ЖУРНАЛ «ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ», 2026, № 3 (127)

СОДЕРЖАНИЕ

Михаил Валентинович Ковальчук. К 80-летию со дня рождения 5

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Кондратьев Н. А., Хлусова Е. И., Мотовилина Г. Д., Дмитрюк А. И. Структура и механические свойства листового проката толщиной 5–15 мм после имитационного моделирования горячей непрерывной прокатки на лабораторном стане *10*

Устюжина Е. В., Фомина О. В., Мотовилина Г. Д., Калинин Г. Ю., Боровская О. Д. Исследование влияния термической обработки на структуру и свойства стали марки 45Г17Ю3 ..... *25*

Малютина Ю. Н., Кузьмин Р. И., Дударева А. А., Шелепов Д. А., Хабиров Р. Р., Буров В. Г. Влияние отжига на микроструктуру и микротвердость покрытий на основе NbC *33*

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Колесников В. И., Абзаев Ю. А., Колесников И. В., Политыко К. Н., Сыртанов М. С. Структурно-фазовое состояние и электронная структура многослойной пленки TiN-AlSiN на стальной подложке *46*

Бурков А. А., Быцура А. Ю., Кулик М. А., Крутикова В. О. Микроструктура, износостойкость и жаростойкость WC/Ni-Al слоистых металлокерамических покрытий, полученных методом электроискрового легирования *64*

Климова А. П., Малыхин А. Ю., Панич А. А., Дзюба Е. Б. Синтез, структура и пьезоэлектрические свойства гибридных перовскитов системы $CH_3NH_3PbCl_3$ *78*

Черкесов З. А. Изучение условий получения молибдата железа (III) при твердофазном синтезе *91*

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Антипов В. В., Матвиенко Ж. В., Мушникова С. Ю., Артамонов Е. А., Панфилова А. П. Исследование влияния стеклянных микросфер на свойства пенофенопласта, применяемого для тепловой изоляции судовых корпусных конструкций *99*

Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Князев Е. В., Глотов А. И., Вебер Д. А. Влияние технологии синтеза полимерного композиционного материала на структуру и трибологические свойства *118*

Николаева М. А., Старостин Н. П., Тихонов Р. С., Данзанова Е. В., Аммосова О. А. Приварка детали с закладным нагревателем сложной формы к полиэтиленовой трубе при низких температурах *132*

Усков В. Г., Ожогин А. В., Строкова С. В., Ильясов С. Г. Влияние добавки полиметилен-*п*-трифенилового эфира борной кислоты на физико-механические свойства абс-пластика, наполненного волластонитом *142*

Акимова М. П., Шарин П. П., Сивцева А. В., Яковлева С. П. Влияние способа ввода упрочняющих добавок из порошка детонационного наноалмаза на структуру и трибологические характеристики композиционного материала *152*

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Гавшинский А. Л., Мельников П. В., Грибанова В. Б. Исследование влияния технологических парамет-ров сварки на характеристики металла шва, выполненного механизированным способом с применением порошковой проволоки *166*

Затоковенко Н. И., Тимофеев М. Н., Старцева Д. Х., Паньшин А. Ю., Куценко Е. И., Савелков А. С. Исследование структуры и свойств наплавленного покрытия, выполненного электрошлаковым способом лентой типа 25% Cr – 22% Ni – 2% Mo – 0,2% N оборудования, работающего в средах синтеза карбамида *173*

Митрофанов В. М., Волосов Н. А., Потапов Н. Н., Волобуева С. Ю. Особенности технологии и материалов для электрошлаковой наплавки лентой корпусного оборудования атомно-энергетических установок АО «НПО «ЦНИИТМАШ» *183*

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Киреев С. Ю. Разработка безборного сульфатно-ацетатного электролита для электрохимического осаждения антикоррозионных покрытий сплавом цинк–никель *196*

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Марголин Б. З., Пирогова Н. Е., Сорокин А. А. Исследование коррозионного растрескивания облученных аустенитных материалов для элементов реакторов со сверхкритическими параметрами тепло-носителя *208*

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов 232

© 2026
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
http://www.crism-prometey.ru

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.14.018.295:621.771.016–413

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ТОЛЩИНОЙ 5–15 мм ПОСЛЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРЯЧЕЙ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ НА ЛАБОРАТОРНОМ СТАНЕ

Н. А. КОНДРАТЬЕВ, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, А. И. ДМИТРЮК

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

Поступила в редакцию 22.07.2026

После доработки 3.08.2026

Принята к публикации 5.08.2026

Изготовлен листовой прокат толщиной 5–15 мм с уровнем прочности от 460 до 890 МПа из стали с унифицированным химическим составом после имитационного моделирования горячей прокатки по технологии термомеханической обработки с ускоренным охлаждением. Исследовано влияние температуры конца прокатки, скорости охлаждения и температуры смотки на структуру и механические свойства листового проката.

Ключевые слова: низкоуглеродистая легированная судостроительная сталь, непрерывная прокатка, имитационное моделирование, термомеханическая обработка, высокопрочная сталь, хладостойкость, феррит, перлит, бейнит, мартенсит

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-10-24

Литература

1. Горицкий В. М., Гусева И. А., Лушкин М. А., Шнейдеров Г. Р. Сравнение коэффициентов анизотропии ударной вязкости на образцах Шарпи конструкционных сталей, изготовленных по Евронормам и стандартам России // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79. – № 10. – С. 78–83.

2. Горицкий В. М., Шнейдеров Г. Р., Горицкий О. В. Влияние анизотропии ударной вязкости на характеристики сопротивления хрупкому разрушению высокопрочных сталей, подвергнутых термомеханической обработке // Металлург. – № 5. – 2020. – С. 42–49.

3. Полецков П. П., Кузнецова А. С., Алексеев Д. Ю. Никитенко О. А., Лопатина Е. В. Анализ мирового уровня разработок в области производства горячекатаного высокопрочного хладостойкого листового проката с пределом текучести ≥ 600 Н/мм2 // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – Т. 18. – № 4. – С. 32–38.

4. Полецков П. П., Алексеев Д. Ю., Кузнецов А. С., Гулин А. Е., Емалеева Д. Г. Исследование влияния режимов ускоренного охлаждения на структурообразование и свойства рулонного проката // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – Т. 20. – № 2. – 2022. – С. 91–97.

5. Полецков П. П., Копцева Н. В., Ефимова Ю. Ю., Алексеева Д. Ю., Гулин А. Е., Куприянова О. А. Исследование технологических режимов производства стального проката для гибких насосно-компрессорных труб // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2023. – № 22. – С. 91–98.

6. Кондратьев Н. А., Хлусова Е. И., Анисимов Д. М., Боровская О. Д. Выбор параметров высокоскоростной термодеформационной обработки Cr-Ni-Mo стали на основании имитационного моделирования // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 1 (117). – С. 5–19.

7. 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 // Вопросы материаловедения. – 2026. – № 1 (125). – С. 10–24.

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

9. Судьин В. В., Степанов П. П., Кантор М. М., Эфрон Л. И., Воркачев К. Г., Жарков С. В. Сопоставление влияния микроструктурных факторов на ударную вязкость околошовной зоны сварных труб класса прочности К60 // Сталь. – 2022. – № 1. – С. 44–50.

УДК 669.15-194.56:621.785

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ МАРКИ 45Г17Ю3

Е. В. УСТЮЖИНА, О. В. ФОМИНА, д-р техн. наук, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, Г. Ю. КАЛИНИН, д-р техн. наук, О. Д. БОРОВСКАЯ
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49. E-mail: mail@crism.ru
Поступила в редакцию 9.07.2026
После доработки 20.07.2026
Принята к публикации 23.07.2026

Выполнен анализ прочностных и пластических характеристик, а также структурных изменений стали аустенитного класса после нормализации в интервале температур 650–950°С. Определен температурный интервал нагрева для нормализации листового проката из стали марки 45Г17Ю3.

Ключевые слова: листовой прокат, маломагнитная сталь, нормализация, аустенитное зерно, крис-таллизация, сульфиды
DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-25-32

Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей».

ЛИТЕРАТУРА

1. Малышевский В. А., Цуканов В. В., Калинин Г. Ю., Фомина О. В. Современные маломагнитные стали для судостроения // Судостроение. – 2009. – № 5. – С. 19–21.
2. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 648 с.
3. Канфор С. С. Корпусная сталь. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 375 с.
4. Бернштейн М. Л., Займовский В. А., Капуткина Л. М. Термомеханическая обработка стали: – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
5. Голуб Ю. В., Панкова Е. А. Влияние режимов термодеформационной обработки на процессы рекристаллизации при прокатке стали 45Г17Ю3 // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 4. – С. 7–16.
6. Сагарадзе В. В., Уваров А. И. Упрочнение аустенитных сталей. – М.: Наука, 1989. – 270 с.
7. Физическое металловедение / Под ред. Кана Р. У. и Хаазена П. – М.: Металлургия, 1987. – Т. 1. – 640 с.
8. Ковнеристый Ю. К., Блинов В. М., Власов Я. Я. и др. Физико-механические свойства высокопрочных немагнитных сталей типа 45Г14Н9Ф. Высокопрочные немагнитные сплавы [доклады конференции]. – М.: Наука, 1973. – 118 с.
9. Мирзоев Д. А., Воробьев И. И., Яковлева И. Л. Электронно-микроскопические исследования характера выделения сульфидов в стали 40ХГМ после высокотемпературной термической обработки // Известия Челябинского научного центра – 2006. – № 3 (33). – С. 12–17.

УДК 621.791.92 : 621.785.3

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ NBC

Ю. Н. МАЛЮТИНА[1, 2], канд. техн. наук, Р. И. КУЗЬМИН[1], канд. техн. наук, А. А. ДУДАРЕВА[1], Д. А. ШЕЛЕПОВ[1], Р. Р. ХАБИРОВ[1], В. Г. БУРОВ[1], д-р техн. наук
[1] Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
[2] Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15.
E-mail: iuliiamaliutina@gmail.com
Поступила в редакцию 17.02.2026
После доработки 13.05.2026
Принята к публикации 24.06.2026

В работе исследовано влияние термической обработки на микроструктуру и микротвердость NbC покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки на аустенитную сталь 12Х18Н10Т. Проведен комплексный анализ фазовых превращений, диффузионных процессов и эволюции микроструктуры при отжиге в диапазоне температур 600–1100°С с выдержкой 3, 5 и 10 часов. Установлено, что при 600°С в структуре покрытия формируются мелкодисперсные частицы карбида хрома типа $M_{23}C_6$, а микротвердость увеличивается незначительно. При 900°С наблюдается существенный рост микротвердости до 520 HV, что в 1,95 раза превышает микротвердость термически необработанного покрытия за счет дисперсионного упрочнения, обусловленного равномерным распределением вторичных и выделившихся карбидных фаз. При

1100°C происходит коагуляция и рост первичных карбидов, сфероидизация вторичных карбидов и снижение микротвердости покрытия.

