings” in order to achieve the results of the federal project “Universities for a generation of leaders” of the national project “Youth and Children”.

REFERENCES

1. Dudek, P., FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements, *Arch. Metall. Mater.*, 2013, V. 58, Is. 4, pp. 1415–1418.
2. Layani, M., Wang, X., Magdassi, S., Novel Materials for 3D-Printing by Photopolymerization, *Adv. Mater.*, 2018, V. 30, Is. 41, Art. 1706344.
3. Wang X., Jian M., Zhou Z., Gou J., Hui D., 3D-printing of polymer matrix composites: A review and prospective, *Composites Part B*, 2017, V. 110, pp. 442–458.
4. Patent US 4863538 A: Deckard, C.R., *Method and apparatus for producing parts by selective sintering*.
5. Boulaala, M., Elmessaoudi, D., Buj-Corral, I., El Mesbahi, J., Ezbakhe, O., Astito, A., El Mrabet, M., El Mesbahi, A., Towards design of mechanical part and electronic control of multi-material/multicolor fused deposition modeling 3D printing, *J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, V. 110, pp. 45–55.
6. Daminabo, S.C., Goel, S., Grammatikos, S.A., Nezhad, H.Y., Thakur, V.K., Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D-printing): techniques for polymer material systems, *Mater. Today Chem.*, 2020, V. 16, Art. 100248.

7. Al Rashid, A., Alim Khan, Sh., Al-Ghamdi, S.G., Koç, M., Additive manufacturing of polymer nanocomposites: Needs and challenges in materials, processes, and applications, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, V. 14, pp. 910–941.
8. Angel, K., Tsang, H.H., Bedair, S.S., Smith, G.L., Lazarus, N., Selective electroplating of 3D-printed parts, *Additive Manufacturing*, 2018, V. 20, pp. 164–172.
9. Hong, Zh., Zhang, Zh., You, R., Chen, J., Li, Sh., Wang, Y., Sun, Y., Song, B., Ji, Zh., Loy, D.A., Liang, R., Dual-head multi-photon polymerization 3D printing for parallel additive manufacturing organic/inorganic materials in optics, *Additive Manufacturing*, 2025, V. 103, Art. 104772.
10. Yousaf, A., Al Rashid, A., Polat, R., Koç, M., Potential and challenges of recycled polymer plastics and natural waste materials for additive manufacturing, *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, V. 41, Art. 01103.
11. Vorunichev, D.S., Kostin, M.S., Issledovanie profilogrammnoy struktury mikropoloskovykh SVCh-moduley, izgotovlennykh po additivnoy tekhnologii trekhmernoy pechati [Investigation of the profilogram structure of microstrip microwave modules manufactured using additive 3D-printing technology], *Russian Technological Journal*, 2023, V. 11, No 5, pp. 34–44. URL: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-34-44>
12. Ivanov, V.S., Gladky, D.A., Vorunichev, D.S., LPKF-LDS-tekhnologiya proizvodstva trekhmernykh skhem na plastikakh [LPKF-LDS technology for the production of three-dimensional schemes on plastics], *Russian Technological Journal*, 2021, V. 9, No 1, pp. 48–57. URL: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-48-57>
13. Sun, B., Dong, W., Liu, Ch., Xing, Y., Sun, J., Liang, X., Duan, H., Jia, X., A critical review on additive manufacturing of continuous fiber-reinforced polymer composites: Materials, fabrication, structural design and novel functions, *Thin-Walled Structures*, 2025, V. 215, Art. 113491.
14. Kong, X., Sun, G., Luo, Q., Brykin, V., Qian, J., Experimental and theoretical studies on 3D printed short and continuous carbon fiber hybrid reinforced composites, *Thin-Walled Structures*, 2024, V. 205, Art. 112406.
15. Karzakova, V.S., Tyurina, S.A., Demin, V.L., O kharaktere povedeniya tanina v roli sensibilizatora dlya khimicheskogo medneniya pri vyderzhke v ego rastvore i vvedenii v obiem materiala [On the behavior of tannic acid as a sensitizer for chemical copper plating during exposure to its solution and introduction into the material volume], *Perspektivnye materialy i tekhnologii (PMT-2025): Sbornik dokladov Natsionalnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*, Moscow, 7–12.04.2025: MIREA – Rossiisky tekhnologichesky universitet, 2025, pp. 478–482.
16. Karzakova, V.S., Tyurina, S.A., Demin, V.L., Vliyanie vremeni vyderzhki obiemno-sensibilizirovannoi smoly, ispolzuemoi dlya pechati LCD-metodom, v rastvore aktivatora na kachestvo osazhdeniya mednogo pokrytiya [Effect of the exposure time of the volume-sensitized resin used for LCD printing in the activator solution on the quality of the copper coating deposition], *Opticheskie tekhnologii, materialy i sistemy (Optotekh-2024): International scientific conference, 2–8 December 2024*, Moscow: MIREA – Rossiisky tekhnologichesky universitet, 2024, pp. 464–470.
17. Wright, J.G., Charnay, B.P., Rabinowitz, J.A., Mariano, R.G., Kanan, M.W., Rapid prototyping of lab-scale electrolysis cells using stereolithography and electroless plating, *Device*, 2023, V. 1, Is. 2, Art. ID 100049. DOI: 10.1016/j.device.2023.100049

18. Kucherov, F.A., Romashov, L.V., Ananikov, V.P., Development of 3D+G printing for the design of customizable flow reactors, *Chemical Engineering Journal*, 2022, V. 430, P. 1, Art. ID 132670. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132670
19. Gerges, T., Semet, V., Lombard, P., Allard, B., Cabrera, M., Rapid 3D-Plastronics prototyping by selective metallization of 3D-printed parts, *Additive Manufacturing*, 2023, V. 73, Art. ID 103673. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103673
20. Perera, A.T.K., Wu, K., Wan, W.Y., Song, K., Meng, X., Umezu, S., Wang, Y., Sato, H., Modified polymer 3D-printing enables the formation of functionalized micro-metallic architectures, *Additive Manufacturing*, 2023, V. 61, Art. ID 103317. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103317

UDC 678.067:621.793.16

FEATURES AND PROSPECTS OF METALLIZATION TECHNOLOGY FOR POLYMER PRODUCTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHODS.

Part 2. Technological features of obtaining copper plating on microwave equipment elements

S.A. TYURINA¹, V.S. KARZAKOVA¹, V.L. DEMIN¹, P.O. RUSINOV²

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “MIREA – Russian Technological University”, RTU MIREA

² Federal State Budgetary Institution of Science A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, IPhE

Received November 10, 2025

Revised January 29, 2026

Accepted February 5, 2026

Abstract—This paper presents the results of a study on the development and optimization of a technology for chemical metallization of polymer components produced by mask stereolithography (mSLA, LCD) to create functional copper coatings for microwave applications. The focus is on developing a method for volume sensitization of a photopolymer resin using tannic acid (tannin) as an alternative to traditional sensitizers. The influence of additive process parameters (smoothing) on the efficiency of surface activation is studied. The obtained results demonstrate the potential of the proposed technology for rapid prototyping and small-scale production of lightweight polymer components for microwave devices with conductive surfaces.

Keywords: additive manufacturing, stereolithography (SLA), chemical metallization, copper plating, volume sensitization, microwave technology

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-56-65

ACKNOWLEDGMENTS

This study was carried out as part of the project “Development of a technology for producing new-generation nanostructured composite materials with low specific volume electrical resistance and functional coatings” in order to achieve the results of the federal project “Universities for a generation of leaders” of the national project “Youth and Children”.

REFERENCES

1. Tyurina, S., Karzakova, V., Demin, V., et al., Development and Research of Gradient Polymer-Metal Materials Obtained Using Additive Technologies, with an Assessment of Their

- Functional and Mechanical Properties, *Polymers*, 2025, V. 17, No 22, p. 3014. DOI: 10.3390/polym17223014
2. Lopez, A.G., et al., Optimization and fabrication by 3D printing of a volcano smoke antenna for UWB applications, *Proc. 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2013.
 3. Vorunichev, D.S., Kostin, M.S., Issledovanie profilogrammnoi struktury mikropoloskovykh SVCh-modulei, izgotovlennykh po additivnoi tekhnologii trekhmernoii pechati [Investigation of the profilogram structure of microstrip microwave modules manufactured using additive 3D-printing technology], *Russian Technological Journal*, 2023, V. 11, No 5, pp. 34–44. URL: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-34-44>
 4. Proyavin, M.D., et al., Application of chemical metallization of photopolymer structures additive technology in the production of components for electronic devices, *Micromachines*, 2023, V. 14, No 10, p. 1897. URL: <https://doi.org/10.3390/mi14101897>
 5. Petrova, M., et al., Electroless metallisation of ABS polymer samples produced by different technologies, *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2021, V. 99, No 4, pp. 188–193.
 6. Karzakova, V.S., Tyurina, S.A., Demin, V.L., Issledovanie i analiz tekhnologii khimicheskoi metallizatsii polimernykh izdeliy, poluchaemykh metodami additivnogo proizvodstva [Research and analysis of the technology of chemical metallization of polymer products obtained by additive manufacturing methods], *Trudy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Perspektivnye materialy i tekhnologii (PMT-2024)"*, Moscow: RTU MIREA, 2024.
 7. Gerges, T., et al., Rapid 3D-Plastronics prototyping by selective metallization of 3D printed parts, *Additive Manufacturing*, 2023, V. 73, Art. 103673.
 8. Shaikh, M.S.N.M., Ahuja, B.B., Effects of primary and secondary metallization techniques on the performance of electric discharge machining (EDM) electrode produced by additive manufacturing and composite coating, *Materials Today: Proceedings*, 2021, V. 41, pp. 874–885.
 9. Lu, X., et al., Flexible ABS hollow waveguides with an inner copper coating for terahertz transmission, *Optics & Laser Technology*, 2022, V. 148.
 10. Liu, S., et al., Copper coated PEEK hollow waveguide and durability investigations for low-loss and bendable transmission of low-frequency terahertz wave, *Infrared Physics & Technology*, 2023, V. 131.
 11. Dimitriadis, A.I., et al., Polymer-based additive manufacturing of high-performance waveguide and antenna components, *Proceedings of the IEEE*, 2016, V. 105, No 4, pp. 668–676.
 12. Feito, S. M., et al., Gap waveguide slot array antenna based on a metal-only solution using additive manufacturing with multifunctional sum/difference radiation pattern, *Scientific Reports*, 2025, V. 15, No 1.
 13. Jafferson, J.M., Vinu, H., Sekaran, K., A study of additive manufacturing technologies and metallizing techniques for microwave waveguide components, *Materials Today: Proceedings*, 2021, V. 46, pp. 1328–1334.
 14. Quint, A., et al., Metallization Processes for 3D Printed Rectangular Waveguides in E-and D-Band, *Proc. 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, IEEE, 2025, pp. 1–5.
 15. Garcia-Tejero, A., Burgos-Garcia, M., Merli, F., Broadband Metallized Plastic Waveguide Antenna With Robust Isolation Interface at 77 GHz, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, V. 23, No 10, pp. 2875–2879.

16. Balanis, C.A., Evolution of Antenna Technology: Apertures, waveguides, horns, and Vivaldi, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2024, V. 66, No 6, pp. 29–36. DOI: 10.1109/MAP.2024.3428920
17. GOST 25142–82 (CT SEV 1156–78): *Sherokhovatost poverkhnosti* [Surface roughness], Moscow, 1982.
18. GOST 2789–73: *Sherokhovatost poverkhnosti* [Surface roughness], Moscow, 1973.
19. ASTM F1529-02: *Standard Test Method for Sheet Resistance Uniformity Evaluation by In-Line FourPoint Probe with the Dual-Configuration Procedure*.
20. Shan, Y., et al., Reducing lateral stair-stepping defects in liquid crystal display-based vat photopolymerization by defocusing the image pattern, *Additive Manufacturing*, 2022, V. 52, Art. 102653.
21. Tang, J.F., et al., Pioneering techniques for achieving high-resolution, ultrasmooth surfaces via LCD 3D printing technology, *Additive Manufacturing*, 2025, V. 103, Art. 104764

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

UDC 661.666.2

CRUSHING OF THERMALLY EXPANDED GRAPHITE NANOPATES BETWEEN LAYERS OF OXIDIZED COAL TAR PITCH DURING CARBONIZATION AND GRAPHITATION

A.V. DMITRIEV¹, Cand. Sc. (Eng), B.A. KULNITSKY², Dr Sc. (Phys-Math)

¹ *Chelyabinsk State University, 129 Bratiev Kashirinykh St, 454001 Chelyabinsk, Russian Federation. E-mail: avdm@ya.ru*

² *Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials of the NRC “Kurchatov Institute”, 7a Tsentralnaya St, Troitsk, 108840 Moscow, Russian Federation. E-mail: boris@tisnum.ru avdm@ya.ru*

Received August 15, 2025

Revised November 24, 2025

Accepted December 24, 2025

Abstract—A material based on a mixture of coal tar pitch and an order of magnitude smaller amount of expanded graphite by weight was studied. Thin layers of coal tar pitch on the surface of honeycomb-like porous structure of expanded graphite were cured by atmospheric oxygen during heating. After coking and graphitization of the pressed blanks, uneven phase shrinkage led to mechanical deformation of the crystalline structure of the expanded graphite honeycomb walls bonded to the pitch coke layers. After coking, the dimensions of the mosaic blocks perpendicular to the graphite layers of the honeycomb walls decreased by half. After graphitization, the interlayer distance of the graphite in the honeycomb walls increased due to shrinkage during cooling.

Keywords: graphite, single crystal, coal tar pitch, layer, onion-like structure, thermal expansion, shrinkage, crushing, tensile strength, interplanar distance

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-66-74

REFERENCES

1. Sosedov, V.P., *Svoistva konstruktsionnykh materialov na osnove ughleroda* [Properties of carbon-based structural materials]: Handbook, Moscow: Metallurgiya, 1975.
2. Wang, Y., Panzig, J., Kiefler, B., et al., Crystal Structure of Graphite under Room-Temperature Compression and Decompression, *Scientific Reports*, 2012, V. 2, Art. 520.

3. Wan, J., Jiang, J.-W., Park, H., et al., Irreversible crumpling of graphene from hydrostatic and biaxial compression, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, No 51 (1). DOI: 10.1038/srep00520
4. Dmitriev, A.V., *Nauchnye osnovy razrabotki sposobov snizheniya udelnogo elektricheskogo soprotivleniya grafitirovannykh elektrodov* [Scientific bases for development of methods for reduction of specific electrical resistance of graphitized electrodes], Chelyabinsk: ChelGPU, 2005.
5. Dmitriev, A.V., Osobennosti mikrostruktury uglerodnykh materialov na osnove kamennougolnogo peka okislennogo na poverkhnosti sot TRG [Features of the microstructure of carbon materials based on coal tar pitch oxidized on the surface of honeycombs of TEG], *Khimiya tverdogo topliva*, 2013, V. 47, No. 6, pp. 48–54. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20446800> (reference date 24/12/2025)
6. Dmitriev, A.V., Kulnitsky, B.A., Oxidative nanostructuring in thin films of coal tar pitch, *Materials today: Proceedings*, 2018, V. 5, No 12, pp. 26068–26072. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.08.031
7. Privalov, V.E., Stepanenko, M.A., Kamennougolny pek: Poluchenie, pererabotka, primeneniye [Coal tar pitch: Production, processing, application], Moscow: Metallurgiya, 1981.
8. Fialkov, A.S., *Uglerod. Mezhsloevye soedineniya grafita i kompozity na ego osnove* [Carbon. Interlayer connections of graphite and composites based on it], Moscow: AspectPress, 1997.
9. Ershov, A.A., Dmitriev, A.V., Ispolzovanie prirodnogo cheshuichatogo grafita v kalibrovke instrumentalnykh metodov issledovaniya [Use of natural flake graphite in the calibration of instrumental research methods], *Khimiya tverdogo topliva*, 2023, V. 47, No 4, pp. 55–63. DOI: 10.31857/S0023117723040035
10. Dmitriev, A.V., Shanina, O.M., Kulnitsky, B.A., Tonkaya struktura koksa iz kamennougolnogo peka, okislennogo na poverkhnosti penografita [Fine structure of coke from coal tar pitch oxidized on the surface of expanded graphite], *Bulletin of SUSU. Ser. Metallurgy*, 2016, V. 16, No 1, pp. 149–156. DOI: 10.14529/met160122
11. Chen, G. Weng, W., Wu, D., et al., Preparation and characterization of graphite nanosheets from ultrasonic powdering technique, *Carbon*, 2004, No 42, pp. 753–759.