Ключевые слова: покрытие на основе NbC, вневакуумная электронно-лучевая наплавка, отжиг, микротвердость, выделение карбидов

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-33-45

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSUN-2023-0009).

Исследование проводилось на базе ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee T., Jeong W., Chung S., Ryu H. J. Effects of TiC on the microstructure refinement and mechani-cal property enhancement of additive manufactured Inconel 625/TiC metal matrix composites fabricated with novel core-shell composite powder // J. Mater. Sci. Technol. – 2023. – V. 164. – P. 13–26. URL: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.04.033
2. Ren Y., Li L., Zhou Y., Wang S. In situ synthesized VC reinforced Fe-based coating by using extreme high-speed laser cladding // Mater. Lett. – 2022. – V. 315. – Art. 131962. URL: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131962
3. Gupta A., Hussain M., Misra S., Das A. K., Mandal A. processing and characterization of laser sintered hybrid B4C/CBN reinforced Ti-based metal matrix composite // Opt. Lasers Eng. – 2018. – V. 105. – P. 159–172. URL: https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.01.015
4. Chu Z., Wei F., Zheng X., Zhang C., Yang Y. Microstructure and Properties of TiN/Fe-Based Amorphous Composite Coatings Fabricated by Reactive Plasma Spraying // J. Alloys Compd. – 2019. – V. 785. – P. 206–213. URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.171
5. Ma Z., Wang Q., Liang Y., Cui Z., Meng F., Chen L., Wang Z., Yu T., Liu C. The mechanism and machinability of laser-assisted machining zirconia ceramics // Ceram. Int. – 2023. – V. 49. – Art. 16971–16984. URL: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.059
6. Wu C., Ma M., Liu W., Zhong M., Zhang H., Zhang W. Laser cladding in-situ carbide particle reinforced Fe-based composite coatings with rare earth oxide addition // Journal of Rare Earths. – 2009. – V. 27. – P. 997–1002. URL: https://doi.org/10.1016/S1002-0721(08)60377-4
7. Maslarevic A., Bakic G. M., Djukic M. B., Rajicic B., Maksimovic V., Pavkov V. Microstructure and Wear Behavior of MMC Coatings Deposited by Plasma Transferred Arc Welding and Thermal Flame Spraying Processes // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2020. – V. 73. – P. 259–271. DOI: 10.1007/s12666-019-01831-9
8. Li Q., Lei Y., Fu H. Growth characteristics and reinforcing behavior of in-situ NbCp in laser cladded Fe-based composite coating // J. Mater. Sci. Technol. – 2015. – V. 31. – P. 766–772. URL: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.06.012
9. Krylova T. A., Chumakov Yu. A. Fabrication of Cr-Ti-C Composite Coating by Non-Vacuum Electron Beam Cladding // Mater. Lett. – 2020. – V. 274. – Art. 128022. URL: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128022
10. Wang J., Li L., Tao W. Crack initiation and propagation behavior of WC particles reinforced Fe-based metal matrix composite produced by laser melting deposition // Opt. Laser Technol. – 2016. – V. 82. – P. 170–182. URL: https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.03.008
11. Yang J., Huang J., Fan D., Chen S. Microstructure and Wear Properties of Fe–6wt.%Cr–0.55wt.%C–Xwt.%Nb Laser Cladding Coating and the Mechanism Analysis // Mater. Des. – 2015. – V. 88. – P. 1031–1041. URL: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.108
12. Zhang Z., Yu T., Kovacevic R. Erosion and corrosion resistance of laser cladded AISI 420 Stainless Steel Reinforced with VC // Appl. Surf. Sci. – 2017. – V. 410. – P. 225–240. URL: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.137
13. Li S., Niu W., Lei Y.-W., Zheng Y. Microstructure and Wear Performance of Ex/in-Situ TiC Reinforced $CoCrFeNiW_{0.4}Si_{0.2}$ High-Entropy Alloy Coatings by Laser Cladding // J. Alloys Compd. – 2024. – V. 1002. – Art. 175458. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175458
14. Powder Metallurgy Data. Refractory, Hard and Intermetallic Materials // Beiss P., Ruthardt R., Warlimont H. (Eds.). – Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg, 2002. – V. 2A2.
15. Liu Y., Wang K., Fu H., Yang X., Lin J. Effect of NbC addition on the microstructure and wear resistance of laser cladding nickel-based alloy coatings // J. Mater. Eng. Perform. – 2024. – V. 33. – P. 12437–12451. DOI: 10.1007/s11665-023-08828-y

16. Zhang Z., Lei S., Xie X., Yan Z., Li W., Zhao X. Influence of Vacuum Heat Treatment on Wear Behavior of HVAF Sprayed WC-Cr3C2–Ni Coatings // Vacuum. – 2023. – V. 216. – P. 112431. URL: https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112431
17. Luo Z., Yu H., Yang J., Feng Y., Xie G., Misra R. D. K. Effect of Heat Treatment on the Microstructure, Impact Toughness and Wear Resistance of Fe-Based/B4C Composite Coating by Vacuum Cladding // Surf. Coat. Technol. – 2023. – V. 459. – P. 129386. URL: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129386
18. Yurgin A. B., Ruktuev A. A., Stepanova N. V., Riznitsky A. E., Khudyakov D. V., Bataev I. A. Influence of Heat Treatment on the Structure and Properties of CoCrFeMnNi + NbC Coatings Obtained by Nonvacuum Electron-Beam Surfacing // Metallurgist. – 2025. – V. 69. – P. 110–117. DOI: 10.1007/s11015-025-01921-8
19. Mishra T. K., Sahu P., Gedam V., Jain A., Atkare S. Effect of Heat Treatment on Abrasive Wear Behaviour of Ni-WC Coatings // Mater. Today Proc. – 2023. – September. URL: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.335
20. Ryabinkina P., Bushueva E., Nikulina A. Structure and Properties of Austenitic Steel Surface-Doped with NbC. – Mater. Today Proc. – 2019. – V. 11. – P. 436–440. URL: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.009
21. Zimogliadova T. A., Bataev A. A., Lazurenko D. V, Bataev I. A., Bataev, V. A., Golkovskii M. G., Saage H., Ogneva T. S., Ruktuev A. A. Structural characterization of layers fabricated by non-vacuum electron beam cladding of Ni-Cr-Si-B self-fluxing alloy with additions of niobium and boron // Mater. Today Commun. 2022. – V. 33. – P. 104363. URL: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104363
22. Ogneva T., Emurlaev K., Malyutina Y., Domarov E., Chakin I., Ruktuev A., Riabinkina P., Yurgin A., Bataev I. Heat treatment induced structural transformations and high-temperature oxidation behavior of Al21Co22Cr22Fe13Ni22 high-entropy coatings produced by non-vacuum electron beam cladding // Metals. – 2023. – V. 13 (10). – P. 1689. DOI: 10.3390/met13101689
23. Cao Y., Zhi S., Gao Q., Tian X., Geng T., Guan X., Qin C. Formation behavior of in-situ NbC in Fe-based laser cladding coatings // Mater. Charact. – 2016. – V. 119. – P. 159–165. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.08.005
24. Easterling K. E., Porter D. A., Sherif M. Phase transformations in metals and alloys. – CRC Press, 2009. – 3rd ed.
25. Krauss G. Steels: Processing, Structure, and Performance. – ASM International, 2015. – 2nd ed.
26. Raghavan V. C-Fe-Nb (Carbon-Iron-Niobium) // J. Phase Equilibria Diffus. – 2009. – V. 30. – P. 92–93. DOI: 10.1007/s11669-008-9448-z

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.793.7:539.23

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛЕНКИ TiN-AlSiN НА СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКЕ

В. И. КОЛЕСНИКОВ[1], акад. РАН, Ю. А. АБЗАЕВ[2], д-р физ.-мат. наук, И. В. КОЛЕСНИКОВ[1], К. Н. ПОЛИТЫКО[1], М. С. СЫРТАНОВ[3], канд. техн. наук

[1] Ростовский государственный университет путей сообщения, 344038, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2.

[2] Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Солянская, 2

[3] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 65

Поступила в редакцию 5.08.2026

После доработки 28.08.2026

Принята к публикации 02.09.2026

Метастабильные нитридные покрытия системы TiN–AlSiN представляют интерес как многослойные неоднородные материалы, в которых высокая твердость и термохимическая устойчивость фазы TiN сочетаются с возможностью формирования кремнийсодержащих нитридных и силицидных областей. В настоящей работе рассмотрена пленка TiN–AlSiN, полученная вакуумным ионно-плазменным осаждением на стальной подложке. Образец был сформирован по схеме Ti (подслой) + TiN + AlSiN + TiN + … + AlSiN; напыление осуществлялось с титанового катода и силуминового катода состава Al–Si = 88/12 при подаче азота в вакуумную камеру. Структурный анализ был выполнен методом Ритвельда, а электронная структура и параметры химической связи исследованы в рамках теории функционала плотности с использованием кода CASTEP, функционала PBE и ультрамягких псевдопотенциалов. Показано, что структурно-фазовое состояние является сложной иерархически организованной системой TiN/AlSiN. Помимо TiN со структурой B1 и стальной подложки α-Fe, в

модель включена кремний-азотная β-Si_3N_4 и силицидная фазы Si_4Ti_4, которые отражают химическую неоднородность слоя AlSiN и возможное межслойное взаимодействие Ti-содержащих и Si-содержащих областей. Для TiN получена кубическая ячейка с параметром 4,1993 Å после релаксации, а заселенность связи N–Ti равна +0,70 при длине связи 2,09964 Å. Популяционный анвлиз указывает на выраженный ковалентный вклад при существенной ионной компоненте, который определяется переносом заряда от Ti к N. Для Si_4Ti_4 обнаружена ковалентная связь Si–Si и смешанная связь Si–Ti, тогда как прямое Ti–Ti-взаимодействие является слабым или разрыхляющим. Для β-Si_3N_4 подтверждена ковалентно-ионная природа связи Si–N, но отмечена высокая чувствительность анализа Малликена к локальным коротким расстояниям и перекрыванию базисных функций. На основе данных популяционного анализа выполнены фундаментальные расчеты локальной жесткости связей, сопротивления сдвигу, работы адгезии на интерфейсах и коэффициента износа по Арчарду. Полученные результаты позволяют связать фазовый состав, релаксацию элементарных ячеек и распределение электронной плотности с мезомеханическим поведением многослойной пленки TiN–AlSiN.