UDC 678.743.41

STUDY OF THE INFLUENCE OF MECHANICAL ACTIVATION OF BASALT FIBERS ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF PTFE-BASED BASALT PLASTICS

A.A. USHKANOV, N.N. LAZAREVA, Cand. Sc. (Eng), A.A. OKHLOPKOVA, Dr Sc. (Eng)
North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, 58 Belinskogo St, 677000 Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation. E-mail: alexanderushkanov@mail.ru

Received September 15, 2025

Revised October 28, 2025

Accepted December 3, 2025

Abstract—The paper presents the results of tribological and structural studies of composites based on polytetrafluoroethylene (PTFE) and basalt fiber (BF) with the addition of ultrafine PTFE of the FORUM® brand. Tribological studies have demonstrated a significant increase in the wear resistance of the PCM compared to pure PTFE, despite a slight increase in the friction coefficient. Such behavior indicates a positive effect of BF mechanical treatment on the performance

parameters of the materials. Structural studies have shown the amorphous nature of BF, the formation of a secondary structure on the friction surface of the PCM, and uneven fiber distribution in the matrix. It has been established that removing the lubricant from the BF surface is impractical for the development of PCM for tribotechnical purposes. The results obtained emphasize the efficiency of planetary ball mill *Activator 2S* for the mechanical treatment of BF in order to create PCM with improved tribological characteristics.

Keywords: polymer, PCM, tribology, wear resistance, protective layer, polymer composite, pretreatment, structure

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-75-84

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FSRG-2024-0004.

REFERENCES

1. Dhanumalayan, E., Joshi, G.M., Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2018, V. 1, pp. 247–268. DOI: 10.1007/s42114-018-0023-8
2. Vikas, G., Sudheer, M., A Review on Properties of Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites, *American Journal of Materials Science*, 2017, V. 5, pp. 156–165. DOI: 10.5923/j.materials.20170705.07
3. Yan, L., Chu, F., Tuo, W., Zhao, X., Wang Yan., Zhang, P., Gao, Y., Review of research on basalt fibers and basalt fiber-reinforced composites in China (I): Physicochemical and mechanical properties, *Polymers and Polymer Composites*, 2020, V. 9, pp. 1612–1624. DOI: 10.1177/0967391120977396
4. Swentek, I., Thompson, J., Meirson, G., Ugresic, V., Henning, F., *Comparison of basalt, glass, and carbon fiber composites using the high pressure resin transfer molding process*, Western University, 2016, pp. 1–25.
5. Mashkov, Yu.K., Na osnove politetraftoretilena, optimizatsiya ikh sostava i tekhnologii [Based on polytetrafluoroethylene, optimization of their composition and technology], *Vestnik SibADI*, 2010, No 4 (18), pp. 17–21.
6. Mehra, N., Mu, L., Ji, T., Zhu, J., Thermal conduction in polymer composites, *Polymer-Based Multifunctional Nanocomposites and Their Applications*, 2019, V. 3, pp. 77–110. DOI: 10.1016/B978-0-12-815067-2.00003-2
7. Struchkova, T.S., Vasiliev, A.P., Cho, J.-H., Vliyanie oksida alyuminiya na svoistva politetraftoretilena [Influence of aluminum oxide on the properties of polytetrafluoroethylene], *Arktika XXI vek. Tekhnicheskie nauki*, 2014, No 1 (2), pp. 3–10.
8. Rybin, V.A., *Fiziko-himicheskoe issledovanie bazaltovogo volokna s zashchitnymi shchelochestojkimi pokrytiyami*: Thesis for Cand. Sc. (Chem.), Novosibirsk, 2016, 143 p.
9. Kuzmin, K.L., *Vliyanie himicheskogo sostava i poverhnostnoj modifikacii na mekhanicheskie svoistva alyumosilikatnyh volokon*: Thesis for Cand. Sc. (Chem.), Moscow, 2017, 148 p.
10. Eduard, K., Rainer G., Jona, S., Basalt, glass and carbon fibers and their fiber reinforced polymer composites under thermal and mechanical load, *AIMS Materials Science*, 2016, No 3(4), pp. 1561–1576. DOI: 10.3934/matsci.2016.4.1561

11. Okhlopkova, A.A., Vasiliev, S.V., Gogoleva, O.V., Issledovanie vliyaniya bazaltovogo volokna na fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki kompozitov na osnove politetraftoretilena [Research of basalt fiber on physical-mechanical and tribological characteristics of composites based on polytetrafluoroethylene], *Arktika XXI vek. Tekhnicheskie nauki*, 2014, No 1 (2), pp. 11–18.
12. Zhukovskaya, E.S., Pavlov, Yu.V., Popov, S.S., Gutnikov, S.I., Stadiya ionnogo obmena v tekhnologii polucheniya nepreryvnykh bazaltovykh volokon [Ion exchange stage in the technology of obtaining continuous basalt fibers], *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2020, No 2, pp. 99–103. DOI: 10.17513/mjpf.130187
13. Prasad, V., Talupula, S., A review on reinforcement of basalt and aramid (Kevlar 129) fibers, *Materials Today: Proceedings*, 2018, V. 2, pp. 5993–5998. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.202
14. Negrov, D.A., Putintsev, V.Yu., Improvement of pressing technology of products from polytetrafluoroethylene, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2021, V. 14, pp. 564–571.
15. Tsvetnikov, A.K., Energo- i resursosberegayushchie materialy na osnove ultradispersnogo nizkomolekulyarnogo politetraftoretilena [Energy- and resource-saving materials based on ultrafine low molecular weight polytetrafluoroethylene], *Vestnik DVO RAN*, 2021, No 5 (219), pp. 79–94.
16. Vasiliev, A.P., Struchkova, T.S., Nikiforov, L.A., Okhlopkova, A.A., Grako-vich, P.N., Shim, E.L., Cho, J.-H., Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites with carbon fiber and layered silicate fillers, *Molecules*, 2019, V. 2, p. 224. DOI: 10.3390/molecules24020224
17. Friedrich, K., Polymer composites for tribological applications, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2018, V. 1, pp. 3–39. DOI: 10.1016/j.aiepr.2018.05.001
18. Dangsheng, X., Friction and wear properties of UHMWPE composites reinforced with carbon fiber, *Materials letters*, 2005, V. 2–3, pp. 175–179.
19. Fan, X., Li, G., Guo, Y., Zhang, L., Xu, Y., Zhao, F., Zhang, G., Role of reinforcement types and silica nanoparticles on tribofilm growth at PTFE-Steel interface, *Tribology International*, 2020, V. 143, p. 106035. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106035

UDC 678.073:534

PLASTIC DEFORMATION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FORMED BY FDM TECHNOLOGY UNDER ULTRASONIC EXPOSURE

I.V. ZLOBINA^{1,2}, Cand. Sc. (Eng), N.V. BEKRENEV¹, Dr Sc. (Eng), A.S. EGOROV^{1,2}, Cand. Sc. (Chem), A.V. ANISIMOV³, Dr Sc. (Eng), D.S. ALEXANDROVA^{1,2}, D.O. CHURIKOV¹

¹ *Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin, 77 Politekhnicheskaya St, 410054 Saratov, Russian Federation. E-mail: zlobinaiv@sstu.ru*

² *National Research Center “Kurchatov Institute”, 1 Academician Kurchatov Sq, 123182 Moscow, Russian Federation*

³ *St Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 18 Bolshaya Morskaya St, 191186, St Petersburg, Russian Federation*

Received September 22, 2025

Revised December 5, 2025

Accepted December 18, 2025

Abstract—This study examined the ultrasonic contact processing of a monolayer produced using FDM additive manufacturing technology (FDM) with polyamide-6 (PA-6) and polyetheretherketone (PEEK) thermoplastic filaments reinforced with carbon fiber bundles (prepregs) impregnated with epoxy resin (ED-20 + PEPA). Resonance frequencies of 22 and 44 kHz were used. It was found that ultrasonic vibrations applied to PA-6 and PEEK composite monolayers for 30 seconds cause deformation of 5 and 0.5 μm , respectively, at a frequency of 22 kHz. At a frequency of 44 kHz, deformation reaches 10 and 1 μm . Moreover, in the area of ultrasonic source action, a local temperature increase of up to (40–43) $^{\circ}\text{C}$ for PA-6 and (46–55) $^{\circ}\text{C}$ for PEEK is observed. When heated to similar temperatures and subjected to static force action, the deformation of the PA-6 monolayer was 2 μm , while no deformation was detected for the PEEK monolayer. In optical micrographs, microwaves are observed in the field of force impact under ultrasonic vibration conditions, and at a frequency of 44 kHz, manifestations of intense flow and mixing of the binder are noted. When heated with static loading, a smooth surface morphology is detected, and the closure of existing gas microbubbles and microcracks is noted. Thus, under the influence of ultrasound, changes in the surface morphology and structure of the monolayer material occur, indicating its compaction. This can contribute to increased mechanical and physical contact between the binder and filler and, consequently, to an improvement in its physical and mechanical properties. All other things being equal, the use of high-frequency ultrasound is preferable.

Keywords: additive manufacturing, composite monolayer, continuous carbon fiber-reinforced filaments, ultrasound, frequency, plastic deformation, heating temperature, surface morphology

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-85-96

ACKNOWLEDGMENTS

Analytical studies were carried out using scientific equipment of the Collective Use Center “Research Chemical-Analytical Center of the National Research Center “Kurchatov Institute”.

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant 23-79-00039.

REFERENCES

1. Gabova, M.A., *Primenenie kompozitsionnykh materialov pri dobyche nefi i gaza* [Application of composite materials in oil and gas production], *Vestnik GUU*, 2012, No 10, pp. 88–92.
2. Balashov, A.V., Markova, M.I., *Issledovanie struktury i svoistv izdelii, poluchennykh 3D-pechatyu* [Research on the structure and properties of 3D-printed products], *Inzhenerny vestnik Dona*, 2019, No 1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618> (reference date 18/12/2025)
3. Petrov, V.M., Bezpachuk, S.N., Yakovlev, S.P., *O vliyanii struktury na prochnost izdelii iz plastikov, poluchaemykh metodom 3D-pechaty* [On the impact of structure on the strength of 3D-printed plastic products], *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2017, No 4, V. 9, pp. 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776
4. Gibson, Ya., Rozen, D., Staker, B., *Tekhnologii additivnogo proizvodstva. Trekhmernaya pechat, bystroe prototipirovanie i pryamoe tsifrovoe proizvodstvo* [Additive manufacturing technologies. Three-dimensional printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing], Moscow: TEKHNO SFERA, 2016.

5. Matsuzaki, R., Ueda, M., Namiki, M., et al., Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation, *Scientific reports*, 2016, V. 6.
6. Kopytina, M., Karpova, T., Satskaya, Z., Kulikova, S., Eroshkina, E., Antonov, F., Additivnye tekhnologii dlya kompozitnykh materialov [Additive technologies for composite materials], *Additivnye tekhnologii*, 2019, No 3.
7. *Microwave processing of materials*, National Materials Advisory Board, Washington: National Academies Press, 1994.
8. Arkhangelsky, Yu.S., *Spravochnaya kniga po SVCh-elektrotermii* [Handbook of Microwave Electrothermia]: reference book, Saratov: Nauchnaya kniga, 2011.
9. Singh, I., Kumar Bajpaia, P., Malika, D., Kumar Sharma, A., Kumar, P., Feasibility study on microwave joining of 'green' composites, *Akademeia*, 2011, No 1 (1), pp. 1–6.
10. Piushner, G., *Nagrev energiei sverkhvysokikh chastot* [Ultra-high frequency energy heating], Moscow: Energiya, 1968.
11. Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V., O mekhanizme povysheniya mekhanicheskikh kharakteristik otverzhdennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov pod deistviem SVCh elektromagnitnogo polya [On the mechanism of improving the mechanical characteristics of cured polymer composite materials under the influence of a microwave electromagnetic field], *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Ser.: Fizika*, 2022, V. 22, No 2, pp. 158–169.
12. Jaegeun, T., Lee, K., Lee, K.-H., Microwave heating of carbon-based solid materials, *Carbon Letters*, 2014, V. 15, No 1, pp. 15–24.
13. Kwak, M., et al. Microwave Curing of Carbon-Epoxy Composites: Penetration depth and material characterization, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, August, V. 75, pp. 18–27.
14. Studentsov, V.N., Pyataev, I.V., Vliyanie kolebatelnykh vozdeistvii na protsessy strukturoobrazovaniya v polimerakh [The effect of oscillatory influences on the structure formation processes in polymers], *Zhurnal prikladnoi khimii*, 2014, V. 87, Is. 3, pp. 389–392.
15. Studentsov, V.N., Mizintsov, A.A., Modifitsirovanie armirovannykh polimernykh materialov [Modification of reinforced polymer materials], *Khimicheskie volokna*, 2001, No 5, pp. 29–32.
16. Cheremukhina, I.V., Studentsov, V.N., Muradov, A.B., Kuznetsov, V.A., Razlichnye sposoby fizicheskoi modifikatsii armirovannykh reaktoplastov [Various methods of physical modification of reinforced thermoplastics], *Plasticheskie massy*, 2007, No 4, pp. 12–16.
17. Chernyshev, V.M., *Dempfirovanie kolebanii mekhanicheskikh sistem pokrytiyami iz polimernykh materialov* [Damping of mechanical system vibrations by polymer coatings], Moscow: Nauka, 2009.
18. Parshina, L.V., Ryabov, V.M., Yartsev, B.A., Rasseyanie energii pri kolebaniyakh neodnorodnykh kompozitsionnykh struktur: 1. Postanovka zadachi [Energy dissipation during vibrations of heterogeneous composite structures: 1. Problem statement], *Vestnik SPbGU. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*, 2018, V. 5 (63), Is. 2, pp. 300–309.
19. Parshina, L.V., Ryabov, V.M., Yartsev, B.A., Rasseyanie energii pri kolebaniyakh neodnorodnykh kompozitsionnykh struktur: 2. Metod resheniya [Energy dissipation during vibrations of heterogeneous composite structures: 2. Solution method], *Vestnik SPbGU. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*, 2018, V. 5 (63), Is. 4, pp. 678–688.

20. Belyaev, N.M., *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials], Moscow: Gostekhizdat, 1956.

UDC 678.067.2

MULTIFIBER HYBRID POLYMER COMPOSITE MATERIALS (Review)

A.V. ANISIMOV, Dr Sc. (Eng), N.S. LUKICHEVA, D.A. PETROVA, Cand. Sc. (Eng),

A.Yu. KUZNETSOV, Cand. Sc. (Eng), O.I. GLADUNOVA, N.V. DIANKINA

St Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,

18 Bolshaya Morskaya St, 191186 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: nvkm@sutd.ru

Received December 1, 2025

Revised December 10, 2025

Accepted December 18, 2025

Abstract—The review presents the main research directions in the development of multi-fiber hybrid polymer composite materials reinforced with continuous fillers made from fibers of different nature. Two approaches to creating hybrid polymer composite materials are described: the first involves molding hybrid laminates with monolayers of different fibers, and the second involves molding composites reinforced with hybrid materials woven from different fibers. The advantages and disadvantages of each approach are described. It is shown that by combining different types of reinforcing fibers, it is possible to create a new generation of structural and protective materials with a specified set of operational characteristics.