Ключевые слова: TiN–AlSiN, многослойное покрытие, DFT, CASTEP, Ритвельд, Малликен, Хирш-фельд, TiN, β-Si_3N_4, Si_4Ti_4, химическая связь, физическая мезомеханика

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-46-63

Исследование выполнено при поддержке Российского Научного Фонда (проект № №21-79-30007-П, URL: https://rscf.ru/project/21-79-30007/

ЛИТЕРАТУРА

1. Mayrhofer P. H., Mitterer C., Hultman L., Clemens H. Microstructural design of hard coatings // Progress in Materials Science. – 2006. – V. 51. – P. 1032–1114.
2. Veprek S., Veprek-Heijman M. G. J. Industrial applications of superhard nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology. – 2008. – V. 202. – P. 5063–5073.
3. Holleck H. Material selection for hard coatings // Journal of Vacuum Science and Technology A. – 1986. – V. 4. – P. 2661–2669.
4. Musil J. Hard and superhard nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology. – 2000. – V. 125. – P. 322–330.
5. Hultman L. Thermal stability of nitride thin films // Vacuum. – 2000. – V. 57. – P. 1–30.
6. Patscheider J. Nanocomposite hard coatings for wear protection // MRS Bulletin. – 2003. – V. 28. – P. 180–183.
7. Rietveld H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures // Journal of Applied Crystallography. – 1969. – V. 2. – P. 65–71.
8. Knotek O., Löffler F., Krämer G. Multicomponent and multilayer physically vapour deposited coatings // Surface and Coatings Technology. – 1992. – V. 54–55. – P. 241–248.
9. Barshilia H. C., Deepthi B., Selvakumar N., Jain A., Rajam K. S. Nanolayered multilayer coatings of TiN/CrN prepared by reactive direct current magnetron sputtering // Applied Surface Science. – 2007. – V. 253. – P. 5076–5083.
10. Clark S. J., Segall M. D., Pickard C. J., Hasnip P. J., Probert M. I. J., Refson K., Payne M. C. First principles methods using CASTEP // Zeitschrift für Kristallographie. – 2005. – V. 220. – P. 567–570.
11. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple // Phy-sical Review Letters. – 1996. – V. 77. – N. 18. – P. 3865–3868.
12. Vanderbilt D. Soft self-consistent pseudopotentials in a generalized eigenvalue formalism // Physical Review B. – 1990. – V. 41. – P. 7892–7895.
13. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations // Physical Review B. – 1976. – V. 13. – P. 5188–5192.
14. Mulliken R. S. Electronic population analysis on LCAO–MO molecular wave functions // Journal of Chemical Physics. – 1955. – V. 23. – P. 1833–1840.
15. Hirshfeld F. L. Bonded-atom fragments for describing molecular charge densities // Theoretica Chimica Acta. – 1977. – V. 44. – P. 129–138.
16. Kohn W., Sham L. J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects // Physical Review. – 1965. – V. 140. – P. A1133–A1138.
17. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas // Physical Review. – 1964. – V. 136. – P. B864–B871.
18. Карпинский В. И., Лякишев Н. П. Физико-химические основы формирования нитридных покрытий // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 5. – С. 45–52.
19. Münz W. D. Titanium aluminum nitride films: a new alternative to TiN coatings // Journal of Vacuum Science and Technology A. – 1986. – V. 4. – P. 2717–2725.

20. Rebouta L., Andritschky M., Silva M. F. da, Soares J. C. Structural characterization of TiAlN coatings // Surface and Coatings Technology. – 1995. – V. 76–77. – P. 70–74.
21. Pettifor D. G. Theoretical predictions of structure and related properties of intermetallics // Materials Science and Technology. – 1992. – V. 8. – P. 345–349.
22. Tabor D. The hardness of metals. – Oxford: Oxford University Press, 1951.
23. Hill R. The elastic behaviour of a crystalline aggregate // Proceedings of the Physical Society. Section A. – 1952. – V. 65. – P. 349–354.
24. Archard J. F. Contact and rubbing of flat surfaces // Journal of Applied Physics. – 1953. – V. 24. – P. 981–988.
25. Rice J. R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks // Journal of Applied Mechanics. – 1968. – V. 35. – P. 379–386.

УДК 621.762.34:621.793.6

МИКРОСТРУКТУРА, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И ЖАРОСТОЙКОСТЬ WC/Ni-Al СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

А. А. БУРКОВ[1], канд физ.-мат. наук, А. Ю. БЫЦУРА[1], М. А. КУЛИК[1], В. О. КРУТИКОВА[2]

[1] Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН, 680042, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153

[2] Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65

Поступила в редакцию 6.04.2026

После доработки 10.08.2026

Принята к публикации 13.08.2026

Для повышения износостойкости и жаростойкости стальных изделий на поверхности образца из стали 45 методом электроискрового легирования были получены композитные покрытия на основе WC/Ni-Al, представляющие собой металлокерамические градиентные материалы. Покрытия получены по-очередным осаждением слоев карбида вольфрама и никель-алюминиевой композиции с использованием нелокализованного электрода. Установлено, что изменение режима нанесения слоев позволяет регулировать соотношение их толщин. Средняя толщина приготовленных двуслойных металлокерамических покрытий монотонно возрастала от 34,4 до 58,2 мкм с ростом длительности импульсов при нанесении первого слоя с 20 до 500 мкс. По данным рентгенофазового анализа, в составе слоистых покрытий присутствуют рефлексы фаз AlNi, Fe-Ni, WC, WC_{1-x} и W_2C, что указывает на структуру металлокерамического композита. По данным растровой электронной микроскопии, покрытия имели гетерогенную структуру со светлыми включениями карбидов вольфрама микронного и субмикронного диапазонов. В нижней части покрытий наблюдается скопление карбида вольфрама, сформировавшееся при осаждении первого слоя.

Коррозионное поведение покрытий было исследовано методами потенциодинамической поляризации и спектроскопии электрохимического импеданса. Показано, что применение двуслойных WC/Ni–Al покрытий позволяет улучшить коррозионное поведение стали 45 и повысить жаростойкость при 700°C от 5 до 19 раз. Улучшение заключается в небольшом уменьшении плотности тока коррозии, увеличении полного импеданса и величины фазового угла. Микротвердость поверхности покрытий была близкой и находилась в диапазоне от 6,34 до 6,6 ГПа, что соответствует твердости Ni-Al слоя. Установлено, что применение двуслойных металлокерамических WC/Ni-Al покрытий позволяет снизить и стабилизировать коэффициент трения поверхности деталей из стали 45. Показано, что с повышением длительности импульсов при нанесении слоя с карбидом вольфрама износ покрытий монотонно снижался вследст-вие роста отношения толщин слоя WC к Ni-Al слою.

Ключевые слова: композитные покрытия на основе WC/Ni-Al, микроструктура, износостойкость, жаростойкость, слоистые металлокерамические покрытия, электроискровое легирование

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-64-77

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН (тема НИР № 075-00399-26-00). Работа выполнена в рамках Государственного задания ИТиГ ДВО РАН (тема НИР 126020216322-5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Mari D., Bolognini S., Feusier G., Cutard T., Verdon C., Viatte T., Benoit W. TiMoCN based cermets: Part I. Morphology and phase composition // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2003. – V. 21. – N 1–2. – P. 37–46. URL: https://doi.org/10.1016/S0263-4368(03)00010-6