Keywords: polymer composite materials, hybrid materials, hybrid laminates, hybrid reinforcing fabrics

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-97-114

ACKNOWLEDGMENTS

The study is supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No 25-13-20053, URL: <https://rscf.ru/project/25-13-20053/>) and co-financing from the St. Petersburg Science Foundation (agreement No 25-13-20053 dated 12.08.2025) and a qualified customer: National Research Center “Kurchatov Institute” — Central Research Institute of Space Systems “Prometheus” (agreement No 23-09/2/25/11-296 dated 15.07.2025).

REFERENCES

1. Hamza, M.S., *Fabrication and Characterization of Hybrid Laminate Unsaturated Polyester Composites* – 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/312135846_Fabrication_and_Characterization_of_Hybrid_Laminate_Unsaturated_Polyester_Composites (reference date 25.09.2025)
2. Venkateswara, B.P., Boggarapu, V., Rajani, D., et al, Investigation on mechanical and thermal behaviour of graphene bonded carbon/Kevlar hybrid fabric polymer composites, *Journal of Engineering and Applied Science*, 2024, No 71. Art. 113. URL: <https://jeas.springeropen.com/articles/10.1186/s44147-024-00448-0> (reference date 25.09.2025)
3. Anisimov, A.V., Lishevich, I.V., Sargsyan, A.S., et al., Razrabotka i issledovanie novogo gibridnogo antifriktsionnogo polimernogo kompozitsionnogo materiala s dielektricheskimi svoystvami [Development and research of a new hybrid antifriction polymer composite material with dielectric properties], *Voprosy materialovedeniya*, 2025, No 1 (121), pp. 90–98.

4. Witten, E., Mathes, V., Der europäische Markt für Faserverstärkte Kunststoffe / Composites 2024 Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Ausblicke, AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V, 2025. URL: <https://www.avk-tv.de/avk-marktbericht-2024/> (reference date 20.09.2025)
5. Ahmad, F.Ab.G., Jamaluddin, M., Hardness, tensile and microstructure assessment of carbon/glass hybrid composite laminate, *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, No 15 (2), pp. 91–105.
6. Murugan, R., Lakshmi Narasimhan, R., Harish, A., Effect of fiber orientation on effective stacking sequence of glass/carbon hybrid composite laminates for structural applications, *Advances in Engineering Research (AER)*, 2018, No 142, pp. 204–209.
7. Murugan, R., Ramesh, R., Padmanabhan, K., Investigation on static and dynamic mechanical properties of epoxy based woven fabric glass/carbon hybrid composite laminates, *Procedia Engineering*, 2014, V. 97, pp. 459–468.
8. Zhang, C., Huang, J., Li, X., Zhang, C., Numerical study of the damage behavior of carbon fiber/glass fiber hybrid composite laminates under low-velocity impact, *Fibers and Polymers*, 2020, No 21 (12), pp. 2873–2887.
9. Zhurkovsky, M.E., Samoilenko, V.V., Firsov, V.V., et al., Issledovanie prochnostnykh svoystv gibridnykh materialov na osnove uglerodnykh i steklyannykh tkanei [Study of the strength properties of hybrid materials based on carbon and glass fabrics, *Yuzhno-Sibirsky nauchny vestnik*, 2018, No 2 (22), pp. 21–27. DOI: 10.25699/SSSB.2018.22.15453
10. Erbayrak, E., Yuncuoglu, U., Kahraman, Y., Gumus, B.E., An experimental and numerical determination on low-velocity impact response of hybrid composite laminate, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*, 2020, No 45, pp. 1485–1500.
11. Mohd, F.B.I., Aidah, J., Impact properties of hybrid fibre reinforced polymer composite laminates, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2020, V. 3, No 9, pp. 2763–2766.
12. Azeem, M., Haji, Ya.H., Alam, M.A., Sultan, T.H., Ali, M., Sattar, M., Ahmad, T., Hatami, H., Sadique, R., Mokhtar, A.A., Mustapha, M., Khan, M.A., Masood, F., Macroscale assessment of low-velocity impact on hybrid composite laminates, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2021, No 52 (10), pp. 1101–1111.
13. Satkar, A., Mache, A., Kulkarni, A., Numerical investigation on perforation resistance of glass-carbon/epoxy hybrid composite laminate under ballistic impact, *Materials Today Proceedings*, 2022, No 59 (1), pp. 1–8.
14. Wang, M., Pan, Zh., Cai, Q., et al., Effects of carbon/kevlar hybrid ply and intercalation sequence on mechanical properties and damage resistance of composite laminates under quasi-static indentation, *Polymers*, 2024, No 16 (13). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/13/1801> (reference date 25.09.2025)
15. Hu, L., Influence of layer angle and fiber type on the impact resistance of composite laminates, *Advances in Engineering Technology Research*, 2025, No 14 (1), p. 846.
16. Xiang, Yu., Zhang, Zh.W., Yang, X., et al., Failure mechanism of carbon /ultra-high molecular weight polyethylene twill fiber reinforced hybrid laminates under ballistic impact // *Materials & Design*, 2022, No 216. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026412752200199X?via%3Dihub> (reference date 25.09.2025)

17. Li, Y., Xian, X.J., Choy, C.L., Guo, M., Zhang, Z., Compressive and flexural behavior of ultra-high-modulus polyethylene fiber and carbon fiber hybrid composites, *Composites Science and Technology*, 1999, V. 59, Is. 1, pp. 13–18. DOI: 10.1016/S0266-3538(98)00056-6

18. Li, Zh., Xue, Y., Sun, B., Gu, B., Ballistic penetration damages of hybrid plain-woven laminates with carbon, Kevlar and UHMWPE fibers in different stacking sequences, *Defence Technology*, 2023, No 26, pp. 23–38.

19. Xu, Y., Hong, Zh., Guangyan, H., Ballistic performance of UHMWPE laminate/modified aramid fabric composite structure based on support vector machine (SVM) method, *Composites Part B: Engineering*, 2025, No 307. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836825007619?via%3Dihub> (reference date 25.09.2025)

20. Priyanka, P., Mali, H. S., Dixit, A., Carbon–Kevlar intraply hybrid fabric polymer composites: mechanical performance, *Iranian Polymer Journal*, 2023, No 32, pp. 633–645.

21. Medeiros, R.J., Nóbrega, S.H.Sh., Aquino, E.M.F., Failure theories on carbon/kevlar hybrid fabric based composite laminate: notch and anisotropy effects, *Materials Research*, 2019, No 22 (3). URL: <https://www.scielo.br/j/mr/a/yjnMpTPBMkkW68P7fH7byrn/?lang=en> (reference date 20.09.2025)

22. Li, X., Wu, H., Yuan, M., Low-velocity impact behavior of carbon-Kevlar fiber intraply hybrid composites, *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2025, V. 65, Is. 6, pp. 1060–1069.

23. Hu, Yu., Shi, Ya., Liu, D., et al., Damage tolerance of 2-dimensional UHMWPE/CF hybrid woven laminates subjected to low-velocity impact, *Materials & Design*, 2020, No 191 (6). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520301386?via%3Dihub> (reference date 25.09.2025)

24. Kudinov, V.V., Korneeva, N.V., Krylov, I.K., et al., Gibrnidnye polimernye kompozitsionnye materialy [Hybrid Polymer Composite Materials], *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2008, No 2, pp. 32–37.

25. Rumyantseva, V.S., Lukicheva, N.S., Shtyagina, L.M., Poluchenie i issledovanie svoystv kompozitsionnykh materialov na osnove steklotkani i sverkhvysokomodulnogo volokna s ispolzovaniem fenolformaldegidnoi smoly v kachestve svyazuyushchego [Obtaining and studying the properties of composite materials based on fiberglass and ultra-high-modulus fiber using phenol-formaldehyde resin as a binder], *Nanostrukturnye, voloknistye i kompozitsionnye materialy: tez. dokl. 14 vseros. nauch. i stud. konf.*, 2025, Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet promyshlennykh tekhnologii i dizaina. St Petersburg: GUPTD, 2025, pp. 84–86

26. Kulagina, G.S., Kan, A.Ch., Zhelezina, G.F., Levakova, N.M., Antifriktsionnye materialy na osnove polimernykh volokon [Anti-friction materials based on polymer fibers], *Trudy VIAM*, 2022, No 11. DOI: [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2022-0-11-48-59](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-11-48-59). URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1939 (reference date 25.09.2025)

27. Begum, Sh., Fawzia, S., Hashmi, M.S.J., Polymer matrix composite with natural and synthetic fibres, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2020, V. 3, No 6, pp. 547–564.

28. Seydibeyoglu, M.Ö., Dogru, A., Wang, J., et al., Review on hybrid reinforced polymer matrix composites with nanocellulose, nanomaterials, and other fibers, *Polymers*, 2023, No 15 (4). URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/4/984> (reference date 25.09.2025)
29. Nguyen, H., Zatar, W., Mutsuyoshi, H., Mechanical properties of hybrid polymer composite, *Hybrid Polymer Composite Materials*, 2017, pp. 83–113.
30. Jomboh, K.J., Garkida, A., Alemaka, E.M., et al., Properties and applications of natural, synthetic and hybrid fiber reinforced polymer composite: A review, *AIMS Materials Science*, 2024, V. 4, No 11, pp. 774–801.
31. Ismail, S.O., Akpan, E., Dhaka, H.N., Review on natural plant fibres and their hybrid composites for structural applications: Recent trends and future perspectives, *Composites Part C: Open Access*, 2022, No 9. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682022000858?via%3Dihub> (reference date 25.09.2025)
32. Santos Felipe, R.C.T., Barbosa Felipe, R.N., Caldas Batista, A.C.M., Polymer Composites Reinforced with Hybrid Fiber Fabrics, *Materials Research*, 2017, No 20 (2), pp. 555–567. URL: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0587>
33. Hufenbach, W., Gude, M., Ebert, C., Hybrid 3D-textile reinforced composites with tailored property profiles for crash and impact applications, *Composites Science and Technology*, 2009, No 69 (9), pp. 1422–1426.
34. Patel, D.K., Waas, A.M., Damage and failure modelling of hybrid three-dimensional textile composites: a mesh objective multi-scale approach, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2016, No 374. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0036> (reference date 25.09.2025)

678.073:539 UDC

INFLUENCE OF VARIOUS TYPES OF WAVE PROCESSES ON THE PHYSICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF POLYETHERETHERKETONE AND POLYETHERKETONE-BASED COMPOSITES (Review)

I.V. ZLOBINA^{1,2}, Cand. Sc. (Eng), D.S. ALEXANDROVA^{1,2}, A.S. EGOROV^{1,2}, Cand. Sc. (Chem), A.V. ANISIMOV³, Dr Sc. (Eng)

¹ *Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin, 77 Politekhnicheskaya St, 410054 Saratov, Russian Federation. E-mail: zlobinaiv@sstu.ru*

² *NRC “Kurchatov Institute”, 1 Academician Kurchatov Sq, 123182 Moscow, Russian Federation*

³ *St Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 18 Bolshaya Morskaya St, 191186 St Petersburg, Russian Federation*

Received September 22, 2025

Revised December 5, 2025

Accepted December 18, 2025

Abstract—The review studies the effects of various types of ionizing and non-ionizing radiation on the properties of polyetheretherketone (PEEK) and its composites. The authors describe changes in the physical properties of PEEK, such as crystallinity, phase transition temperatures, as well as the crosslinking and degradation processes of polymer chains, depending on the type of radiation applied. The macroscopic consequences of these changes are noted, so that the researcher can

select an appropriate method for influencing the properties of PEEK products and its composites, as well as to assess the capabilities, prospects, and limitations of using such products under high-energy radiation exposure. Due to insufficient coverage of this topic in national publications, this review is based on world literature.

Keywords: polyetheretherketone, composite materials, non-ionizing effect, ionizing effect, physical and mechanical properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-115-128

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Russian Science Foundation grant 23-79-00039 “Substantiation of a methodology for the comprehensive modification of composite materials for extreme operating conditions based on the study of phase-structural transformations under the influence of electrophysical effects in various frequency ranges.”

REFERENCES

1. Liaw, C.Y., et al., Interlayer bonding strength of 3D-printed PEEK specimens, *Soft matter*, 2021, V. 17, No 18, pp. 4775–4789.
2. Hanemann, T., et al., Material extrusion 3D-printing of PEEK-based composites, *Polymers*, 2023, V. 15, No 16.
3. Xu, Q., et al., Enhanced interlayer strength in 3D-printed poly (ether ether ketone) parts, *Additive Manufacturing*, 2022, V. 55.
4. Collinson, D.W., et al., Direct evidence of interfacial crystallization preventing weld formation during fused filament fabrication of poly (ether ether ketone), *Additive Manufacturing*, 2022, V. 51.
5. Chen, M., et al., The microwave processability of semicrystalline polymers, *Polymer Engineering & Science*, 1993, V. 33, No 17, pp. 1122–1131.
6. Littlefield, A.G., Bartolucci, S.F., Mauer, J.A., A study on the use of graphene-peek composites as high temperature adhesives: mechanical properties and microwave activation, *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2017. DOI: 10.1115/IMECE2017-70412
7. Mohoppu, M., et al., Rapid Microwave Bonding of Thermoplastics Substrates with Electro-magnetically Susceptible Graphene/Poly (ether ether ketone) Segregated Nanoformulates, *ACS Applied Engineering Materials*, 2025, V. 3, No 8, pp. 2683–2696.
8. Zhang, G., et al., Microwave sintering of poly-ether-ether-ketone (PEEK) based coatings deposited on metallic substrate, *Scripta materialia*, 2006, V. 55, No 7, pp. 621–624.
9. Ai, J.R., Li, S., Vogt, B.D., Increased strength in carbon-poly (ether ether ketone) composites from material extrusion with rapid microwave post processing, *Additive Manufacturing*, 2022, V. 60.
10. Qu, H., et al., Ultrasonic-assisted reinforcement and annealing treatment of additive manufacturing polyether-ether-ketone, *Polymer Composites*, 2023, V. 44, No 3, pp. 1684–1695.
11. Khatri, B., Roth, M.F., Balle, F., Ultrasonic welding of additively manufactured PEEK and carbon-fiber-reinforced PEEK with integrated energy directors, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2022, V. 7, No 1.
12. Tao, W., et al., Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding, *Journal of manufacturing processes*, 2019, V. 37, pp. 196–202.

13. Suzuki, N., et al., Rapid formation of hydroxyapatite layer on polyetheretherketone by vacuum ultraviolet irradiation and microwave heating techniques, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2016, V. 124, No 1, pp. 49–54.
14. Gou, Q., et al. Surface Modification of PEEK fabric via UV Irradiation, Air Plasma, and Oxygen Plasma: Effects on Adhesion to Epoxy Resin, *Surfaces and Interfaces*, 2025.
15. Hegazy, E.S.A., Sasuga, T., Seguchi, T., Irradiation effects on aromatic polymers: 3. Changes in thermal properties by gamma irradiation, *Polymer*, 1992, V. 33, No 14, pp. 2911–2914.
16. Rival, G., Paulmier, T., Dantras, E., Influence of electronic irradiations on the chemical and structural properties of PEEK for space applications, *Polymer Degradation and Stability*, 2019, V. 168.
17. Rival, G., Dantras, E., Paulmier, T., Electronic irradiation ageing in the vicinity of glass transition temperature for PEEK space applications, *Polymer Degradation and Stability*, 2020, V. 181.
18. Kornacka, E.M., Przybytniak, G., Nowicki, A., Radical processes initiated by ionizing radiation in PEEK and their macroscopic consequences, *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, V. 30, No 1, pp. 79–85.
19. Almas, N., et al., Mechano-chemical properties of electron beam irradiated polyetheretherketone, *Polymers*, 2022, V. 14, No 15.
20. Al Lafi, A.G., FTIR spectroscopic analysis of ion irradiated poly (ether ether ketone), *Polymer degradation and stability*, 2014, V. 105, pp.122–133.
21. Al Lafi, A.G., Parker, D.J., Hay, J.N., The crosslinking of poly (ether ether ketone): Thermally and by irradiation, *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, V. 132, N 22.
22. Rashed, K., et al., Investigation of effects induced by 57 MeV ⁵⁶Fe ions and 9 MeV protons on additively manufactured PEKK for space application, *Polymer Testing*, 2024, V. 132.

WELDING, WELDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES

UDC 621.791.754'293:669.14.018.295

RESEARCH OF THE STRUCTURE, MECHANICAL, AND CORROSION PROPERTIES OF WELDED JOINT METALS PERFORMED WITH 08Kh16N5M3AB MARTENSITIC-AUSTENITIC MATERIALS

V.V. GEZHA, Cand. Sc. (Eng), N.A. MOGILNIKOVA, P.V. MELNIKOV, Cand. Sc. (Eng)
NRC “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometey”
49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: npk3@crism.ru

Received November 10, 2025

Revised November 17, 2025

Accepted November 24, 2025

Abstract—The paper studies the structure, mechanical, and corrosion properties of welded joint metals performed by argon-arc welding with a tungsten non-consumable electrode, manual arc welding with coated electrodes, and mechanized welding in a mixed gas using 08Kh16N5M3AB martensitic-austenitic materials

Keywords: martensitic-austenitic structure, high-strength steels, tungsten arc welding (TIG), manual arc welding with a coated electrode (MMA), mechanized welding in a mixture of gases (MAG)

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-129-136

REFERENCES

1. Andreev, S.B., Golovchenko, V.S., Gorbach, V.D., Russo, V.L., *Osnovy svarki sudovykh konstruktsiy* [Fundamentals of welding ship structures], St Petersburg: Sudostroenie, 2006.
2. *Svarka i svarivaemye materialy. V. 1: Svarivaemost materialov* [Welding and Welding Materials: V. 1. Material Welding]: reference book, Volchenko V.M., E. L. Makarov (Eds.), Moscow: Metallurgiya, 1991.
3. Lippold, J.C., Juhas, M.C., Dalder, E.N.C., The relationship between microstructure and fracture behavior of fully austenitic type 316L weld filler materials at 4.2 K, *Metallurgical Transactions A*, 1985, V. 16, pp. 1835–1848.
4. David, S.A., Goodwin, G.M., Braski, D.N., Solidification behavior of austenitic stainless steel filler metals, *Welding Journal*, 1979, No 58 (11), pp. 330–336.
5. Arata, Y., Matsuda, F., Katayama S. Solidification Crack Susceptibility in Weld Metals of Fully Austenitic Stainless Steels (Report 1): Fundamental Investigation on Solidification Behavior of Fully Austenitic and Duplex Microstructures and Effect of Ferrite on Microsegregation, *Transactions of JWRI*, 1976, V. 5(2), p. 135.
6. Mushnikova, S.Yu., Blinov, V.M., Kalinin, G.Yu., Kostina, M.V., Popov, V.I., Kharkov, A.A. Effect of nitrogen on corrosion-resistance and mechanical properties of steel with nitrogen martensite structure, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2003, No 4, pp. 84–92.
7. Lippold, D., Kotecki, D., *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel*. URL: https://www.researchgate.net/publication/234342523_Welding_Metallurgy_and_Weldability_of_Stainless_Steel (reference date 12/03/2026)
8. *Svarka i svarivaemye materialy. V. 2/3: Tekhnologiya i oborudovanie* [Welding and weldable materials. V. 2/3: Technology and equipment], Volchenko V.N., Makarov E.L. (Eds.), Moscow: Metallurgiya, 1996.
9. Azbukin, V.G., Bashaeva, E.N., Meshcheryakova, T.N., et al., Povyshenie strukturnoi stabilnosti martensitnoi stali s reguliruemym a->y prevrashcheniem pri otpuske [Increasing the structural stability of martensitic steel with controlled a->y transformation during tempering], *MiTOM*, 1982, No 9, pp. 10–13.
10. Lukin, V.I., Kovalchuk, V.G., Golev, E.V., Khodakova, E.A., *Svarka vysokoprochnykh korroziionno-stoikikh staley* [Welding of high-strength corrosion-resistant steels], *Trudy VIAM*, 2015, No 5, pp. 20–28.
11. Eichelman, G.H., Hull, F.C., The effect of composition on the temperature of spontaneous transformation of austenite to martensite in 18-8-type stainless steel, *Transactions of the American Society for Metals*, 1953, V. 45, pp. 77–104.
12. Kotecki, D.J., *Weld Dilution and Martensite Appearance in Dissimilar Metal Joining*, International Institute of Welding Document II-1438-01, American Council of the International Institute of Welding, Miami, 2001.
13. Lazko, V.E., Lukin, V.I., Maksimovich, T.L., Osobennosti svarki vysokoprochnykh korroziionno-stoikikh staley bolshoi tolshchiny v termouprochnennom sostoyanii [Features of welding

high-strength corrosion-resistant steels of large thickness in a thermo-hardened state], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2001, No 11, pp. 3–6.

UDC 621.791.14:[669.141.24+669.15–194.56]

INFLUENCE OF THE POWER PARAMETER OF ROTARY FRICTION WELDING ON THE STRENGTH PROPERTIES

OF THE DISSIMILAR JOINT FROM 32G2 AND 10Kh11N23T3MR STEELS

Ya.S. SEMKA^{1,2}, E.Yu. PRIYMAK^{1,2}, Cand. Sc. (Eng), I.L. YAKOVLEVA³, Dr Sc. (Eng),
V.A. TRUSHOV^{1,2}, S.V. KAMENEV¹, Cand. Sc. (Eng)

¹ *Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, 460018 Orenburg, Russian Federation.*

E-mail: elena-pijmak@yandex.ru

² *Drill Industries, 118 Pobedy Ave, 460026 Orenburg, Russian Federation*

³ *Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St, 620990 Ekaterinburg, Russian Federation*

Received October 8, 2025

Revised October 15, 2025

Accepted October 27, 2025

Abstract—The study determined the tensile strength properties of welded joints made of 32G2 carbon steel and 10Kh11N23T3MR austenitic stainless steel. The rotary friction welding process of workpieces (73 mm in diameter and 12 mm in wall thickness) varied the friction force. The results showed that the optimal strength and plasticity characteristics of the 32G2–10Kh11N23T3MR welded joint are achieved with the lowest friction force (70 kN), with other welding parameters remaining constant (forging force of 280 kN, rotation speed of 800 rpm, friction upset of 6 mm). Increasing the friction force to 140 kN and 210 kN leads to brittle fracture along the weld joint with minimal plastic deformation. Additional metallographic and fractographic analysis using scanning electron microscopy showed that the reason for the decrease in strength and ductility in such cases is the formation of an extended carbide phase (Ti,V)C along the contact zone of the steels, which contributes to embrittlement.

Keywords: rotary friction welding, dissimilar joint, welded joint, microstructure, mechanical properties, mating zone, titanium carbides

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-137-146

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No 25-29-00333. URL: <https://rscf.ru/en/project/25-29-00333/>

REFERENCES

1. Martinsen, K., Hu, S.J, Carlson, B.E., Joining of dissimilar materials, *CIRP Ann.*, 2015, Is. 2, No 64, pp. 679–699.
2. Vil, V.I., *Svarka metallov treniyem* [Friction welding of metals], Moscow: Mashinostroenie, 1970.
3. Lebedev, V.K., et al., *Svarka treniem* [Friction welding]: Handbook, Leningrad: Mashinostroenie, 1987.

4. Kurt, A., Uygur, I., Paylasan, U., Effect of Friction Welding Parameters on Mechanical and Microstructural Properties of Dissimilar AISI 1010-ASTMB22 Joints, *Welding Journal*, 2011, No 90, pp. 102–106.
5. Li, P., Li, J., Salman, M., Liang, L., Xiong, J., Zhang, F., Effect of Friction Time on Mechanical and Metallurgical Properties of Continuous Drive Friction Welded Ti6Al4V/SUS321 Joints, *Materials and Design*, 2014, No 56, pp. 649–656.
6. Tokarev, A.S., Issledovanie ekspluatatsionnykh kharakteristik kombinirovannykh soedineniy iz stali 10Kh17N13M2T, poluchennykh po razlichnym tekhnologiyam [Study of the operational characteristics of combined joints made of 10Kh17N13M2T steel obtained by various technologies], *Neftegazovoe delo*, 2022, V. 20, No 6, pp. 206–212. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-6-206-212.
7. Zavodov, S.A., Polyakov, A.N., Pavlov, L.A., Shatul'sky, A.A., Razrabotka tekhnologii rotatsionnoy svarki treniem dlya izgotovleniya detali rotor [Development of a technology for rotational friction welding for the manufacture of a rotor part], *Vestnik RGATA imeni P. A. Solovieva*, 2023, No 2 (65), pp. 126–131.
8. Bakradze, M.M., Sviridov, A.V., Ovsepyan S.V., et al., Osobennosti rotatsionnoy svarki treniem granuliruemykh i deformiruemykh zharoprochnykh nikelovykh splavov [Features of rotational friction welding of granulated and deformable heat-resistant nickel alloys], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2022, No 10, pp. 21–27.
9. Samorukov, M. L. Sviridov, A.V., Rassokhina, L.I., Bityut'skaya, O.N., Rotatsionnaya svarka treniem litykh i deformiruemykh polufabrikatov zharoprochnogo nikelovogo splava vzh159 [Rotary friction welding of cast and deformed semi-finished products of heat-resistant nickel alloy vzh159], *Trudy VIAM*, 2020, No 1 (85), pp. 15–23, DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-1-15-23.
10. Brovko, V.V., Primenenie pressovykh metodov svarki dlya soedineniy trub iz vysokolegirovannoy stali [Application of press welding methods for joining pipes made of high-alloy steel], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2018, No 7–8, pp. 40–43.

UDC 621.791.754'293:669.15–194.56

TECHNOLOGICAL ASPECTS AND FEATURES OF AUTOMATIC ARGON-ARC WELDING OF TUBE SHEETS OF AUSTENITIC STEELS

S.V. GUBA, E.S. TSARKOV, I.G. BORDYUZHIN

NIKIMT (Scientific Research and Design Institute of Installation Technology) – Atomstroy, 43, bld. 2 Altufievskoe highway, 127410 Moscow, Russian Federation.

E-mail: GubaSV@atomrus.ru

Received October 27, 2025

Revised October 31, 2025

Accepted December 11, 2025

Abstract—This paper presents a newly developed method for multi-pass automatic argon-arc welding of small-diameter (up to 20 mm) pipes with wall thicknesses up to 4 mm into buried tube sheets made of austenitic steels. It has been shown that by using remotely controlled equipment, standard welding materials, and optimal welding parameters, it is possible to ensure high-quality welded joints that meet the requirements of the nuclear industry, where welding of small-diameter

pipes in confined and hard-to-reach spaces is especially necessary with increased demands on the quality of the weld.

Keywords: automatic argon-arc welding, tube sheet, tungsten electrode, weld seam, reactor plant with liquid metal coolant

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-147-156

REFERENCES

1. Ryzhov, S.B., Zubchenko, A.S., Stepanov, V.S., Klimov, N.N., et al., *Konstruktsionnye materialy elementov aktivnoi zony i pervogo kontura reaktornoj ustanovki SVBR-100* [Structural materials of the core elements and the first circuit of the SBR-100 reactor unit], *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Obespechenie bezopasnosti AES*, 2009, Is. 24, pp. 123–131.
2. Kakhovsky, N.I., Fartushny, V.G., Yushchenko, K.A., *Elektrodugovaya svarka staley* [Electric arc welding of steels]: reference book, 1975.
3. Nosov, S.I., Alekseyonok, P.A., Gudenko, A.S., Zmienko, D.S., *Termicheskaya stabilnost austenitno-ferritnykh Cr–Ni–Nb svarynykh shvov, dopolnitelno legirovannykh kremniem* [Thermal stability of austenitic-ferritic Cr–Ni–Nb welds additionally alloyed with silicon], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2013, No 3, pp. 22–26.
4. Runov, A.E., *Issledovanie sklonnosti k obrazovaniyu goryachikh treshchin khromonikelevoi austenitnoi i austenitno-ferritnoi staley* [Study of the susceptibility of chromium-nickel austenitic and austenitic-ferritic steels to hot cracking], *Svarochnoe proizvodstvo*, 1971.
5. Sourmail, T., *Precipitation in creep resistant austenitic stainless steels*, *Materials Science and Technology*, 2001, V. 17 (1), pp. 1–14.
6. Patent SU No 897444, IPC B 23 K 31/06: *Sposob vvarki trub v trubnuyu dosku* [Method of welding pipes into a tube sheet], Publ. on January 15, 1982.
7. Russian Federation Patent No RU 2586176C2, IPC B 23 K 37/04, *Sposob soedineniya paketa trub s trubnymi reshetkami i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for connecting a package of pipes to tube sheets and a device for implementing it], Publ. on June 10, 2016.
8. Chinese Patent No CN 107150183A: *Full-automatic tube-tube plate welding device and the detection for the device and welding method*, Publ. on September 12, 2017.
9. NP-107-21: *Pravila ustroystva i bezopasnoi ekspluatatsii korpusa bloka reaktornogo, oborudovaniya, truboprovodov i vnutrikorpusnykh ustroystv yadernoi energeticheskoi ustanovki so svintsovyim teplonositelem* [Rules for the design and safe operation of the reactor unit housing, equipment, pipelines, and internal devices of a nuclear power plant with lead coolant], Moscow: Federalnaya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru, 2021.
10. Patent RF № RU 2847901C1: *Sposob mnogoprokhodnoy avtomaticheskoy argonodugovoy svarki trub v zaglublionnuyu trubnuyu reshetku iz korrozionno-stoykoy stali austenitnogo klassa bez oplavleniya tortsov trub* [A method of multi-pass automatic argon-arc welding of pipes into a buried tube sheet made of corrosion-resistant austenitic steel without melting the ends of the pipes], Publ. on October 15, 2025.

UDC 621.791.052:620.17

PROMISING APPROACHES TO IMPROVING THE OPERABILITY OF WELDED JOINTS

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

Received October 20, 2025

Revised November 13, 2025

Accepted December 17, 2025

Abstract—The article presents the results of research aimed at improving the performance of welded joints. A relationship was established between various levels of welded joint data (welding mode, formed structure, basic and special mechanical properties). The results made it possible to link these data at different levels, making it possible, in the absence of the necessary information, to refine it on the basis of the available information at another level, as well as to expand the scope and increase the significance of actual welded joint data that can be obtained during its operation. Furthermore, the mechanical heterogeneity of the weld metal was studied. Comprehensive experimental studies included mechanical testing of various zones of the weld metal using miniature specimens. The results were correlated with those of tests conducted using standard methods, allowing for the study of metal properties in defective zones, structures with complex geometries, various zones of welded joints, etc. It was established that the metal of the studied longitudinal welds of main oil pipelines does not exhibit pronounced mechanical heterogeneity.