2. Pirso J. Viljus, M., Letunovitš, S., Juhani, K., Joost, R. Three-body abrasive wear of cermets // Wear. – 2011. – V. 271. – Is. 11–12. – P. 2868–2878. URL: https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.06.005
3. Дворник М. И., Власова Н. М. Сравнительный анализ эксплуатационной стойкости субмикронного твердого сплава WC-10Co, спеченного из порошка, полученного электроэрозионным диспергированием в масле // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 75–84. URL: https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-1-75-84
4. Ojo-Kupoluyi O., Tahir S., Baharudin B., Azmah Hanim M., Anuar M. Mechanical properties of WC-based hardmetals bonded with iron alloys – A review // Materials Science and Technology. – 2017. – V. 33. – N 5. – P. 507–517. URL: https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1186929
5. Straumal B., Konyashin I. WC-based cemented carbides with high entropy alloyed binders: a review // Metals. – 2023. – V. 13. – N 1. – P. 171. URL: https://doi.org/10.3390/met13010171
6. Piechowiak D., Kania A., Łukaszkiewicz N., Miklaszewski A. Properties and Microstructure Evaluation in NiAl-xWC (x= 0−90 wt.%) Intermetallic-Based Composites Prepared by Mechanical Alloying // Materials. – 2023. – V. 16. – N 5. – P. 2048. URL: https://doi.org/10.3390/ma16052048
7. Matos F. A. D. F., Corrêa E. O., Balbino N. A. N., Huanca D. R. Evaluation of Electrochemical Corrosion Behavior of WC-Ni-Al and WC-Co Cemented Carbides // Materials Research. – 2026. – V. 29. – P. e20240516.
8. Yuan, J., Wang, Q., Liu, X., Lou, S., Li, Q., Wang, Z. Microstructures and high-temperature wear behavior of NiAl/WC-Fex coatings on carbon steel by plasma cladding // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – V. 842. – P. 155850. URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155850
9. Liu Wen, Bai Chao. Study on Plasma-spraying Ni-Al-WC Alloy Layer on the Surface of Chrome Cast Iron and Alloy Layer's Microstructure and Properties // Atomic Energy Science and Technology. – 2002. – V. 36. – N Z1. – P. 454. URL: https://doi.org/10.7538/yzk.2002.36.z1.0454
10. Yan Z., Zeng D., Yang R., Li W. Microstructural evolution and tribological properties of WC-Ni60 coatings fabricated by laser cladding with different Al additions // Materials Characterization. – 2025. – P. 115311. URL: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2025.115311
11. Бурков А. А. Использование гранул Ni и Al и порошка WC для электроискрового нанесения металлокерамических покрытий // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2025. – Т. 19. – № 2. – С. 62–72. URL: https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-2-62-72
12. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Renna G. Advancements in electrospark deposition (ESD) technique: A short review // Coatings. – 2022. – V. 12. – N 10. – P. 1536. URL: https://doi.org/10.3390/coatings12101536
13. Burkov A. A., Bytsura A. Y. Influence of substrate surface quality on electro-spark alloying // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2024. – V. 60. – N 2. – P. 204–210. URL: https://doi.org/10.3103/S1068375524020030
14. Кудряшов А. Е., Левашов Е. А., Репников Н. И., Макаров А. В. Перспективы применения технологии электроискрового легирования и СВС-электродных материалов для повышения стойкости прокатных валков // Нанотехнологии: наука и производство. – 2018. – № 2. – С. 63–66.
15. Панов А. В., Долгий З. О., Русина Н. С. Формирование жаростойких покрытий на сплаве ВТ9 методом электроискрового легирования // Космодром «Восточный» – будущее космической отрасли России. – 2013. – С. 57–64.
16. Tarelnyk V. B., Paustovskii A. V., Tkachenko Y. G., Konoplianchenko E. V., Martsynkovskyi V. S., Antoszewski B. Electrode materials for composite and multilayer electrospark-deposited coatings from Ni–Cr and WC–Co alloys and metals // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2017. – V. 55. – N 9. – P. 585–595. URL: https://doi.org/10.1007/s11106-017-9843-2
17. Khimukhin S. N., Eremina K. P., Khe V. K. Structure of combined intermetallic electrospark coatings on steel 45 // Metal Science and Heat Treatment. – 2025. – V. 66. – N 11–12. – P. 671–677. URL: https://doi.org/10.1007/s11041-025-01102-z
18. Burkov A. A., Khe V. K., Bytsura A. Y. Electroerosion Series of Metals for Electric Spark Deposition Based on Solution of the Heat-Conduction Problem // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2024. – V. 60. – N 4. – P. 599–606. URL: https://doi.org/10.3103/S1068375524700169
19. Kwok D. Y., Neumann A. W. Contact angle measurement and contact angle interpretation // Advances in Colloid and Interface Science. – 1999. – V. 81. – Is. 3. – P. 167–249. URL: https://doi.org/10.1016/S0001-8686(98)00087-6
20. Almond E. A., Gee M. G. Results from a UK interlaboratory project on dry sliding wear // Wear. – 1987. – V. 120. – N 1. – P. 101–116.

21. Kennedy F. E., Lu Y., Baker I. Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting // Tribology International. – 2015. – V. 82. – P. 534–542. URL: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.10.022
22. Nataraja M., Balakumar G., Santhosh N., Naik M. R. Characterization of wear rate of Al-12 wt% Si alloy based MMC reinforced with ZrO_2 particulates // Materials Research Express. – 2024. – V. 11. – N 3. – P. 036522. URL: https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad3468
23. Zeng, H., Sun, W., Tang, H., Jiang, F., Wang, L. Surface Roughness and Its Role in Flotation Behavior, Wettability, and Bubble–Particle Interactions: A Systematic Review // Applied Sciences. – 2025. – V. 15. – Is. 8. – P. 4557. URL: https://doi.org/10.3390/app15084557
24. Rosalbino F., Scavino G. Corrosion behaviour assessment of cast and HIPed Stellite 6 alloy in a chloride-containing environment // Electrochimica Acta. – 2013. – V. 111. – P. 656–662. URL: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.08.019
25. Бурков А. А., Кулик М. А., Быцура А. Ю. Структура и свойства Al–Ni–Fe-покрытий на стали 35, полученных методом электроискрового легирования // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2024. – № 7 (829). – С. 22–30
26. Alves A. C., Wenger F., Ponthiaux P. et al. Corrosion mechanisms in titanium oxide-based films produced by anodic treatment // Electrochimica Acta. – 2017. – V. 234. – P. 16–27. URL: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.011
27. Бурков А. А., Кулик М. А. Структура, жаростойкость, коррозионная и трибологическая характеристики покрытий, приготовленных электроискровым осаждением порошков Ni и Al на сталь 35 // Неорганические материалы. – 2024. – Т. 60. – № 7. – С. 833–845.
28. Lu, J. Z., Cao, J., Lu, H. F., Zhang, L. Y., Luo, K. Y. Wear properties and microstructural analyses of Fe-based coatings with various WC contents on H13 die steel by laser cladding // Surface and Coatings Technology. – 2019. – V. 369. – P. 228–237. URL: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.063
29. Бурков А., Дворник М., Кулик М., Быцура А. Влияние гранулометрии порошка карбида вольфрама на характеристики металлокерамических покрытий WC/Fe-Ni-Al // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2025. – Т. 27. – № 3. – С. 221–235.

УДК 548.736.442.6:537.226.86

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ СИСТЕМЫ $CH_3NH_3PBCl_3$

А. П. КЛИМОВА, А. Ю. МАЛЫХИН, А. А. ПАНИЧ, д-р техн. наук, Е. Б. ДЗЮБА, канд. техн. наук
Южный федеральный университет, Институт высоких технологий и пьезотехники, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10. E-mail: malyhin@sfedu.ru

Поступила в редакцию 24.11.2025
После доработки 30.04.2026
Принята к публикации 13.05.2026

В настоящее время гибридные металлорганические перовскиты на основе галогенидов метиламмония-свинца привлекают значительное внимание исследователей в области фотовольтаики и оптоэлектроники. Интерес к этим материалам обусловлен рекордной динамикой роста эффективности преобразования солнечной энергии, которая в лабораторных условиях уже достигла значений, конкурирующих с коммерческими кремниевыми солнечными элементами. Рассматриваемый в рамках настоящего исследования хлорид метилламония-свинца ($CH_3NH_3PbCl_3$ или $MAPbCl_3$) обладает перовскитоподобной кристаллической решеткой, позволяющей при определенных условиях получать пьезоэлектрический отклик, сопоставимый с известными керамическими составами систем на основе цирконата-титаната свинца. Нами проведена работа, направленная на получение кристаллов $MAPbCl_3$, изучение их структурных характеристик, стабильности, фотоэлектрических и пьезоэлектрических свойств. Дано обоснование выбора метода получения целевого продукта, оптимального с точки зрения скорости протекания реакции, доступности реагентов и оборудования. Сонохимический метод дополнен циклическим воздействием, подобраны режимы, обеспечивающие наилучшее качество кристаллов за минимальное время. В результате исследования получены образцы, обладающие химической стабильностью и устойчивостью к атмосферному воздействию при нормальных условиях, что подтверждено результатами рентгенофазового анализа. Методом растровой электронной микроскопии проведено исследование образцов, показана зависимость структуры поверхности кристалла от времени ультразвукового

воздействия. Исследованы петли механического гистерезиса и пьезоэлектрические свойства. Проведен сравнительный анализ с пьезокерамическим материалом системы цирконата-титаната свинца.

Ключевые слова: хлорид метилламония-свинца, металлорганический перовскит, сонохимический синтез, пьезоэлектрический отклик, сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-78-90

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания, проект № FENW-2025-0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xia J., Qiu X., Liu Y. et al. Ferroelectric Wide-Bandgap Metal Halide Perovskite Field-Effect Transistors: Toward Transparent Electronics // Advanced science. – 2023. – V. 10. – N 10.
2. Ip H. A., Quan L. N., Adachi M. M. et al. A two-step route to planar perovskite cells exhibiting reduced hysteresis // Applied physics letters. – 2015. – V. 106. – N 14.
3. De Quilettes D. W., Vorpahl S. M., Stranks S. D. et al. Impact of microstructure on local carrier lifetime in perovskite solar cells // Science. – 2015. – V. 348. – N 6235. – P. 683–686.
4. Grancini G., D'Innocenzo V., Dohner E. R. et al. CH3NH3PbI3 perovskite single crystals: surface photophysics and their interaction with the environment // Chemical Science. – 2015. – V. 6. – N 12. – P. 7305–7310.
5. Smecca E., Valenzano V., Valastro S. et al. Two-step $MAPbI_3$ deposition by low-vacuum proxi-mity-space-effusion for high-efficiency inverted semitransparent perovskite solar cells // Journal of materials chemistry A. – 2021. – V. 9. – N 30. – P. 16456–46469.
6. Popov G., Mattinen M., Kemell M. et al. Scalable Route to the Fabrication of CH3NH3PbI3 Perovskite Thin Films by Electrodeposition and Vapor Conversion // ACS Omega. – 2016. – V. 1. – N 6. – P. 1296–1306.
7. Zhang C., He Z., Mogensen M. et al A deep-dyeing strategy for ultra-stable, brightly luminescent perovskite-polymer // Journal of Materials Chemistry C. – 2021. – V. 9. – N 10. – P. 3396–3402.
8. Xia J., Qiu X., Liu Y.et al. Ferroelectric Wide-Bandgap Metal Halide Perovskite Field-Effect Transistors: Toward Transparent Electronics // Advanced science. – 2023. – V. 10. – N 10.
9. Bu T., Li J., Zheng F. et al. Universal passivation strategy to slot-die printed SnO_2 for hysteresis-free efficient flexible perovskite solar module // Nature Communications. – 2018. – N 9.
10. Warren G. W., Henein H. Solubility of $PbCl_2$ in DMSO and DMSO – water solutions // Hydrometallurgy. – 1997. – N 1–2. – P. 243–247.
11. Bi D., Moon S. J., Häggman L. et al. Using a two-step deposition technique to prepare perovskite ($CH_3NH_3PbI_3$) for thin film solar cells based on ZrO_2 and TiO_2 mesostructures // RSC Advances. – 2013. – V. 3. – N 41.
12. Han G., Zhang S., Boix P. P., Wong L. H. et al. Towards high efficiency thin film solar cells // Progress in Materials Science. – 2017. – N 87. – P. 246–291.
13. Hsu H. P., Li L. C., Shellaiah M., Sun K. W. et al. Structural, Photophysical, and Electronic Proper-ties of CH3NH3PbCl3 Single Crystals // Scientific Reports. – 2019. – N 7.
14. Nayak P. K., Moore D. T., Wenger B. et al. Mechanism for rapid growth of organic–inorganic ha-lide perovskite crystals // Nature Communications. – 2016. – N 7.
15. Vasiljevic M., Kollár M., Spirito D. et al. "Forbidden" Polarisation and Extraordinary Piezoelectric Effect in Organometallic Lead Halide Perovskites // Advanced Functional Materials. – 2022. – V. 32. – N 40.
16. Eperon G. E., Habisreutinger S. N., Leijtens T. et al. The Importance of Moisture in Hybrid Lead Halide Perovskite Thin Film Fabrication // ACS Nano. – 2015. – V. 9. – N 9. – P. 9380–9393.
17. López C. A., Abia C., Rodrigues J. E. et al. Enhanced stability in $CH_3NH_3PbI_3$ hybrid perov-skite from mechano-chemical synthesis: structural, microstructural and optoelectronic characterization // Scientific Reports. – 2020. – N 10.
18. Torres-Martínez D. Y., Millán M., Aguilar B. et al. Synthesis and characterization of $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite thin films obtained in one step // Physica B: Condensed Matter. – 2020. – N 585.
19. Dang Y., Liu Y., Sun Y. et al. Bulk crystal growth of hybrid perovskite material $CH_3NH_3PbI_3$ // CrystEngComm. – 2015. – V. 17. – N 3.
20. Awol N., Amente C., Verma G. et al. Morphology and surface analyses for $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite thin films treated with versatile solvent–antisolvent vapors // RSC Advances. – 2021. – V. 11. – N 29.
21. Kashchiev D. Nucleation: Basic Theory with Applications. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – 551 p.
22. Vekilov P. G. The two-step mechanism of nucleation of crystals in solution // Nanoscale. – 2010. – N 2 (11). – P. 2346–2357. DOI: 10.1039/c0nr00628a
23. Vekilov P. G. Nucleation // Crystal growth & design. – 2010. – V. 10. – N 12. – P. 5007–5019.