Keywords: welded joint, welded seam, thermal welding cycle, structure of the welded joint, prediction of mechanical characteristics, cracks in the seam metal, seam metal heterogeneity, miniature samples

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-157-171

REFERENCES

1. Idrisov, R.Kh., Idrisov, K.R., Kormakov, D.S., Analiz avariynosti magistralnykh truboprovodov Rossii [Analysis of the accident rate of main pipelines in Russia], *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya*, 2019, No 2, pp. 44–46.
2. Aladinsky, V.V., Melnikova, A.V., Formirovanie trebovaniy k geometrii i svoistvam svarnykh soedineniy trub, obespechivayushchikh nadezhnost truboprovodov [Formulation of requirements for the geometry and properties of welded pipe joints ensuring pipeline reliability], *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*, 2009, No 4 (40), pp. 43–48.
3. Golikov, N.I., Ammosov, A.P., *Prochnost svarnykh soedineniy rezervuarov i truboprovodov, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh Severa* [Strength of welded joints of tanks and pipelines operating in northern conditions], Yakutsk: Izdatelsky dom Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta, 2012.
4. Zorin, A.E., Vremenko, A.V., Kolesnikov, O.I., Goncharov, N.G., Yushin, A.A., Skorniyakov, A.A., Razrabotka empiricheskoy modeli prognozirovaniya mekhanicheskikh kharakteristik metalla svarnykh soedineniy dlya otsenki ikh rabotosposobnosti v protsesse ekspluatatsii nefteprovodov i rezervuarov [Development of an empirical model for predicting the mechanical properties of welded joint metal to assess their performance during operation of oil pipelines and storage tanks], *Neftyanoye khozyaystvo*, 2021, No 7, pp. 138–144.
5. Makarov, E.L., Yakushin, B.F., *Teoriya svarivaemosti staley i splavov* [Theory of weldability of steels and alloys], Moscow: Izd-vo MG TU im. N.E. Baumana, 2014.
6. GOST 1497-84: *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie* [Metals. Tensile testing methods].

7. GOST 9454-78: *Metally. Metod ispytaniy na udarnyy izgib pri ponizhennoy, komnatnoy i povyshennykh temperaturakh* [Metals. Impact bending test method at low, room, and elevated temperatures].
8. *Spravochnik po koeffitsientam intensivnosti napryazheniy* [Handbook of Stress Intensity Factors]: Translated from English; Ed. by Yu. Murakami, Moscow: Mir, 1990, 2 vols.
9. Savkin, A.N., Andronik, A.V., Koraddi, R., Metodika opredeleniya koeffitsientov uravne-niya skorosti rosta treshchiny pri tsiklicheskom nagruzhenii [Methodology for determining the coefficients of the crack growth rate equation under cyclic loading], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2016, V. 82, No 1, pp. 57–63.
10. Mamontov, V.A., Kuzhakhmetov, T.A., Iksanov, R.U., Van Tin, D., Postroenie diagrammy ustalostnogo razrusheniya modeley sudovykh valov [Construction of a fatigue failure diagram for ship shaft models], *Vestnik AGTU*, 2008, № 5 (46), pp. 44–49.
11. GOST 5639-82: *Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna* [Steels and Alloys. Methods for Detecting and Determining Grain Size].
12. GOST 5640-2020: *Stal. Metallografichesky metod otsenki mikrostruktury prokata stalnogo ploskogo* [Steel. Metallographic method for assessing the microstructure of flat rolled steel products].
13. GOST 8233-56: *Stal. Etalony mikrostruktury* [Steel. Microstructure Standards].
14. Okerblom, N.O., Demyantsevich, V.P., Baykova, I.P., *Proektirovanie tekhnologii izgotovleniya svarnykh konstruksiy* [Design of Manufacturing Technology for Welded Structures]. Leningrad: Sudprom GIZ, 1963.
15. Kolganov, L.A., *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], Rostov-na-Donu: Feniks, 2002.
16. Lupachev, V.G., *Ruchnaya dugovaya svarka* [Manual arc welding], Moscow: Vysshaya shkola, 2010.
17. Vinogradov, V.S., *Oborudovanie i tekhnologiya dugovoy avtomaticheskoy i mekhanizirovannoy svarki* [Equipment and technology of automatic and mechanized arc welding], Moscow: Akademiya, 2001.
18. Zorin, A.E., Analiz strukturnykh i termicheskikh protsessov pri svarke (dlya optimizatsii tekhnologii vyrezki koltsevykh svarnykh soedineniy truboprovodov) [Analysis of structural and thermal processes during welding (to optimize the technology of cutting circumferential welded joints of pipelines)], *Neft, gaz i biznes*, 2011, No 6, pp. 67–70.
19. Zorin, A.E., Derkach, D.V., Shermatov, D.N., Kadyrov, R.O., Zorin, E.E., Issledovanie mekhanicheskoy neodnorodnosti metalla shva s ispolzovaniem miniatiurnykh obraztsov [Study of mechanical heterogeneity of weld metal using miniature samples], *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*, 2025, V. 15, No 3, pp. 242–251.
20. Khasanov, R.N., Gafarova, V.A., Pivovarov, V.Yu., Kuzeev, I.R., Osobennosti razrusheniya tonkikh stalnykh obraztsov pri rastyazhenii [Features of fracture of thin steel specimens under tension], *Neftegazovoe delo*, 2019, No 2, pp. 94–111.
21. Volkov, I.A., Igumnov, L.A., Shishulin, D.N., Tarasov, I.S., Guseva, M.A., Otsenka ustalostnoy dolgovechnosti kompaktnogo obraztsa s kontsentratorami pri termotsiklicheskom nagruzhenii v usloviyakh neodnorodnogo napryazhennogo sostoyaniya [Evaluation of fatigue life of a compact specimen with concentrators under thermal cycling loading under conditions of a non-uniform stress state], *Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2016, V. 78, No 3, pp. 333–349.

22. Samigullina, L.G., *Razrabotka metoda otsenki ostatochnogo resursa neftegazoprovodov na osnove ispytaniy mikroobraztsov*: thesis for Cand. of Sc: 25.00.19 [Development of a method for assessing the residual life of oil and gas pipelines based on testing microspecimens], St Petersburg, 2020.
23. Rakhimkulov, R.R., *Sopostavlenie znacheniy velichiny vyazkosti razrusheniya KIs, poluchennoy na obraztsakh s shevronnoy prorezkoy i po standartnoy metodike dlya stali St3sp* [Comparison of the values of fracture toughness K_{Ic} obtained on samples with chevron notches and according to the standard method for steel St3sp], *Neftegazovoe delo*, 2010, No 2, pp. 59–64.
24. BS CWA 15627-2007: *Small punch test method for metallic materials*.
25. GOST 25.506-85: *Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhenii*. [Strength calculations and tests. Methods of mechanical testing of metals. Determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading].
26. ASTM E 1304-97 (2020): *Standard test method for plane-stain (chevron-notch) fracture toughness of metallic material*.

UDC 621.791.016:620.171.32–974

**ON THE ISSUE OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF INSTALLATION AND REPAIR
TECHNOLOGIES OF CRITICAL STRUCTURES OPERATING IN THE CONDITIONS OF LOW
TEMPERATURES OF THE NORTH**

Yu.N. SARAEV¹, Dr Sc. (Eng), N.I. GOLIKOV¹, Dr Sc. (Eng), P.S. DMITRIEV¹, S.V. SEMENOV¹,
S.A. SHTOKOLOV², D.V. ZAVARYKIN²

¹ *Institute of Physical and Technical Issues of the North named after V.P. Larionov, a separate division of the Federal Research Center “Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, 1 Oktyabrskaya St, 677980 Yakutsk, Russian Federation. E-mail: saraev.7s@yandex.ru*

² *VELDNOVA Group of Companies, 155/2 Krasnaya St, 350020, Krasnodar, Russian Federation*

Received August 15, 2025

Revised October 31, 2025

Accepted December 4, 2025

Abstract—The material presented in this article is a continuation of research aimed at finding ways to improve the efficiency of installation and repair technologies for critical structures operating in the low climatic temperatures of the North. (See the article by Yu.N. Saraev, V.D. Gorbach, and N.I. Golikov, “Methodology for Improving Manufacturing and Repair Technologies for Ship Structures Based on the Integrated Application of Modern Technologies, Power Sources, and Welding Materials,” published in the journal “Voprosy Materialovedeniya” 2025, No 1, pp. 135–151.)

New results were obtained through the development of methods for adaptive pulse control of heat and mass transfer characteristics, achieved through complete control of the “power source – arc – weld pool – workpiece” system under various disturbances. The article presents the results of research into a new generation of domestically produced welding and surfacing electrodes. The presented concept does not cover all the numerous examples aimed at ensuring the operational reliability of structures in the North, but it does allow us to illustrate one of the few effective options for an integrated approach to solving these problems.

Keywords: welding, surfacing, heat and mass transfer, melting, crystallization, structure, properties, low climatic temperatures, adaptive pulse technologies

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-172-182

ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by the Federal Budget, project FWRS-2024-0034, and a cooperation agreement between the Institute of Physics and Technology of the Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, and the Veldnova Group of Companies, Krasnodar.

REFERENCES

1. Sleptsov, O.I., et al., *Tekhnologicheskaya prochnost svarnykh soedineniy pri nizkikh temperaturakh* [Technological Strength of Welded Joints at Low Temperatures], Ed. V.P. Larionov; USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Yakut Branch, Institute of Physical and Technical Problems of the North. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1984.
2. Saraev, Yu.N., Gladkovsky, S.V., Golikov, N.I., et al., Poiskovye issledovaniya povysheniya nadezhnosti metallokonstruktsiy otvetstvennogo naznacheniya, rabotayushchikh v usloviyakh ekstremalnykh nagruzok i nizkikh klimaticheskikh temperatur [Exploratory Research to Improve the Reliability of Critical-Purpose Metal Structures Operating under Extreme Loads and Low Climatic Temperatures], *Naukoyemkie tekhnologii v proyektakh RNF: Sibir*, Tomsk, 2017, pp. 134–202.
3. Kashchenko, D.A., Brusnitsyn, Yu.D., Baranov, A. V., et al., Razrabotka elektrodov dlya svarki magistralnykh truboprovodov i morskoy tekhniki iz vysokoprochnykh nizkolegirovannykh khladostoykikh staley [Development of electrodes for welding main pipelines and marine equipment from high-strength low-alloy cold-resistant steels], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2017, No 2, pp. 21–29.
4. Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., et al., Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, V. 124, pp. 504–516.
5. Saraev, Yu.N., Gorbach, V.D., Golikov, N.I., Metodologiya sovershenstvovaniya tekhnologiy proizvodstva i remonta sudovykh konstruktsiy na osnove kompleksnogo primeneniya sovremennykh tekhnologiy, istochnikov pitaniya i svarochnykh materialov [Methodology for improving production and repair technologies for ship structures based on the integrated use of modern technologies, power sources and welding materials], *Voprosy Materialovedeniya*, 2025, No 1 (121), pp. 135–151.
6. Saraev, Yu.N., Poletika, I.M., Kozlov, A.V., Khomchenko, E.G., Formirovanie struktury i svoystv svarnykh soedineniy v usloviyakh reguliruemogo teplovlozheniya pri impulsno-dugovoy svarke [Formation of the structure and properties of welded joints under conditions of controlled heat input during pulsed arc welding], *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2005, V. 8, No 5, pp. 137–140.
7. Sidorov, M.M., Golikov, N.I., Saraev, Yu.N., Tikhonov, R.P., Upravlenie urovnem ostatochnykh napryazheniy v stykovykh soedineniyakh trub iz nizkolegirovannykh staley udarnomekhanicheskoy obrabotkoy [Control of the level of residual stresses in butt joints of pipes made of low-alloy steels by impact-mechanical processing], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2023, No 10, pp. 23–28.

8. Kalinnikov V.T., Rybin V.V., Malyshevsky V.A., et al., Perspektivy ispolzovaniya mineralnogo i tekhnogennogo syrya Murmanskoy oblasti dlya proizvodstva svarochnykh materialov i flyusov [Prospects for the use of mineral and man-made raw materials of the murmansk region for the production of welding materials and fluxes], *Voprosy Materialovedeniya*, 2009, No 3 (59), pp. 409–414.
9. Saraev, Yu.N., Lunev, A.G., Semenchuk, V.M., Nepomnyashchy, A.S., Kineticheskie osobennosti teplomassoperenosa v usloviyakh svarki i naplavki [Kinetic Features of Heat and Mass Transfer under Welding and Surfacing Conditions], *Izvestiya Vuzov. Fizika*, 2019, V. 62, No 9 (741), pp. 34–40.
10. Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., et al., Numerical Analysis of Heat Transfer and Fluid Flow in Multilayer Deposition of PAW-Based Wire and Arc Additive Manufacturing, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, V. 124, pp. 504–516.
11. Li, Y., Su, Ch., Zhu, J., et al., Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects, *Results in Engineering*, 2022, V. 13, pp. 100330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>
12. Saraev, Yu.N., Lunev, A.G., Kiselev, A.S., Gordynets, A.S., Trigub, M.V., Kompleks dlya issledovaniya protsessov teplomassoperenosa pri dugovoy svarke [Complex for studying heat and mass transfer processes in arc welding], *Avtomaticeskaya svarka*, 2018, No 8, pp. 1–8.
13. Cheng, Y., Wang, Q., Jiao, W., et al., Detecting dynamic development of weld pool using machine learning from innovative composite images for adaptive welding, *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, V. 56, Part A, pp. 908–915. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.059>
14. Yang, D., Wang, G., Zhang, G., Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography, *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, V. 244, pp. 215–224. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec>
15. Wu, K., Ding, N., Yin, T., Zeng, M., et al., Effects of single and double pulses on microstructure and mechanical properties of weld joints during high-power double-wire GMAW, *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, V. 35, pp. 728–734.
16. Saraev, Yu.N., Lunev, A.G., Perovskaya, M.V., Semenchuk, V.M., Gladkovsky, S.V., Features of formation of structure and physical and mechanical properties of permanent welded joints of low-alloy steels by methods of adaptive pulse control of energy parameters of welding mode, *Materials Science Forum*, 2018, V. 938, pp. 124–131.
17. Saraev, Yu.N., Adaptive pulse technological processes of welding and pad welding is a new high-performance method of obtaining permanent joints of high-strength steels, *World J. Engineering*, 2011, V. 8, pp. 989.
18. Scotti, F.M., Teixeira, F.R., da Silva, L.J., et al., Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique, *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, V. 57, pp. 23–35. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024>
19. Liu, C., Bhole, S.D., Challenges and developments in pipeline weldability and mechanical properties, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, V. 18, Is. 2, pp. 169–181.
20. Volkov, S.S., Konovalov, A.V., Shestel, L.A., Research of the Possibility of Using Ultrasonic Treatment to Reduce Residual Stresses and Strains in Welded Joints, *Izvestiya Vuzov*.

Mashinostroenie, 2020, No 2 (719), pp. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-2-3-10>

21. Sleptsov, O. I., Mikhailov, V.E., Petushkov, V.G., et al., *Povysheniye prochnosti svarykh konstruktsey dlya Severa* [Increasing the strength of welded structures for the North], Novosibirsk: Nauka, 1989.

UDC 621.791.011:621.9.048.6

SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF THE USE OF ULTRASONIC IMPACT TREATMENT FOR RESIDUAL STRESS MANAGEMENT AND ENSURING THE DURABILITY OF WELDED JOINTS OF THE NORTHERN DESIGN

M.M. SIDOROV¹, Cand. Sc. (Eng), A.Yu. MIKHAILOV^{1,2}

¹ *Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov of the Siberian Branch, RAS – a separate division of the Yakut Scientific Center SB RAS, Oktyabrskaya St, 677980 Yakutsk, Russian Federation. E-mail: sidorovmm@bk.ru@bk.ru*

² *North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, 58 Belinskogo St, 677000 Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation*

Received November 5, 2025

Revised December 4, 2025

Accepted December 9, 2025

The efficiency of ultrasonic impact treatment (UIT) for controlling residual stresses in welded joints made of low-alloy steel 10KhSND-3 obtained by welding at room and negative (-35°C) temperatures is studied. The methodology included manual arc welding with UIT in various power modes (340, 420 and 500 W), applied both in the hot state and after the joint has completely cooled down. Residual stresses were measured by X-ray method. It is established that the UIT transforms tensile residual stresses into compressive ones. The most effective method is the post-welding treatment of a fully cooled welded joint at a power of 500 W, which provides the formation of compressive stresses up to 337 MPa. The results are applicable for increasing the durability of welded metal structures of northern and Arctic design.