24. Kurz W., Fisher D. J., Rappaz M. Fundamentals of solidification fifth – fully revised edition. – Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2023. – 345 p.
25. Davey R. J, Garside J. From Molecules to Crystallizers. – Oxford: Oxford University Press, 2000. – 98 p.
26. Xiang L., Fu M., Wang T. et al. Application and development of ultrasound in industrial crystallization // Ultrasonics Sonochemistry. – 2020. – N 111.
27. Промтов М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Вестник ТГТУ. – 2008. – № 4.
28. Hagenson L. C., Doraiswamy L. K. Comparison of the effects of ultrasound and mechanical agitation on a reacting solid-liquid system // Chemical Engineering Science. – 1998. – V. 53. – N 1. – P. 131–148.
29. Dalvi S. V., Yadav M. D. Effect of ultrasound and stabilizers on nucleation kinetics of curcumin during liquid antisolvent precipitation // Ultrasonics Sonochemistry. – 2014. – N 24. – P. 114–122.
30. Guo Z., Jones A. G., Li N. The effect of ultrasound on the homogeneous nucleation of $BaSO_4$ during reactive crystallization // Chemical Engineering Science. – 2006. – V. 61. – N 5. – P. 1617–1626.
31. Kordyllaa A., Krawczyka T., Tumakakab F. et al. Modeling ultrasound-induced nucleation during cooling crystallization // Chemical Engineering Science. – 2009. – N 64 (8) – P. 1635–1642.
32. Nandia P., Girial C., Swain D. et al. Room temperature growth of $CH_3NH_3PbI_3$ single crystals by solvent evaporation method // CrystEngComm. – 2018. – V. 21 – N 4.
33. Отраслевой стандарт 11 0444-87 «Материалы пьезокерамические».
34. Liu Y., Kim D., Levlev A. V. et al. Ferroic Halide Perovskite Optoelectronics // Advanced Functional Materials. – 2021. – V. 31. – N 36.

УДК 549.76

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ МОЛИБДАТА ЖЕЛЕЗА (III) ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ СИНТЕЗЕ

З. А. ЧЕРКЕСОВ, канд. хим. наук
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, д. 173. E-mail: cherkesovz@mail.ru

Поступила в редакцию 8.04.2026
После доработки 13.05.2026
Принята к публикации 14.05.2026

В работе представлен расчетно-экспериментальный материал по изучению твердофазного взаимодействия реагентов в системе $Fe_2(SO_4)_3$–Na_2CO_3–MoO_3 методами термодинамики и химической кинетики в широком интервале температур при стехиометрическом отношении реагирующих веществ. Изучены термодинамические параметры протекающих в изученной системе реакций и показано, что процессы, связанные с синтезом молибдата железа (III), характеризуются значительной отрицательной энергией Гиббса, а это принципиально для достижения поставленной в работе цели. Важную роль в этом отношении играет взаимодействие сульфата железа (III) с карбонатом натрия, в результате которого образуется весьма нестабильная фаза – переходное состояние $Fe_2(CO_3)_3$ – донор высокодефектного оксида железа (III). Последний интенсивно реагирует с термически активированным оксидом молибдена (VI), образуя молибдат железа (III).

На основе полученных при этом данных разработан метод синтеза молибдата железа (III), характеризующийся, в отличие от известных методов, высокими производительностью процесса, выходом и содержанием основного вещества, находящегося в высокодисперсном состоянии. Синтез молибдата железа осуществлен после тщательного растирания исходных реагентов и просеивания через сито. Температуру процесса синтеза в 600°С поддерживали до достижения постоянной массы смеси. Затем спек охлаждали до комнатной температуры и выщелачивали горячей (70–80°С) дистиллированной водой. Осадок молибдата железа (III) отфильтровывали, промывали на фильтре до отрицательной реакции на молибдат-ион. Синтезированный молибдат железа (III) сушили, промывали и прокаливали до постоянной массы. Выход железа (III) молибденовогокислого составляет 99,70% от теоретического. В работе содержится также материал по идентификации синтезированного продукта современными методами исследования.

Ключевые слова: твердофазный синтез, система, молибдат железа (III), идентификация
DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-91-98

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков А. Б., Румянцев Р. Н., Ильин А. А., Ильин А. П. Окисление метанола до формальдегида в промышленных условиях с использованием различных железомолибденовых катализаторов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 65–71. DOI: 10.6060/tcct.20165905.5356
2. Thrane J., Mentztel U. V., Thorhauge M., Hoj M., Jensen A. D. A Review and experimental revisit of alternative catalysts for selective oxidation of methanol to formaldehyde // Catalysts. – 2021. – V. 11. – N 11. – P. 13–19 DOI: 10.3390/catal11111329
3. Kim T. H., Ramachandra B., Saidutta M.B., Choo K. Y., Song S.D., J.-W. Rhee. Selective Oxidation of Methanol to Formaldehyde Using Modified Iron-Molybdate Catalysts // Cat. Lett. – 2004. – V. 98. – P. 161–165. DOI: 10.1007/S10562-004-7932-6
4. Латыпова С. Ш., Есева Е. А., Синикова Н. А., Акопян А. В. Каталитические системы на основе молибдатов для аэробного окисления органических субстратов (обзор) // Наногетерогенный катализ. – 2023. – Т. 8. – № 2. – С. 24–42. DOI: 10.56304/S2414215823020028
5. Румянцев Р Н., Ильин А. А., Пименова К. Р., Ильин А. П. Исследование условий образования молибдата железа (III) при керамическом и механохимическом синтезе // Российский химический журнал. – 2015. – Т. 19. – № 4. – С. 97–102.
6. Дао К. К., Ильин А. А., Ильин А. П. Исследование синтеза молибдата железа в процессе механохимической активации // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2019. – № 2 (58). – С. 139–149.
7. Chen L. et al. Effect of Oxygen–Iron Composition on Charge Transport and Interface Reaction in Hematite // ACS Catalysis. – 2020. – V. 10. – N 4. – P. 2413–2418. DOI: 10.1021/acscatal.9b04538
8. Qin Y. et al. Facile synthesis of oxygen vacancies enriched α-Fe_2O_3 for peroxymonosulfate activation: A non-radical process for sulfamethoxazole degradation // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – V. 419. – Art. 126447. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126447
9. Шурдумов Г. К., Черкесов З. А. О концепции разработки оптимизированной технологии получения молибдатов и вольфраматов d-элементов в твердых фазах на основе обменных реакций во взаим-ных системах $MeSO_4$–Na_2CO_3–$Mo(W)O_3$ при их термической обработке (Me–d-элемент) // Chemical bulletin. – 2018. –. Т. 1. – № 4. – С. 31–39.
10. Шурдумов Г.К., Черкесов З.А., Мокаева Л.И. Об эффекте массообмена систем $Mn(Fe,Co)Mo(W)O_4$–Na_2CO_3 и окружающей среды и необходимости его учета при идентификации молибдатов и вольфраматов поливалентных d-элементов Mn, Fe, Co на основе термогравиметрических данных // Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология. – 2019. – Т. 62. – № 4. – С. 111–120. DOI: 10.6060/ivkkt.20186100.5724
11. Глушко В. П. Термические константы веществ. – М.: Наука, 1981. – Вып. 10, ч. 1. – 298 с.
12. Каржавин В. К. Термодинамические величины химических элементов и соединений – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2011. – 160 с.
13. Волков А. И., Жарский И. М. Справочник. Термодинамические характеристики веществ. – Минск: Изд-во Букмастер, 2014. – 288 с.
14. Степановских Е. И., Брусницына Л. А., Виноградова Т. В. Физическая химия для инженеров. – Екатеринбург: Изд-во Ур. ун-та, 2022. – 264 с.
15. Еремин В. В. Основы физической химии: учеб. пособие в 2 ч. Часть 1. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 320 с.
16. Ярославцев А. Б. Физическая химия. – Изд-во Научный Мир, 2018. – 264 с
17. Гамбург Ю. Д. Химическая термодинамика. – М.: Лаборатория знаний, 2016. – 237 с.
18. Николенко Н. В., Костынюк А. О., Гутенуар Ф., Калашников Ю. В. Химическое осаждение смесей молибдата железа (III) с триоксидом молибдена непрерывной кристаллизацией // Неорган. материалы. – 2014. – Т. 50. – № 11. – С. 12–31. DOI: 10.7868/S0002337X14110128
19. Шурдумов Г. К., Тлимахова Е. Х., Шурдумов Б. К. Синтез вольфрамата кобальта в расплавах системы (K_2WO_4–KCl)эвт–$CoSO_4$(K,Co//Cl,SO_4,WO_4) // Журн. неорг. химии. – 2010. – Т. 55 (9). – С. 1568–1572.

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК [678.632+666.189.3]:536.212.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР НА СВОЙСТВА ПЕНОФЕНОПЛАСТА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. В. АНТИПОВ, д-р техн. наук, Ж. В. МАТВИЕНКО, С. Ю. МУШНИКОВА, д-р техн. наук,
Е. А. АРТАМОНОВ, канд. техн. наук, А. П. ПАНФИЛОВА
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49.
E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 15.07.2026
После доработки 14.08.2026
Принята к публикации 14.08.2026

В статье исследованы структура и физико-механические свойства пенофенопласта с гибридным наполнителем: перлитом (5–6,6% мас.) и различным содержанием полых стеклянных микросфер (от 5 до 40% мас.). Показано, что введение стеклянных микросфер до 30% приводит к снижению характерис-тик гигроскопичности, влажности и водопоглощения в 2,8–5 раз, повышению прочности на сжатие – в 30 раз. При этом обнаружено возрастание коэффициента теплопроводности с 0,04 до 0,06 Вт/м·К и плотности с 76 до 330 кг/м^3. Более высокие концентрации полых стеклянных микросфер (35–40%) вызывают резкое понижение прочности на сжатие и рост показателя водопоглощения. Установлены взаимосвязи величины пористости и структуры пенополимера со значениями физико-механических свойств. Определены рациональные количества наполнителя (полых стеклянных микросфер) в зависимости от требуемого уровня плотности пенофенопласта.

Ключевые слова: полые стеклянные микросферы, перлит, пенофенопласт, тепловая изоляция, судовые корпусные конструкции, гигроскопичность
DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-99-117

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров Ю. Л., Овчаренко Е. Г., Шойхет Б. М., Петухова Е. Ю. Теплоизоляционные материалы и конструкции. – М.: Изд-во Инфра-М, 2003. – 268 с.
2. Колосова А. С., Пикалов Е. С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2020. – № 10. – С. 54–67.
3. Берлин А. А., Шутов Ф. А. Пенополимеры на основе реакционноспособных олигомеров. – М.: Химия, 1978. – 296 с.
4. Lu X., Li Y., Chen Z., Li S., Wang X., Liu Q. Recent Trends in Polymer Matrix Solid Buoyancy Materials: A Review // Polymers. – 2024. – N 16. – Art. 2307. URL: https://doi.org/10.3390/polym16162307
5. Бахман А., Мюллер К. Фенопласты. – М.: Химия, 1978. – 288 с.
6. Mougel C., Garnier T., Cassagnau P., Sintes-Zydowicz N. Phenolic foams: A review of mechanical properties, fire resistance and new trends in phenol substitution // Polymer. – 2019. – N 164. – p. 86–117. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.12.050.
7. Ушков В. А. Горючесть газонаполненных полимеров // Строительство: наука и образование. – 2017. – Т. 7. – Вып. 3 (24). – Ст. 5. Режим доступа: http://nso-journal.ru
8. Petkova-Slipetsi R., Zlateva P. An analysis of the structure and thermal conductivity of hollow microsphere filled syntactic foams // Civil and Environmental Engineering. – 2019. – V. 15. – Is. 1. – P. 36–41. DOI: 10.2478/cee-2019-0006
9. Андрианов Р. А., Пономарев Ю. Е. Пенопласты на основе фенолоформальдегидных полимеров. – Издательство Ростовского университета, 1987. – 80 с.
10. Андреев А. К., Ермаков Б. С. Материалы для низкотемпературной техники: Учеб. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 355 с.
11. Торлова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С. Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолформальдегидных смол // Научное обозрение. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 96–114.
12. Застрогина О. Б., Синяков С. Д., Серкова Е. А. Материалы на основе фенолформальдегидных олигомеров резольного и новолачного типов (обзор). Ч. 1 // Труды ВИАМ. – 2021. – № 10 (104). – С. 58–66.
13. Сударева Н. Г., Смыслова Л. А., Назарова Н. Н., Матвиенко Ж. В. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы. – НПО «Профессионал», 2012. – С. 581–619.
14. Донской А. А., Краснов Л. Л, Баритко Н. В., Матвеева И. А., Исаев А. Ю. Полимерные тепло- и огнезащитные материалы // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ». – 2007. – С. 322–326.

15.Лебедев В. Л., Косульников В. Ю., Серый П. В., Трошкин С. Н., Логунова А. А., Лысенко А. П. Моделирование режимов полимеризации крупногабаритных блоков из сферопластика // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – Т. 4. – № 390. – С. 67–84.
16.Yazici M., Fahr P., Shukla A., Gunes S., Akay S. K. Development of a Polymer Based Syntactic Foam for High Temperature Applications // Acta Physica Polonica A. – 2014. -–V. 125. – N 2. – P. 526–528.
17.Fredi G., Ronconi G., Galvagnini F., Mazzanti V., Zanelli M., Mollica F., Dorigato A. Modeling the thermal behavior of multifunctional syntactic foams containing phase change materials for heat management applications // Polymer Composites. – 2024. – N 45. – P. 15590–15603.
18.Mouritz A. P., Gibson A. G. Fire Properties of Polymer Composite Materials // Solid mechanics and its applications. – Springer, The Netherlands, 2006. – V. 143. – 398 p.
19.Dai J., Peng C., Zhang S., Wu S., Shi M., Huang Z. Investigation on the Mechanical and Thermal Insulation Properties of Hollow Microspheres / Phenolic Syntactic Foams // Advances in Materials Science and Engineering. – V. 2022. – Is. 1. – Art. ID 2509090. – 10 p. URL: doi.org/10.1155/2022/2509090
20.Wang H., Yan R., Cheng H., Zou M., Wang H., Zheng K. Hollow glass microspheres / phenolic syntactic foams with excellent mechanical and thermal insulate performance // Front. Chem. – 2023. – V. 11. – Art. 1216706. DOI: 10.3389/fchem.2023.1216706
21.Tassaw D. F., Barburski M., Kassie B. B. The Role of Hollow Glass Microspheres as Functional Fillers in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review // Materials. – 2025. – V. 18. – Is. 21. – 27 p. URL: doi.org/10.3390/ma18214974
22.Соловьев С. А., Соловьева О. В., Ахметова И. Г., Ваньков Ю. В., Шакурова Р. З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 86–98. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-86-98
23.Апанасевич Н. С., Сокол А. А., Кудлаш А. Н., Лапко К. Н., Сёмуха А. Ю., Ероховец А. М. Термостойкие теплоизолирующие композиционные материалы на основе полых микросфер и твердых фосфатных связующих: разработка и исследование // Журнал Белорусского государственного университета. Химия. – 2022. – № 2. – С. 70–82. URL: https://doi.org/10.33581/2520-257X-2022-2-70-82
24.Xing Z., Ke H., Wang X., Zheng T., Qiao Y., Chen K., Zhang X., Zhang L., Bai C., Li Z. Investigation of the Thermal Conductivity of Resin-Based Lightweight Composites Filled with Hollow Glass Microspheres // Polymers. – 2020. – V. 12. – Is. 3. – 518.
25. Кноп А. Фенольные смолы и материалы на их основе. – М.: Химия, 1983. – 280 с.
26.Дворко И. М. Получение, свойства и применение пенопластов на основе новолачных фенолоформальдегидных олигомеров // Пластические массы. – 2003. – № 7. – С. 17–20 .
27.ГОСТ 17177-94. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний.
28.ОСТ 5.9296. Материалы теплоизоляционные для судостроения. Методы испытаний.
29.ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности и термического сопротивления на стационарном тепловом режиме.
30.Курносов А. О., Вавилова М. И., Мельников Д. А. Технологии производства стек-лянных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – Вып. 50. – № 1. – С. 64–70.

УДК 678.742:621.891

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА СТРУКТУРУ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Д. А. НЕГРОВ, канд. техн. наук, В. Ю. ПУТИНЦЕВ, канд. техн. наук, Е. В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, А. И. ГЛОТОВ, Д. А. ВЕБЕР

ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», 644050, Омск, пр. Мира, 11. E-mail: den.veber.18@bk.ru

Поступила в редакцию 12.02.2026

После доработки 13.04.2026

Принята к публикации 30.04.2026

В данной работе представлена усовершенствованная технология изготовления наполненных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и молотого микрометрового углеродного

волокна. Известная технология статического прессования композиционной смеси дополнена внешним бигармоническим воздействием высокой ~17 кГц и низкой ~100 Гц частоты в процессе твердофазного синтеза. Данный способ позволил повысить износостойкость на 32% по сравнению со стандартным прессованием. Кроме того, в работе показано более равномерное распределение частиц углеродного волокна в полимерной матрице, вызванное механическими колебаниями порошка в пресс-форме. Методом фото-электронной спектроскопии было зафиксировано снижение отношения концентрации фтора к углероду. Это явление, вероятно, обусловлено более равномерным распределением углеродных волокон в объеме композиционного материала.