Keywords: welded joints, post-welding treatment, low-alloy steel, residual welding stresses, ultra-sonic impact treatment

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-183-192

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under a state assignment from the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project code FWRS-2024-0034, registration number NIOKTR 124032600078-1.

The authors would like to thank their team from the Welding and Metallurgy Technology Department for their assistance in preparing weld samples and conducting the experiment.

REFERENCES

1. Golikov, N.I., *Ostatochnyye napryazheniya pri svarke konstruktsey v usloviyakh nizkikh klimaticheskikh temperatur* [Residual stresses in structural welding at low climatic temperatures], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2018, No 11, pp. 31–34.
2. Kuliev, V.D., Bakumenko, N.A., Konstantinova, N.E., Gudkova, N.N., *Vliyanie ostatochnykh napryazheniy na prochnost i dolgovechnost svarykh elementov konstruktsey*

- [Influence of residual stresses on the strength and durability of welded structural elements], *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2006, No 2, pp. 56–59.
3. Palaev, A.G., Krasnikov, A.A., Analiz prichin vozniknoveniya ostatochnykh svarochnykh napryazheniy i metodov ikh vyyavleniya i snizheniya [Analysis of the causes of residual welding stresses and methods for their detection and reduction], *Territoriya Neftegaz*, 2023, No 11–12, pp. 72–85.
 4. Prokopiev, L.A., Golikov, N.I., Saraev, Yu.N., Razvitie treshchin v pole ostatochnykh napryazheniy svarnykh soedineniy truboprovodov, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh kholodnogo klimata [Development of cracks in the field of residual stresses in welded joints of pipelines operated under cold climate conditions], *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2024, No 5, pp. 159–169. DOI 10.17804/2410-9908.2024.5.159-169.
 5. Leonov, V.P., Mizetsky, A.V., Vliyanie lokalnykh ostatochnykh svarochnykh napryazheniy na nachalnuyu stadiyu razvitiya treshchin v svarnykh soedineniyakh [Influence of local residual welding stresses on the initial stage of crack development in welded joints], *Voprosy Materialovedeniya*, 2008, No 4 (56), pp. 54–65.
 6. Yoshitani, N., Optimal Control of Steel Strip Temperature in Continuous Annealing Processes, *Materials Science and Engineering Serving Society*, 1998, pp. 303–308. DOI: 10.1016/B978-044482793-7/50069-2.
 7. Zhi, M., Xiaohong, P., Research and Application on Two-Stage Fuzzy Temperature Control System for Industrial Heating Furnace, *Journal of Computers*, 2009, No 7(2), pp. 756–759. DOI:10.1109/ICICTA.2009.418
 8. Hazel Br., Boudreault E., Côté J., Godin S. Robotic post-weld heat treatment for in situ repair of stainless-steel turbine runners, *Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, CARPI – 2014*. DOI:10.1109/CARPI.2014.7030051.
 9. Novikov, I.A., Nozhnitsky, Yu.A., Shibaev, S.A., Mirovoi opyt v issledovanii i primenenii tekhnologicheskogo protsessa lazernoi udarnoi obrabotki metallov [World experience in the study and application of the technological process of laser impact treatment of metals]: review, *Aviatsionnye dvigateli*, 2022, No 2 (15), pp. 59–82. DOI 10.54349/26586061_2022_1_59
 10. Ponomarev K.E., Strelnikov I.V., Antonov A.A., Kapustin O.E. Analiz razlichnykh vidov vibratsionnoi obrabotki aluminum svarnykh konstruksii [Analysis of various types of vibration treatment of aluminum welded structures], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2021, No 2, pp. 45–49. DOI 10.34641/SP.2021.1035.2.007.
 11. Pandya, N.M., Kalyankar, V.D., Naik, H.V., Influence of Post-Welding Heat Treatment on the Impact Toughness of Welded Joints of P91 Steel, *Metal Science and Heat Treatment*, 2021, V. 63, No 5–6, pp. 269–279. DOI 10.1007/s11041-021-00682-w.
 12. Gorbach, V.D., Mikhailov, V.S., Poverkhnostnoe uprochnenie svarnykh soedineniy s tselyu povysheniya korrozionno-ustalostnoy dolgovechnosti sudovykh konstruksiy [Surface hardening of welded joints to improve the corrosion-fatigue durability of ship structures], *Sudostroenie*, 2000, No 4(731), pp. 45–48.
 13. Makarov, V.F., Beloborodov, V.S., Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti detaley GTD metodami uprochnyayushchey obrabotki [Improving the reliability and durability of GTE parts by hardening treatment methods], *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2020, V. 16, No 1(181), pp. 9–14.

14. Blyumin, A.A., Pazikov, A.A., Borkin, P.I., Shevchenko, V.G., Opyt induktsionnoy termicheskoy obrabotki svarynykh soedineniy truboprovodov iz austenitnoy stali v sostave ekspluatiruyemogo obo-rudovaniya [Experience of induction heat treatment of welded joints of pipelines made of austenitic steel as part of the operated equipment], *Induktsionny nagrev*, 2008, No 4(6), pp. 20–26.
15. Rezanov, V.A., Fedin, V.M., Bashlykov, A.V., et al., Differential hardening of welded rail joints, *VNIIZhT Bulletin (Railway Research Institute Bulletin)*, 2013, No 2, pp. 32–36.
16. Sleptsov, O.I., Shulginov, B.S., Mikhailov, V.E., et al., *Povyshenie prochnosti svarynykh metallokonstruktsiy gornodobyvayushchey i transportnoy tekhniki v usloviyakh Severa* [Improving the strength of welded metal structures of mining and transport equipment in the North], Novosibirsk: Nauka, 2012.
17. Saraev, Yu.N., Kamantsev, I.S., Grigorieva, A.A., et al., Chislennaya otsenka ustalostnogo razrusheniya svarynykh soyedineniy, poluchennykh dugovoy svarkoy s upravlyayemym i neupravlyayemym teplovlozheniyem i udarno-mekhanicheskoy obrabotkoy [Numerical evaluation of fatigue failure of welded joints obtained by arc welding with controlled and uncontrolled heat input and shock-mechanical processing], *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2020, V. 8, No 4, pp. 162–170.
18. Antonov, A.A., Letunovsky, A.P., Snizhenie ostatochnykh svarochnykh napryazheniy metodom ul'trazvukovoy udarnoy obrabotki [Reduction of residual welding stresses by ultrasonic impact treatment], *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika*, 2012, No 2 (30), pp. 21–26.
19. Lobanov, L.M., Kiryan, V.I., Knysh, V.V., Prokopienko, G.I., Povyshenie soprotivleniya ustalosti svarynykh soedineniy metallokonstruktsiy vysokochastotnoy mekhanicheskoy prokovkoy [Improving the fatigue resistance of welded joints of metal structures by high-frequency mechanical forging]: review, *Avtomaticeskaya svarka*, 2006, No 9, pp. 3–11.
20. Pichugin, S.S., Shitikov, V.S., Golovkov, A.N., Nerazrushayushchie metody otsenki ostatochnykh napryazheniy [Nondestructive Methods for Residual Stress Assessment], *Trudy VIAM*, 2024, No 1(131), pp.101–112. URL: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112>.
21. Sidorov, M.M., *Vliyanie ultrazvukovoy udarnoy obrabotki na mekhanicheskie svoystva i pere-raspredelenie ostatochnykh napryazheniy svarynykh soedineniy truboprovodov, ekspluatiruemykh v usloviyakh Sibiri i Kraynego Severa* [Influence of ultrasonic impact treatment on mechanical properties and redistribution of residual stresses of welded joints of pipelines operated in Siberia and the Far North]: thesis for the degree of Cand. Sc (Eng), Yakutsk, 2014.
22. Sidorov, M.M., Golikov, N.I., Saraev, Yu.N., Tikhonov, R.P., Upravlenie urovnem ostatochnykh svarochnykh napryazheniy v stykovykh soedineniyakh trub iz nizkolegirovannykh staley udarno-mekhanicheskoy obrabotkoy [Control of the level of residual welding stresses in butt joints of low-alloy steel pipes by impact-mechanical processing], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2023, No 10, pp. 23–28.
23. Golikov, N.I., Sidorov, M.M., Investigation of the redistribution of residual stresses in cyclic loading of welded joints, *Welding International*, 2014, V. 28, No 12, pp. 970–972. DOI: 10.1080/09507116.2014.884328

**CONNECTING HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS:
SOLDER AND FLUX SELECTION (Review)**

I.I. PREOBRAZHENSKIY, Cand. Sc. (Chem), P.A. LUKYANOV,
S.V. SHAVKIN, Cand. Sc. (Phys-Math)

National Research Center “Kurchatov Institute”,

1 Akademika Kurchatova Sq, 123182 Moscow, Russian Federation. E-mail: preo.ilya@yandex.ru

Received May 4, 2025

Revised August 11, 2025

Accepted September 4, 2025

Abstract—This article provides a review of solder and flux compositions that can be used to join tape wires based on high-temperature superconductors (HTSC). The phase diagrams of the most commonly used solders, both leaded and lead-free, are examined. The main solder application methods are discussed, including dipping HTSC-tape samples in molten solder, lap jointing with applied pressure, diffusion bonding using stabilizing silver layers, and induction heating. The selection of the chemical composition of the solders and fluxes, as well as the choice of soldering modes, significantly impact the properties of HTSC-tapes.

Keywords: high-temperature superconductors, solders, fluxes, tinning, critical current

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-193-223

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out as part of a state assignment for the Kurchatov Institute National Research Center.

REFERENCES

1. Park, Y., Lee, M., Ann, H., Choi, Y.H., Lee, H., A superconducting joint for $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ -coated conductors, *NPG Asia Materials*, 2014, No 6 (5), pp. e98–e98.
2. Kato, J., Sakai, N., Miyata, S., Konishi, M., Yamada, Y., Chikumoto, N., Nakao, K., Izumi, T., Shiohara, Y., Optimization of the diffusion joint process for the Ag layers of YBCO coated conductors, *Physica C: Superconductivity and its applications*, 2007, No 463, pp. 747–750.
3. Rudnev, I.A., Anishchenko, I.V., Physical principles of development of magneto-levitation systems based on the second generation high temperature superconducting composites, *Technical Physics*, 2024, No 69 (3), pp. 674–708.
4. Hartwig, Z.S., Vieira, R.F., Sorbom, B.N., Badcock, R.A., Bajko, M., Beck, W.K., Castaldo, B., Craighill, C.L., Davies, M., Zhou, L., VIPER: an industrially scalable high-current high-temperature superconductor cable, *Superconductor Science and Technology*, 2020, No 33 (11), p. 11LT01.
5. Munaretto, S., Kleiner, A., Churchill, R.M., Corona, D., Looby, T., d’Abusco, M.S., Wingen, A., Impact of error fields and error field correction on heat fluxes in SPARC, *Nuclear Fusion*, 2025, No 65 (4).
6. Polak, M., Zhang, W., Parrell, J., Cai, X.Y., Polyanskii, A., Hellstrom, E.E., Larbalestier, D.C., Majoros, M., Current transfer lengths and the origin of linear components in the volta-ge-current curves of Ag-sheathed BSCCO components, *Superconductor Science and Technology*, 1997, No 10 (10).
7. Chang, M.S., Salleh, M.M., Halin, D.S., A short review: Properties of superconducting solder, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, No 957 (1), Art. 012059.

8. Islam, R.A., Chan, Y.C., Jillek, W., Islam, S., Comparative study of wetting behavior and mechanical properties (microhardness) of Sn–Zn and Sn–Pb solders, *Microelectronics Journal*, 2006, No 37 (8), pp. 705–713.
9. Gokcen, N.A., The Bi–Pb (bismuth-lead) system, *Journal of phase equilibria*, 1992, No 13 (1), pp. 21–32.
10. Aksoy, C.A., Mousavi, T., Brittles, G., Grovenor, C.R., Speller, S.C., Lead-free solders for superconducting applications, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, No 26 (3), pp. 1–3.
11. Ye, L., Li, X., Zhang, M., Zhu, Q., Sun, X., Composition design, microstructure and mechanical properties of bismuth-doped In–Sn-based low-temperature solder alloy, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, No 35(19).
12. Matuszek, K., Kar, M., Pringle, J.M., MacFarlane, D.R., Phase change materials for renewable energy storage at intermediate temperatures, *Chemical reviews*, 2022, No 123 (1), pp. 491–514.
13. Ito, S., Aparicio, L.E., Atake, Y., Yamamoto, H., Onji, T., Tomita, M., Initial study on press welding with indium applied to high-temperature superconducting DC feeder cables, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2023, No 33 (5), pp. 1–5.
14. Tsui, Y., Surrey, E., Hampshire, D., Soldered joints – an essential component of demountable high temperature superconducting fusion magnets, *Superconductor Science and Technology*, 2016, No 29 (7).
15. Canavan, E.R., Leidecker, H., Panashchenko, L., Conductance degradation in HTS coated conductor solder joints, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, No 102 (1).
16. Liu, X.J., Inohana, Y., Takaku, Y., Ohnuma, I., Kainuma, R., Ishida, K., Moser, Z., Gasior, W., Pstrus, J., Experimental determination and thermodynamic calculation of the phase equilibria and surface tension in the Sn–Ag–In system, *Journal of electronic materials*, 2002, No 31, pp. 1139–1151.
17. Liu, Y.M., Chuang, T.H., Interfacial reactions between In₁₀Ag solders and Ag substrates, *Journal of electronic materials*, 2000, No 29, pp. 1328–1332.
18. Karakaya, I., Thompson, W.T., The Ag–Sn (silver–tin) system, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1987, No 8 (4), pp. 340–347.
19. Saunders, N., Miodownik, A.P., The Cu–Sn (copper–tin) system, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1990, No 11 (3), pp. 278–287.
20. Yen, Y.W., Chen, S.W., Phase equilibria of the Ag–Sn–Cu ternary system, *Journal of materials research*, 2004, No 19 (8), pp. 2298–2305.
21. Swenson, D., The effects of suppressed beta tin nucleation on the microstructural evolution of lead-free solder joints, *Lead-Free Electronic Solders: A Special Issue of the Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2006, pp. 39–54.
22. Moser, Z., Dutkiewicz, J., Gasior, W., Salawa, J., The Sn–Zn (tin–zinc) system, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1985, No 6 (4), pp. 330–334.
23. Li, Y.C., Chang, C.H., Pasana, A.S., Hsiao, H.M., Yen, Y.W., Interfacial reactions in lead-free solder/Cu–2.0 Be (Alloy 25) couples, *Journal of Electronic Materials*, 2021, No 50, pp. 903–913.