Ключевые слова: полимерный композиционный материала, углеродные волокна, антифрикционные свойства, амплитудная модуляция, ультразвук

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-118-131

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № FSGF-2024-0003

ЛИТЕРАТУРА

1. Youwang T., Yong H., Lei Z., Miao S. Low friction and wear characteristics formed by mecha-nically induced surface nanocrystallization: A review of recent advances // Friction. – 2024. – V. 13. – N 6. – P. 9440971. URL: https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9440971
2. Holmberg K., Erdemir A., Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions // Friction. – 2017. – V. 5. – P. 263–284. URL: https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5
3. Tang Z., Li H. A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007-pre-sent) // Current Opinion in Solid State & Materials Science. – 2014. – V. 18. – N 3. – P. 119–139. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.cossms.2014.02.002
4. Mello J. D. B. De. Carbon-based solid lubricants: An overview // Friction. – 2025. – V. 13. – N 1. – P. 9441017. URL: https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9441017
5. Wang J., Yan F., Xue Q. Tribological behavior of PTFE sliding against steel in sea water // Wear. – 2009. – V. 267. – N 9–10. – P. 1634–1641. URL: https://doi.org/10.1007/s11434-009-0578-4
6. Гулькин А. В., Теплоухов А. А., Семенюк Н. А., Сазанков А. П., Карташова А. Е., Скакун Д. В. Влияние объемной модификации наноразмерными частицами диоксида циркония на структуру и механические свойства композиционного материала на основе политетрафторэтилена // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2024. – Т. 8. – № 4. – С. 100–106. URL: https://doi.org/10.25206/2588-0373-2024-8-4-100-106
7. Conte M., Fernandez B., Igartua A. Effect of surface temperature on tribological behavior of PTFE composites // Surface Effects and Contact Mechanics X. – 2011. – V. 71. – P. 219–230. URL: https://doi.org/10.2495/978-1-78466-167-0/019
8. Wang J., Zhao H., Huang W., Wang X. Investigation of porous polyimide lubricant retainers to improve the performance of rolling bearings under conditions of starved lubrication // Wear. – 2017. – V. 380–381. – P. 52–58. URL: https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.008
9. Wan H., Ye Y., Chen L., Chen J., Zhou H. Influence of Polyfluo-Wax on the Friction and Wear Behavior of Polyimide/Epoxy Resin–Molybdenum Disulfide Bonded Solid Lubricant Coating // Tribology Transacations. – 2016. – V. 59. – N 5. – P. 889–895. URL: https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1118585
10. Li J. The Effect of Carbon Fiber Content on the Mechanical and Tribological Properties of Carbon FiberReinforced PTFE Composites // Polymer-Plastics Technology and Engineering. – 2010. – V. 49. – N 4. – P. 332–336. URL: https://doi.org/10.1080/03602550903413995
11. Li H., Wang G., Wu Y., Jiang N., Niu K. Functionalization of carbon nanotubes in polystyrene and properties of their composites: a review // Polymers. – 2024. – V. 16. – N 6. – P. 770. URL: https://doi.org/10.3390/polym16060770
12. Arunachalam S. J., Saravanan R., Sathish T., Venkatesh R. Integration of nanographene and action of fiber sequences on functional behaviour of composite laminates // International Polymer Processing. – 2025. – V. 40. – N 2. – P. 205–215. URL: https://doi.org/10.1515/ipp-2024-0149
13. Kakhramanov N. T., Allahverdiyeva K. V., Mustafayeva F. A. Structure and properties of conducting composites based on polyolefins and carbon black // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2022. – V. 95. – N 8. – P. 1146–1152. URL: https://doi.org/10.1134/S1070427222080092

14. Маркова М. А. Разработка композиционных материалов триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена, модифицированного углеродным волокнистым наполнителем: специальность: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – 2024. – 177 с.
15. Panda A., Dyadyura K., Valícek J., Harnicarova M. Manufacturing Technology of Composite Materials-Principles of Modification of Polymer Composite Materials Technology Based on Polytetrafluoroethylene // Materials. – 2017. – V. 10. – N 4. – P. 377. URL: https://doi.org/10.3390/ma10040377
16. Grakovich P., Sheiestova V. A., Ivanov L. F., Tseluev M., Zhandarov S. Investigation of structure and properties of boundary layers in composite materials with PTFE matrix // Polymer materials and technologies. – 2017. – V. 3. – N 3. – P. 14–26. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21113808
17. Сученинов П. А., Адаменко Н. А., Сергеев Д. В. Разработка и исследование компози-ционных материалов для уплотнений воздушных поршневых компрессоров // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2009. – № 11 (59). – С. 66–69.
18. Negrov D. A., Putintsev V. Yu., Knyazev E. V. The effect of ultrasonic and low-frequency vibrations during pressing on the morphology and tribological properties of a polymer composite // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2025. – V. 39. – N 3. – P. 1141–1149. URL: https://doi.org/10.1007/s12206-025-0210-9
19. Zhai W. Z., Zhou K. Nanomaterials in superlubricity // Advanced Functional Materials. – 2019. – V. 29. – N 28. – P. 1806395. URL: https://doi.org/10.1002/adfm.201806395
20. Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Князев Е. В., Глотов А. И., Вебер Д. А. Влияние энергии колебательных процессов на структуру и свойства композиционного материала // Вопросы материаловедения. – 2025. – № 3 (123). – С. 122–135. URL: https://doi.org/10.22349/1994-6716-2025-123-3-122-135
21. Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Глотов А. И. Влияние усовершенствованной технологии прессования на структурообразование политетрафторэтилена // Ползуновский вестник. – 2024. – № 1. – С. 240–244. URL: https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.031
22. Петрова П. Н., Маркова М. А., Федоров А. Л. Исследование влияния технологий получения на свойства и структуру композитов на основе ПТФЭ // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 162–171. URL: https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-162-171
23. Sawae Y., Morita T., Takeda K., Onitsuka S., Kaneuti J., Yamaguchi T., Sugimura J. Friction and wear of PTFE composites with different filler in high-purity hydrogen gas // Tribology International. – 2021. – V. 157. – P. 106884. URL: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106884

УДК 621.791.46:621.643.411.4

ПРИВАРКА ДЕТАЛИ С ЗАКЛАДНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ К ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ТРУБЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

М. А. НИКОЛАЕВА, канд. физ.-мат. наук, Н. П. СТАРОСТИН, д-р техн. наук, Р. С. ТИХОНОВ, канд. техн. наук, Е. В. ДАНЗАНОВА, канд. техн. наук, О. А. АММОСОВА, канд. техн. наук

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Якутск, ул. Петровского, д.2. E-mail: dhv4071@mail.ru

Поступила в редакцию 26.03.2026

После доработки 9.04.2026

Принята к публикации 30.04.2026

Разработана методика определения мощности закладного нагревателя на стадии охлаждения при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе в условиях низких температур, основанная на решении трехмерной обратной задачи теплопроводности. Установлено, что управление тепловым процессом с расчетной мощностью нагревателя обуславливает формирование надмолекулярной структуры материала сварного шва и зоны термического влияния, способствующей повышению прочности соединения.

Ключевые слова: полиэтилен, седловой отвод, тепловой процесс сварки, обратная задача, управление, кристаллизация, надмолекулярная структура, прочность

DOI: 10.22349/1994-6716-2027-127-3-132-141

ЛИТЕРАТУРА

1. Комаров Г. В. Соединения деталей из полимерных материалов: Учебное пособие. – СПб.: Профессия, 2006. – 592 с.

2. Данзанова Е. В. Сварка полиэтиленовых труб для газопроводов при естественно низких температурах: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10: защищена 22.05.2012. – М.: Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина. – 2012. – 143 с.
3. Шурайц А. Л., Каргин В. Ю., Вольнов Ю. Н. Газопроводы из полимерных материалов: Пособие по проектированию, строительству и эксплуатации. – Саратов: Изд-во «Журнал «Волга – XXI век», 2007. – 612 с.
4. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Совершенствование управления охлаждением при электро-муфтовой сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 3 (115). – С. 147–158. URL: https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-115-3-147-158
5. Авдонин Н. А. Математическое описание процессов кристаллизации. – Рига: Зинатне, 1980. – 180 с.
6. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
7. Chebbo Z, Vincent M., Boujlal A. et al. Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes // Polymer Engineering And Science. –2015. – V. 55. – N 1. – P. 123–131.
8. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
9. Стренг Г., Фикс Д. Теория метода конечных элементов — М.: Мир, 1977. – 349 с.
10. Библиотека FEniCS [Электронный ресурс]. – 2025 – URL: http://fenicsproject.org/ (дата обращения 11.11.2025).
11. Патент № 2849117 Российская Федерация, МПК F16L 21/00, F16L 47/00. Способ сварки полимерных труб соединительными деталями с закладными нагревателями: № 2025109018: заявл. 11.04.2025: опубл. 22.10.2025 / Старостин Н. П., Аммосова О. А., Петров Д. Д. [и др.]; патентообладатель ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН».
12. Алифанов О. М., Ненарокомов А. В., Салосина М. О. Обратные задачи в тепловом проектировании и испытаниях космических аппаратов. – М.: МАИ, 2021. – 158 с.
13. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Эффективность управления движением фронта кристаллизации при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур // Тепловые процессы в технике. – 2025. – Т. 17. – № 5. – С. 235–243.

УДК 678.073+549.642.41

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ПОЛИМЕТИЛЕН-*п*-ТРИФЕНИЛОВОГО ЭФИРА БОРНОЙ КИСЛОТЫ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АБС-ПЛАСТИКА, НАПОЛНЕННОГО ВОЛЛАСТОНИТОМ

В. Г. УСКОВ[1], А. В. ОЖОГИН[2], С. В. СТРОКОВА[1], С. Г. ИЛЬЯСОВ[1]

[1] Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, 659322, Сибирский федеральный округ, Алтайский край, Бийск, Социалистическая ул., 1е. E-mail: v_uskov98@mail.ru

[2] Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» 659305, Сибирский федеральный округ, Алтайский край, г. Бийск, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, 27

Поступила в редакцию 5.02.2026

После доработки 16.03.2026

Принята к публикации 7.04.2026

Данная работа посвящена разработке универсального полимерного композиционного материала на основе АБС-пластика, который подходит для переработки различными методами – литье под давлением и 3D-печать. В качестве наполнителя использован природный волластонит. Были получены композиты на основе АБС-пластика содержанием волластонита до 40%. Наилучшим сочетанием свойств обладает состав АБС+20% волластонита, так как происходит увеличение модуля упругости на 6% у литьевых образцов и 14% – напечатанных на 3D-принтере (по отношению к чистому АБС-пластику). Добавка полиметилен-*п*-трифенилового эфира борной кислоты в указанный выше композит позволила увеличить предел прочности еще на 6% и модуль упругости на 28% у литьевых образцов. У образцов композита, изготовленных 3D-печатью, добавка полиметилен-*п*-трифенилового эфира борной кислоты увеличила предел прочности на 6% и модуль упругости 19%. Таким образом, показана способность полиметилен-*п*-трифенилового эфира борной кислоты увеличивать взаимодействие на границе раздела фаз полимер – наполнитель. Предложенные композиты были переработаны методом литья под давлением, также на их основе были получены филаменты для 3D-печати. Обнаружен схожий характер изменения свойств образцов, изготовленных разными методами. Обнаружено, что волластонит образует агломераты в указанном композите. Удалось получить полимерный композиционный

материал с улучшенными физико-механическими характеристиками, который может быть использован для изготовления функциональных деталей различными методами – литьем под давлением и 3D-печатью.