24. Li, F., Pu, C., Li, C., Yang, J., Jia, Y., Geng, C., Zhang, X., Bao, Q., Guo, S., Yi, J., Zhang, J., Study on the effects of Ag addition on the mechanical properties and oxidation resistance of Sn–Zn lead-free solder alloy by high-throughput method, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023, No 34 (4).
25. Havlík, R., Drienovský, M., Gerhátová, Ž., Babincová, P., Kusý, M., Gogola, P., Palcut, M., Phase constitution, microstructure and corrosion performance of binary Sn–Bi alloys, *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, No 36, pp. 173–181.
26. Chen, S., Wang, X., Guo, Z., Wu, C., Liu, Y., Liu, Y., Su, X., Investigation of the microstructure, thermal properties, and mechanical properties of Sn–Bi–Ag and Sn–Bi–Ag–Si low temperature lead-free solder alloys, *Coatings*, 2023, No 13 (2).
27. Zhao, W., Li, Y., Xu, B., Yang, H., Experimental investigation and modeling of vapor-liquid equilibria for Bi–Zn and Bi–Sn–Zn systems at 10 Pa, *CALPHAD*, 2021, No 74.
28. Lin, O.J., Ariff, M., Hanim, A., Thermal and Mechanical Stability of Bismuth Doped Sn–Ag–Cu Lead-free Solder: A Comprehensive Review, *Pertanika Journal of Science & Technology*, 2025, No 3.
29. Rai, D., Thermodynamic data for Sn (IV) dioxides and hydroxido complexes: a critical review, *Journal of Solution Chemistry*, 2022, No 51 (10), pp. 1169–1186.
30. Cui, Y., Xian, J.W., Zois, A., Marquardt, K., Yasuda, H., Gourlay, C.M., Nucleation and growth of Ag₃Sn in Sn–Ag and Sn–Ag–Cu solder alloys, *Acta Materialia*, 2023, No 249.
31. Ismail, N., Yusoff, W.Y., Amat, A., Manaf, N.A., Ahmad, N., A review of extreme condition effects on solder joint reliability: Understanding failure mechanisms, *Defence Technology*, 2024, No 41 (37). DOI: 10.1016/j.dt.2024.05.013
32. Tatsumi, H., Kaneshita, S., Kida, Y., Sato, Y., Tsukamoto, M., Nishikawa, H., Highly efficient soldering of Sn–Ag–Cu solder joints using blue laser, *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, No 82, pp. 700–707.
33. Subramanian, K.N., Sukanuma, K., Kim, K.S., Sn–Zn low temperature solder, *Lead-Free Electronic Solders: A Special Issue of the Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2007, pp. 121–127.
34. Xu, S., Li, Y., Jing, X., Paik, K.W., He, P., Zhang, S., The grain refinements effect of Zn alloying on low-temperature Sn–Bi–In lead-free solder, *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, No 29, pp. 2272–2278.
35. Mousavi, T., Aksoy, C.A., Grovenor, C.R., Speller, S.C., Microstructure and superconducting properties of Sn–In and Sn–In–Bi alloys as Pb-free superconducting solders, *Superconductor Science and Technology*, 2015, No 29 (1).
36. Said, R.M., Salleh, M.A., Saud, N., Ramli, M.I., Superconducting lead-free solder joint: a short review, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, No 957 (1).
37. Mei, Z., Holder, H.A., Van der Plas, H.A., Low-temperature solders, *Hewlett Packard Journal*, 1996, No 47, pp. 91–98.
38. Tsui, Y., Mahmoud, R.A., Surrey, E., Hampshire, D., Superconducting and mechanical properties of low-temperature solders for joints, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, No 26 (3), pp. 1–4.
39. Zhang, L., Chen, B., Zhang, S., Lu, C., Geometrical structures and hydrogen storage performance of medium sized Mg₃LaH_n–(n= 9– 20) anions, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, No 102, pp. 1161–1167.

40. Fadeeva, I.V., Fomin, A.S., Barinov, S.M., Davydova, G.A., Selezneva, I.I., Preobrazhenskii, I.I., Rusakov, M.K., Fomina, A.A., Volchenkova, V.A., Synthesis and properties of manganese-containing calcium phosphate materials, *Inorganic Materials*, 2020, No 56, pp. 700–706.
41. Fadeeva, I.V., Deyneko, D.V., Knotko, A.V., Olkhov, A.A., Slukin, P.V., Davydova, G.A., Trubitsyna, T.A., Preobrazhenskiy, I.I., Gosteva, A.N., Antoniac, I.V., Rau, J.V., Antibacterial composite material based on polyhydroxybutyrate and Zn-doped brushite cement, *Polymers*, 2023, No 15 (9).
42. Law, C.M., Wu, C.M., Yu, D.Q., Wang, L., Lai, J.K., Microstructure, solderability, and growth of intermetallic compounds of Sn–Ag–Cu–Re lead-free solder alloys, *Journal of Electronic Materials*, 2006, No 35, pp. 89–93.
43. Kang, H., Rajendran, S.H., Jung, J.P., Low melting temperature Sn–Bi solder: Effect of alloying and nanoparticle addition on the microstructural, thermal, interfacial bonding, and mechanical characteristics, *Metals*, 2021, No 11 (2).
44. Wang, B., Li, W., Zhang, S., Li, X., Pan, K., Effect of electric current stressing on mechanical performance of solders and solder joints: A review, *Journal of Materials Science*, 2022, No 57 (37), pp. 17533–17562.
45. Veselý, P., Dušek, K., Froš, D., Toward reducing no-clean flux spatter during reflow soldering: Investigating the effect of flux type, solder mask, and solder pad design, *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, No 81, pp. 696–706.
46. Fujiwara, K., Asahi, M.A., Tsurumi, S.H., Takeuchi, Y.O., Water-soluble flux for Pb-alloy Josephson device packaging, *IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology*, 1987, No 10 (2), pp. 258–262.
47. Jellesen, M.S., Minzari, D., Rathinavelu, U., Møller, P., Ambat, R., Corrosion failure due to flux residues in an electronic add-on device, *Engineering failure analysis*, 2010, No 17 (6), pp. 1263–1272.
48. Bharath Krupa Teja, M., Sharma, A., Das, S., Das, K., A review on nanodispersed lead-free solders in electronics: synthesis, microstructure and intermetallic growth characteristics, *Journal of Materials Science*, 2022, No 57 (19), pp. 8597–8633.
49. Zhang, S., Li, F., Yang, G., Xu, S., Han, Z., Fan, Z., Jiang, P., Chen, Y., Enhanced electrical and mechanical performances of soldered joint between copper stabilized REBCO superconducting tapes, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, No 29 (5), pp. 1–7.
50. Khatibi, G., Kotas, A.B., Lederer, M., Effect of aging on mechanical properties of high temperature Pb-rich solder joints, *Microelectronics Reliability*, 2018, No 85, pp. 1–11.
51. Bagrets, N., Barth, C., Weiss, K.P., Low temperature thermal and thermo-mechanical properties of soft solders for superconducting applications, *IEEE transactions on Applied Superconductivity*, 2013, No 24 (3), pp. 1–3.
52. Preuss, A., Fietz, W.H., Immel, F., Kauffmann-Weiss, S., Wolf, M.J., Critical current degradation of coated conductors under soldering conditions, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, No 28 (4), pp. 1–5.
53. Watterson, A., Hubbard, A., Diaz-Pacheco, R., Francis, A., Granetz, R., Logan, J., Goufopoulos, T., Kaplan, A., Michael, P., Murray, R., Sanabria, C., Schweiger, S., Toland, T., Vieira, R., Performance assessment of PIT VIPER cables following

- long-duration solder exposure during manufacturing, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2025, V. 35, Is. 5, Art. 4601505. DOI: 10.1109/TASC.2025.3527947
54. Preobrazhensky, I.I., Guryev, V.V., Diev, D.N., Naumov, A.V., Polyakov, A.V., Moseev, K.V., Makarenko, M.N., Shavkin, S.V., Vliyanie szhimayushchikh mekhanicheskikh nagruzok na raspredelenie kriticheskogo toka v paketakh VTSP-lent [The effect of compressive mechanical loads on the distribution of critical current in HTS tape packages], *Sverkhprovodimost: fundamentalnye i prikladnye issledovaniya*, 2024, No 2 (2), pp. 31–41.
55. Preobrazhensky, I.I., Guryev, V.V., Diev, D.N., Naumov, A.V., Polyakov, A.V., Moseev, K.V., Makarenko, M.N., Shavkin, S.V., The change in the critical current of second-generation HTS tapes after applying a compressive mechanical loads, *Physics of Metals and Metallography*, 2025, No 6, pp. 1–9).
56. Troitskii A. V., Markelov A.V., Molodyk A.A., Demikhov T.E., Antonova L. K., Mikhailova G. N., Mikhailov B.P., Prosvirnin D.V. Properties of low-resistance joints between HTS tape conductors prepared by soldering, *Doklady Physics*, 2017, No 62, pp. 233–235.
57. Lin, K., Ling, H., Hu, A., Wu, Y., Gao, L., Hang, T., Li, M., Growth behavior and formation mechanism of porous Cu₃Sn in Cu/Sn solder system, *Materials Characterization*, 2021, No 178.
58. Wang, R., Yan, Y., Li, W., Li, Z., Preparation of Sn₄₂Bi₅₈ and Sn_{64.7}Bi₃₅Ag_{0.3} soldering pastes for Cu–Al direct soldering and study of their performance, *Materials Chemistry and Physics*, 2025, No 336, Art. 130547. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130547>
59. Kodentsov, A., Wojewoda-Budka, J., Litynska-Dobrzynska, L., Zieba, P., Wierzbicka-Miernik, A., Formation of intermetallic compounds in reaction between Cu–Ni alloys and solid Sn—a new look at the prominent effect of Ni, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, No 858.
60. Zheng, J., Ma, H., He, R., Lu, Y., Song, H., Cui, C., Zhang, Y., Bai, C., Guo, Y., Liu, Z., Cai, C., Low-resistance and strong-adhesion soldering of second-generation high-temperature superconductor tapes within a short time, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, No 27 (5), pp. 1–6.
61. Tu, K.N., Thompson, R.D., Kinetics of interfacial reaction in bimetallic Cu–Sn thin films, *Acta Metallurgica*, 1982, No 30 (5), pp. 947–952.
62. Preuss, A., Fietz, W.H., Immel, F., Kauffmann-Weiss, S., Wolf, M.J., Critical current degradation of coated conductors under soldering conditions, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, No 28 (4), pp. 1–5.
63. Li, W., Guo, L., Li, D., Liu, Z.Q., Research Overview on the Electromigration Reliability of SnBi Solder Alloy, *Materials*, 2024, No 17 (12).
64. Bagrets, N., Celentano, G., Augieri, A., Nast, R., Weiss, K.P., Investigation of soldered REBCO tape–copper joints for superconducting applications, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, No 26 (4), pp. 1–4.
65. Li, Y., Chen, S., Dong, F., Dye, J., Yan, Y., Gao, C., Zhai, Y., Park, D., Metal-Insulation REBCO Pancake Coil with Solder Surface Shunt: Testing and Modeling, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2025, August, pp. 1–5. DOI:10.1109/TASC.2025.3530388
66. Ito, S., Tamura, R., Yamamoto, H., Onji, T., Tomita, M., Press-welding between high-temperature superconducting tape conductors with low-temperature solders including indium,

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, January, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2024.3512512

67. Balashov, N.N., Degtyarenko, P.N., Ivanov, S.S., Kopylov, S.I., Gorbunova, D.A., Molodyk, A.A., Samoilenkov, S., Sytnikov, V., Zheltov, V.V., Low-resistance soldered joints of commercial 2G HTS wire prepared at various values of applied pressure, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, No 28 (4), pp. 1–4.

68. Han, H., Kim, C., Lee, D., Nam, J., Kim, S., Park, T., Moon, C., Nam, T., Lee, B.J., Park, I., Localized electromagnetic induction heating system for rapid soldering of interfaces between integrated circuit and printed circuit board, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, No 165.

69. Drienovsky, M., Michalcova, E., Pekarčíková, M., Palcut, M., Frolek, L., Gogola, P., Jančuška, I., Mišík, J., Gömöry, F., Induction soldering of coated conductor high-temperature superconducting tapes with lead-free solder alloys, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, No 28(4), pp. 1–5.

70. Kunwar, A., Shang, S., Råback, P., Wang, Y., Givernaud, J., Chen, J., Ma, H., Song, X., Zhao, N., Heat and mass transfer effects of laser soldering on growth behavior of interfacial intermetallic compounds in Sn/Cu and Sn–3.5 Ag0.5/Cu joints, *Microelectronics Reliability*, 2018, No 80, pp. 55–67.

71. Wang, W., Wang, M., Han, L., Chen, Y., Liu, L., Yang, F., Li, M., Yu, Z., Zhao, Y., Low-resistance joints for YBCO-coated conductors with Ag nanoparticle paste, *Superconductor Science and Technology*, 2023, No 36 (8).

72. Huang, D., Chen, D., Dong, H., Wang, K., Chu, W.K., Wang, T., Wang, M., Zhu, K., Gu, H., Ren, Z., Ding, F., High-field critical current density enhancement in GdBCO coated conductors by cooperative defects, *Superconductor Science and Technology*, 2023, No 36 (6).

73. Maebatake, T., Ichinose, Y., Yamada, K., Mori, N., Teranishi, R., Inoue, M., Kiss, T., Yoshizumi, M., Izumi, T., Kaneko, K., Munetoh, S., Mukaida, M., Joint properties of REBCO coated conductors, *Physica C: Superconductivity and its applications*, 2011, No 471 (21–22), pp. 987–989.

74. Watanabe, T., Kamata, T., Maebatake, T., Teranishi, R., Kiss, T., Yamada, K., Kaneko, K., Yoshizumi, M., Izumi, T., Study of factors in joint resistance for GdBCO coated conductors, *Physics Procedia*, 2013, No 45, pp. 165–168.

75. Berthet, G., Jung, W., Park, H., Hahn, S., Lee, S., Comparison of the Electrical Properties of Copper Diffusion-Bonded Joints and Solder Joints for (RE) Ba₂Cu₃O_{7-δ} Tapes, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2025, January, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2025.3530325

CORROSION AND PROTECTION OF METALS

UDC 620.193.4:669.15–194.2

METHODOLOGICAL ASPECTS OF STUDYING CARBON DIOXIDE CORROSION OF GAS PIPE STEELS

R.K. VAGAPOV, Dr Sc. (Eng), Cand. Sc. (Chem), K.A. IBATULLIN, Cand. Sc. (Chem),
A.D. GAIZULLIN

Received August 11, 2025

Revised September 23, 2025

Accepted September 23, 2025

Abstract—The resistance of pipe steels to carbon dioxide corrosion under conditions of moisture condensation on the upper part of the pipe and under conditions of variable wetting of the pipe with water when partially filled with liquid, which occur in gas fields, is investigated. The tests were carried out using a corrosion installation and a stand simulating these main corrosion-hazardous conditions inside the well equipment and field gas pipelines. To enhance the corrosion effect on steels of aggressive operational environments of gas fields, in addition to the traditional single extraction of gravimetric steel samples, their multiple extraction, removal of corrosion products and subsequent use in corrosion tests are used. The influence of these methodological approaches on the enhancement of the general and local rates of carbon dioxide corrosion is estimated. Possible causes of the obtained results of corrosion tests and the influence of the formed corrosion products on them are discussed.

Keywords: test methods, corrosion installation, test stand, moisture condensation, variable wetting, localized corrosion, corrosion products, carbon and low-alloy steels

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-224-234

REFERENCES

1. Slugin, P.P., Polyansky, A.V., Optimalny metod borby s uglekislotoi korroziei truboprovodov na Bovanenkovskom NGKM [The best technique for controlling the carbon dioxide corrosion of pipelines at the Bovanenkovskoe oil and gas condensate field], *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*, 2018, V. 74, No 2, pp. 104–109.
2. Koryakin, A.Yu., Kobychyev, V.F., Kolinchenko, I.V., Yusupov, A.D., Usloviya protekaniya uglekislotoi korrozii na ob'ektakh dobychi Achimovskikh otlozhenii, metody kontrolya i prognozirovaniya [Conditions of the carbon dioxide corrosion on the production facilities of Achimovskie deposits, methods of monitoring and forecasting], *Gazovaya Promyshlennost*, 2017, V. 761, No 12, pp. 84–89.
3. Baydin, I.I., Kharitonov, A.N., Velichkin, A.V., et al., Vliyanie uglekisloty v prirodnom gaze gazokondensatnoi zalezhi nizhnemelovykh otlozhenii Yubileinogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya na ekspluatatsiyu UKPG-NTS [Effect of carbon dioxide in the natural gas of the gas condensate reservoir of the Lower Cretaceous deposits of Yubileinoe oil and gas condensate field on the operation of the UKPG-NTS], *Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti*, 2018, V. 74, No 2, pp. 23–35.
4. Petrenko, V.E., Nuriev, M.F., Shevelev, M.B., et al., Opyt razrabotki mestorozhdeniya na shelfe Rossiiskoi Federatsii, oborudovannogo podvodno-dobychnym kompleksom [Experience of development and reservoir engineering at off-shore field equipped with subsea production units in the Russian Federation], *Gazovaya Promyshlennost*, 2018, V. 77, No 11, pp. 8–13.
5. Slugin, P.P., Yagafarov, I.R., Kantyukov, R.R., et al., Nauchny analiz tekhnicheskogo sostoyaniya i zashchity skvazhinogo oborudovaniya i promyslovykh truboprovodov PAO Gazprom v usloviyakh dobychi i transportirovki korrozionno-agressivnogo gaza [Scientific analysis of the technical status and protection of well equipment and field pipelines of PJSC Gazprom under

conditions of corrosive gas production and transportation]: Part 1, *Gazovaya Promyshlennost*, 2023, V. 854, No 9, pp. 64–71.

6. Vagapov, R.K., Ibatullin, K.A., Otsenka lokalnykh defektov na vnutrennei poverkhnosti gazoprovodov, transportiruyushchikh CO₂-soderzhashchuyu produktsiyu [Assessment of local defects on the inner surface of gas pipelines transporting CO₂-containing products], *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, V. 58, No 10, pp. 926–933. DOI: 10.1134/S106183092260085X

7. Zhang, D., Yang, L., Tan, Z., et al., Corrosion behavior of X65 steel at different depths of pitting defects under local flow conditions, *Experimental Thermal and Fluid*, 2020, V. 124, Art. 110333. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110333

8. Mansoori, H., Mirzaee, R., Esmaeilzadeh, F., et al., Pitting corrosion failure analysis of a wet gas pipeline, *Engineering Failure Analysis*, 2017, V. 82, pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.08.012

9. Andreev, N.N., Sivokon, I.S., Metodologiya laboratornogo testirovaniya ingibitorov uglekislотноi korrozii dlya neftepromyslovykh truboprovodov [Methodology of laboratory assessment of efficiency of carbon dioxide corrosion inhibitors in oilfield pipelines], *Praktika protivokorroziionnoi zashchity*, 2014, V. 74, No 4, pp. 36–43.

10. Joshi, G.R., Cooper, K., Zhong, X., et al., Temporal evolution of sweet oilfield corrosion scale: Phases, morphologies, habits, and protection, *Corrosion Science*, 2018, V. 142, pp. 110–118. DOI: 10.1016/j.corsci.2018.07.009

11. Vasechkina, I.A., Gladchenkova, Y.S., Amezhnov, A.V., Vliyanie khimicheskogo sostava i strukturnykh kharakteristik trubnykh stalei na ih korroziionnyuyu stoikost v usloviyakh ekspluatatsii neftepromyslovykh truboprovodov Zapadnoi Sibiri [Effect of pipe steel chemical composition and structural characteristics on corrosion resistance under Western Siberia oilfield pipeline operating conditions], *Metallurg*, 2023, V. 67, No 5–6, pp. 579–589. DOI: 10.1007/s11015-023-01546-9

12. Slugin, P.P., Vasiliev, V.G., Yagafarov, I.R., et al., Vnedrenie innovatsionnykh reshenii pri otsenke korroziionnykh riskov uglekislотноi korrozii ob'ektov dobychi gaza PAO Gazprom [Introduction of innovative solutions for assessment of carbon dioxide corrosion risks at gas production facilities of PJSC Gazprom], *Gazovaya Promyshlennost*, 2024, V. 874, pp. 54–67.

13. Vagapov, R.K., Zapevalov, D.N., Corrosion activity of operating conditions for the steel equipment and pipelines in the plants extracting CO₂-containing gases, *Metallurgist*, 2021, V. 65, pp. 50–61. DOI: 10.1007/s11015-021-01132-x

14. Vagapov, R.K., Stoikost stalei v ekspluatatsionnykh usloviyakh gazovykh mestorozhdenii, soderzhashchikh v dobyvaemykh sredakh agressivny CO₂ [Resistance of steels under operating conditions of gas fields containing aggressive CO₂ in the produced media], *Materialovedenie*, 2022, V. 13, No 1, pp. 240–245. DOI: 10.1134/S2075113322010397

15. Laycock, N., Metri, V., Ra, S. et al., Key challenges for internal corrosion modeling of wet gas pipelines, *Corrosion*, 2024, V. 80, No 12, pp. 1146–1163. DOI: 10.5006/4532

16. Vagapov, R.K., Zapevalov, D.N., Ibatullin, K.A., Otsenka korroziionnoi stoikosti materia-lov v usloviyakh kondensatsii vlagi i nalichiya dioksida ugleroda [The evaluation of the corrosion resistance of materials under the conditions of moisture condensation in the presence of carbon dioxide], *Voprosy materialovedeniya*, 2021, V. 12, No 6, pp. 1606–1614 DOI: 10.1134/S2075113321060289

17. Kantyukov, R.R., Vagapov, R.,K., Zapevalov, D.N., et al., Novy metod otsenki stoikosti stali k lokalnoi uglekislotnoi korrozii na gazovykh ob'ektakh [A new method for assessing steel resistance to local carbon dioxide corrosion at gas facilities], *Metallurg*, 2024, V. 68, No 2, pp. 156–163. DOI: 10.1007/s11015-024-01714-5
18. Matamoros-Veloza, A., Barker, R., Vargas, S., Neville, A., Mechanistic insights of dissolution and mechanical breakdown of FeCO₃ corrosion films, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, V. 13, No 4, pp. 5741–5751. DOI:10.1021/acsami.0c18976
19. Han, J., Young, D., Colijn, H. et al., Chemistry and structure of the passive film on mild steel in CO₂ corrosion environments, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, V. 13, No 48, pp. 6296–6302. DOI: 10.1021/ie801819y
20. Vagapov, R.K., Mikhalkina, O.G., Issledovanie produktov uglekislotnoi korrozii metodom rentgenovskoi difraktsii [Study of carbon dioxide corrosion products by X-ray diffraction], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2023, V. 59, No 15, pp. 1489–1495. DOI: 10.1134/S002016852315013X
21. Elgaddafi, R., Ahmed, R., Shah, S., The effect of fluid flow on CO₂ corrosion of high-strength API carbon steels, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, V. 86, Art. 103739. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103739
22. Nešić, S., Effects of multiphase flow on internal CO₂ corrosion of mild steel pipelines, *Energy & Fuels*, 2012, V. 26, No 7, pp. 4098–4111. DOI: 10.1021/ef3002795
23. Yang, L., Zhang, D., Fan, H., et al., Investigating the micro-turbulent corrosion mechanism of pipeline defects based on a combined experimental and simulation approach, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, V. 106, Art. 104745. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104745
24. Ochoa, N., Vega, C., Pebere, N., et al., CO₂ corrosion resistance of carbon steel in relation with microstructure changes, *Materials Chemistry and Physics*, 2015, V. 156, pp. 198–205. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2015.02.047
25. Belikov, S.V., Sergeeva, K.I., Ashikhmina, I.N., et al., Izuchenie zakonornostei strukturo-obrazovaniya pri termicheskoi obrabotke nefteprovodnykh trub povyshennoi ekspluatatsionnoi nadezhnosti iz stali 13KhFA [Study of the patterns of structure formation during heat treatment of oil pipeline pipes made of 13KhFA steel with increased operational reliability], *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*, 2012, No 4, pp. 43–48.
26. Choi, Y.-S., Nešić, S., Jung, H.-G., Effect of alloying elements on the corrosion behavior of carbon steel in CO₂ environments, *Corrosion*, 2018, V. 74, No 5, pp. 566–576. DOI: 10.5006/2705
27. Gupta K.K., Haratian S., Mishin O.V., et al., The impact of minor Cr additions in low alloy steel on corrosion behavior in simulated well environment, *Npj Mater. Degrad.*, 2023, V. 7, pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41529-023-00393-y
28. Gudov, A.G., Burmasov, S.P., Zhitlukhin, E.G., Vliyanie nemetallicheskih vklyuchenii na sklonnost stali k lokalnoi korrozii [On the nature of the effect of non-metallic inclusions on the tendency of steel to local corrosion], *Metallurg*, 2023, V. 67, No 11–12, pp. 1810–1818. DOI: 10.1007/s11015-024-01678-6

RADIATION MATERIALS SCIENCE

COMPARISON OF THE EFFECTIVENESS OF LOW-TEMPERATURE THERMAL AND RADIATION-THERMAL ANNEALING OF RPV

Dedicated to the memory of Vladimir A. Nikolaev and Aleksandr M. Kryukov, pioneers in the justification and promotion of post-radiation annealing of reactor pressure vessels

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), E.V. YURCHENKO, Cand. Sc. (Eng),

A.M. MOROZOV, Cand. Sc. (Eng)

NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey",

49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: npk6@crism.ru

Received November 13, 2025

Revised November 18, 2025

Accepted December 8, 2025

Abstract—The paper presents a comparison of two types of post-radiation low-temperature annealing — thermal annealing (TA) and radiation-thermal annealing (RTA). TA is the annealing of previously irradiated metal due to heating of the pressure vessel of non-operational reactor to a temperature exceeding the irradiation temperature during operation. RTA is the annealing due to short-term additional irradiation of the reactor pressure vessel at a temperature exceeding the irradiation temperature during operation. Experimental results on fracture toughness, mechanical properties, and microhardness for the reactor pressure vessel steel grade 15Kh2MFA-A (2Cr–Ni–Mo–V) in various states (initial state, after neutron irradiation, after TA and RTA) are presented. On the basis of performed investigations the recovery coefficient of the yield strength, microhardness and fracture toughness as a result of TA and RTA is determined. A comparison of the effectiveness of TA and RTA is made. The application analysis of RTA as a mitigation measure for the service life extension of reactors is considered.

Keywords: low-temperature thermal annealing, low-temperature radiation-thermal annealing, coefficient of property recovery, radiation embrittlement, yield strength, fracture toughness, microhardness

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-125-1-235-249

REFERENCES

1. Nichols, R.W., Harries, D.R., Brittle fracture and irradiation effects in ferritic pressure vessel steels, *Proc. of the Symposium on Radiation Effects on Metals and Neutron Dosimetry ASTM STP*, 1963, No 341, pp. 162–198. (ASTM STP 341)
2. Hawthorne, J.R., *Radiation embrittlement*, Briant C., Banerji S. (Eds.), Embrittlement of engineering alloys, New York: Academic Press, 1983.
3. Ibragimov, Sh.Sh., Lyashenko, V.S., Zavyalov, A.I., Issledovanie svoystv i struktury metallov i nekotorykh staley posle oblucheniya ikh bystryimi neitronami [Study of the properties and structure of metals and certain steels after irradiation with fast neutrons], *Atomnaya energiya*, 1960, V. 8, Is. 5, pp. 413–419.
4. Deistvie yadernykh izlucheniya na materialy [The effect of nuclear radiation on materials], Report by P. A. Platonov, *Doklady Soveshchaniya*, 6–10.12.1960, Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1962, pp. 106–120.
5. Pachur, D., Radiation annealing mechanisms of low-alloy reactor pressure vessel steels dependent on irradiation temperature and neutron fluence, *Nuclear Technology*, 1982, No 59, pp. 463–475.

6. Amaev, A.D., Kryukov, A.M., Sokolov, M.A., Recovery of transition temperature of irradiated WWER-440 vessel metal by annealing, *Radiation Embrittlement of Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels*, ASTM, 1993, V. STP 1170, pp. 369–379.
7. Kryukov, A.M., *Obosnovanie prodleniya radiatsionnogo resursa korpusov reaktorov VVER-440* [Justification for extending the radiation resource of VVER-440 reactor vessels]: thesis for the degree of Cand. of Sc. Moscow, 1994.
8. Alekseenko N.N., Amaev A.D., Gorynin I.V., Nikolaev V.A. *Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels*, Am. Nucl. Soc. La Grange, Illin., USA, 1997.
9. Nikolaev, V.A., Badanin, V.I., Morozov, A.M., Summirovaniye povrezhdenii pri otzhige i povtornom obluchenii korpusnoi stali [Summation of damage during annealing and re-irradiation of body steel], *Atomnaya energiya*, 1984, V. 57, Is. 3, pp. 165–167.
10. Brumovsky, M., Ahlstrand, R., Brynda, J., Debarberis, L., Kohopaa, J., Kryukov, A., Server, W., Annealing and Re-embrittlement of reactor pressure vessel materials. State of the art report ATHENA WP-4, *AMES Report*, 2008, No 19.
11. Amaev, A.D., Kryukov, A.M., Nikolaev, V.A., et al., Sposob vosstanovitelnoi termicheskoi obrabotki stalnykh izdelii [Method of Restorative Heat Treatment of Steel Products], *Bulletin izobretanii i otkrytii*, 1984, No 46, Copyright Certificate No 1129926 SSSR.
12. ASTM E 1921-01: Standard test method for determination of reference temperature, T_0 , for ferrite steels in the transition range, *Annual Book of ASTM Standards*, Section 3, V. 03.01, pp. 1068–1084.
13. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Fomenko, V.N., Kostylev, V.I., Further Improvement of the Prometey Model and Unified Curve Method. Part 2: Improvement of the Unified Curve Method, *Eng. Fract. Mech.*, 2018, V. 191, pp. 383–402.
14. GOST R 59115.14-2021: *Natsionalny standard Rossiiskoi Federatsii. Obosnovanie prochnosti oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Raschet na soprotivlenie khrupkomu razrusheniyu korpusa vodo-vodyanogo energeticheskogo reaktora* [National Standard of the Russian Federation. Substantiation of the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Calculation of resistance to brittle fracture of the casing of a water-water power reactor].
15. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Prometey local approach to brittle fracture: development and application, *Eng. Fracture Mech.*, 2008, V. 75, Is. 11, pp. 3483–3498.
16. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Radiation embrittlement modeling in multiscale approach to brittle fracture of RPV steel, *Int. J. of Fracture*, 2012, V. 179, Is. 1–2, pp. 87–108.
17. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Belyaeva, L.A., Modelirovaniye radiatsionnogo uprochneniya nerzhavayushchikh ferritno-martensitnykh i austenitnykh staley posredstvom oblucheniya v ionnom uskoritele. Ch. 1: Razrabotka metodologii vybora rezhima ionnogo oblucheniya ferritno-martensitnykh staley [Modeling of radiation hardening of stainless ferritic-martensitic and austenitic steels by irradiation in an ion accelerator. Part 1: Development of a methodology for selecting the mode of ion irradiation of ferritic-martensitic steels], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 2 (118), pp. 187–211.
18. Margolin, B.Z., Yurchenko, E.V., Morozov, A.M., Varovin, A.Ya., Rogozhkin, S.V., Nikitin, A.A., Issledovaniye vliyaniya postradiatsionnogo otzhiga na vosstanovleniye svoystv

materialov opornykh konstruktsy korpusov reaktorov VVER-440. Ch. 2: Analiz osobennostei vliyaniya otzhiga materiala posle nizkotemperaturnogo oblucheniya [Research on the effect of post-radiation annealing on the restoration of the properties of the materials of the support structures of the VVER-440 reactor housings. Part 2: Analysis of the effect of annealing of the material after low-temperature irradiation], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, No 1 (109), pp. 184–198.