Ключевые слова: волластонит, 3D-печать, полимерные композиционные материалы, аддитивные технологии, филамент, АБС-пластик, FDM

DOI: 10.22349/1994-6716-2027-127-3-142-151

Работа выполнена в рамках базового проекта № FUFE-2024-0011 «Разработка перспективных технологий малотоннажной химии» при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, Бийск).

ЛИТЕРАТУРА

1. Petrova G. N., Larionov S. A., Platonov M. M., Perfilova D. N. Thermoplastic materials of new generation for aviation // Aviation Materials and Technologies. – 2017. – P. 420–436. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436
2. Lobov E., Dobrydneva A., Vindokurov I., Tashkinov M. Effect of Short Carbon Fiber Reinforcement on Mechanical Properties of 3D-Printed Acrylonit URL:rile Butadiene Styrene // Polymers. – 2023. – V. 15 (9). – Art. 2011. URL: https://doi.org/10.3390/polym15092011
3. Adeniran O., Cong W., Bediako E., Aladesanmi V. (2021). Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites: The Effect of Fiber Content on Compressive Properties // Journal of Composites Science. – V. 5 (12). – Art. 325. URL: https://doi.org/10.3390/jcs5120325
4. Yagrushkina I. N., Dyuldina M. V., Nogachev A. G., Yakunin K. P. Development of impact resistant polymer composition ABS/PC for automotive industry // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. – 2021. – V. 2. – P. 80–88. DOI: https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-2-80-88
5. Moore J. D. Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) – A Review // Composites. – 1973. – V. 4. – P. 118–130. URL: https://doi.org/10.1016/0010-4361(73)90585-5
6. Kovalenko R. V. Modern polymeric materials and 3D printing technologies // Bulletin of Kazan Technological University. – 2015. – V. 18/ – Is. 1. – P. 263–266.
7. Chan J. X., Wong J. F., Hassan A., Mohamad Z., Othman N. Mechanical properties of wollastonite reinforced thermoplastic composites: A review // Polymer Composites. – 2019. – P. 1–35. URL: https://doi.org/10.1002/pc.25403
8. Wong J. F., Chan J. X., Hassan A. B. et al. Thermal and flammability properties of wollastonite-filled thermoplastic composites: a review // J Mater Sci. – 2021. – V. 56. – P. 8911–8950. URL: https://doi.org/10.1007/s10853-020-05255-5
9. Wang C. L., Zheng S. L., Wang H. F. Evaluation of Mechanical Properties of Polyamide 6(PA6) Filled with Wollastonite and Inorganic Modified Wollastonite // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – V. 217–219. – P. 522–525. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.217-219.522
10. Yuan X., Easteal A. J., Bhattacharyya D. Mechanical performance of rotomoulded wollastonite-reinforced polyethylene composites // International Journal of Modern Physics B. – 2007. – V. 21 – N 07. – P. 1059–1066. URL: https://doi.org/10.1142/s0217979207036916
11. Meng Xiang Hai et al. Evaluation of Mechanical Properties of Wollastonite/SBR Composite // Advanced Materials Research. – 2011. – V. 217–218. – P. 286–289. URL: https://doi.org/10.4028/www.scienti-fic.net/amr.217-218.286.
12. Tozhiev, P.Zh., Normurodov, B.A., Turaev, Kh.Kh., Dzhalilov, A.T., Physicomechanical properties of composite materials based on polyethylene and wollastonite, 2018, 233.1–233.
13. Данилова С. Н., Ярусова С. Б., Охлопкова А. А. и др. Влияние синтетического волластонита с различной морфологией частиц на формирование поверхности трения композитов на основе СВМПЭ // Материаловедение. – 2025. – № 4. – С. 26–35. DOI: 10.31044/1684-579X-2025-0-4-26-35
14. Gottlieb E. M., Khasanova A.R., Galimov E. R., Sokolova A. G. Epoxy antifriction materials with wollastonite // Bulletin of MGSU. –2019. – V. 14. – Is. 3 (125). – P. 311–321.
15. Khasanova A. R. Effect of modification of epoxy compositions with wollastonite on the hardness of materials for mechanical engineering. – 2017. – P. 373–376.
16. Gotlib E. M., Galimov E. R., Khasanova A. R. et al. Dynamic mechanical properties of epoxy materials filled with wollastonite // Bulletin of the Technological University. – 2018. – V. 21. – N 1. – P. 5–9.
17. Belousov A. M. Friction polymer composition. – 2004. – N 2275394 C2.
18. Savostin I. K. Asbestos-free friction polymer composition. – 2009. – No 2007134233/04.
19. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Использование волластонита в производстве керамических изделий // Материаловедение. – 2004. – № 10. – С. 47–52.

20. Devi S. Y., Jagadish D. R. L., Srikanth S. Studies on wollastonite reinforced recycled ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) composites // International journal of scientific research in engineering and management. – 2022. – V. 3. – P. 1–4. DOI: 10.55041/IJSREM11577
21. Huang, Ts., Enhancement of mechanical and tribotechnical properties of UHMWPE composites by incorporating silicon-containing fibers functionalized with silane reagents: doctoral thesis, Tomsk, 2021.
22. Panin S. V., Kornienko L. A., Buslovich D. G. et al. Effect of UHMWPE powder size onto tribological and mechanical properties of composites loaded with functionalized chopped glass fibers // AIP Conference Proceedings: Proceedings Of The International Conference, Tomsk, 01–05 October 2019. – V. 2167. – Tomsk: AIP Conference Proceedings, 2019. – P. 020265. DOI: 10.1063/1.5132132
23. Panin S. V., Kornienko L. A., Huang Ts. et al. Mechanical and tribological properties of compo-sites based on UHMWPE with glass fiber functionalized with silane-containing modifiers (part 2) // Assembly in mechanical engineering, instrument making. – 2019. – N 9. – P. 407–414.
24. Novopoltseva O. M., Keibal N. A. The influence of mineral microfibers coated with organophosphorus compounds on the properties of elastomeric fire- and heat-protective materials. – 2022. – P. 511–521.
25. Kurbanova, R.V., Kahramanov, N.T., Shatirova, M.I. et al., Synthesis of organo-silicon compounds for finishing nanocomposites based on quartz and high-density polyethylene // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol., 2018, V. 61, No 2, pp. 65–72. URL: https://doi.org/10.6060/tcct.20186102.5626
26. Ozhogin A. V., Lensky M. A., Korabelnikov D. V., Svirina Yu. Yu. Study of organoboron oligomers as strength modifiers for fiberglass plastics // Plastics. – 2014. – N 5–6. – P. 33–36.
27. Korabelnikov D. V. Improving the performance characteristics of polymer friction compositions by adding polymethylene-*p*-triphenyl ether of boric acid: doctoral thesis. Biysk, Russia, 2012
28. Ozhogin A. V., Lensky M. A., Korabelnikov D. V., Novitsky A. N. Organoboron oligomers as UV stabilizers for fiberglass // Plastics. – 2018. – N 11–12. – P. 58–60.
29. Danilova S. N., Dyakonov A. A., Vasilev A. P., Okhlopkova A.A., Tuisov A. G., Kychkin A. K., Kychkin A. A. Effect of Borpolymer on Mechanical and Structural Parameters of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene // Nanomaterials (Basel). – 2021. – V. 11. – Is. 12. – Art. 3398. URL: https://doi.org/10.3390/nano11123398
30. Uskov V. G., Ozhogin A. V., Budovich K. I. et al. Study of UV-Resistance of ABS Plastic Modified with Polymethylene-*p*-Triphenyl Ester of Boric Acid // South Siberian Scientific Bulletin. – 2024. – N 3 (55). – P. 129–134.

УДК 621.762.34:621.891

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВВОДА УПРОЧНЯЮЩИХ ДОБАВОК ИЗ ПОРОШКА ДЕТОНАЦИОННОГО НАНОАЛМАЗА НА СТРУКТУРУ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

М. П. АКИМОВА[1], канд. физ.-мат. наук, П. П. ШАРИН[2], д-р техн. наук, А. В. СИВЦЕВА[2], С. П. ЯКОВЛЕВА[2], д-р техн. наук

[1] ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1. E-mail: administration@iptpn.ysn.ru

[2] Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, 677000, ул. Петровского, 2. E-mail: presidium@prez.ysn.ru

Поступила в редакцию 27.03.2026

После доработки 17.04.2026

Принята к публикации 17.04.2026

В работе исследовано влияние способа введения упрочняющих добавок из порошка детонационного наноалмаза на структуру и трибологические характеристики композиционного материала на основе оловянной бронзы (80% Cu – 20% Sn). Проведен сравнительный анализ двух методов ввода наночастиц алмаза: механического смешивания с помощью гравитационной мельницы и ультразвукового диспергирования. Комплексом методов установлено, что способ получения порошковой смеси оказывает сущест-венное влияние на плотность, пористость, фазовый состав, равномерность распределения наноалмазов и трибологические свойства композита. Материал, полученный с использованием механического смешивания, характеризуется более равномерным распределением наноалмазных частиц, меньшим коэффициентом трения (0,24±0,02) и более стабильной поверхностью после испытаний на износ (0,84±0,12), одна-ко обладает большей пористостью (6%) и несколько повышенным линейным ($1{,}84\cdot10^{-5}$ м) и массовым износом ($1{,}33\cdot10^{-2}$ г) по сравнению с

образцом, полученным ультразвуковым диспергированием. Результаты работы показывают, что выбор метода введения наноалмазных частиц должен учитываться при разработке антифрикционных композиционных материалов на основе оловянной бронзы.

Ключевые слова: композиционные материалы, оловянная бронза, наноалмазы, механическое смешивание, ультразвуковое диспергирование, структура, трибологические свойства, износостойкость, коэф-фициент трения, пористость

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-152-165

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный № НИОКТР 124032600081-1). Работа выполнена с использованием приборов и оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райков Ю. Н., Ашихмин Г. В., Полухин В. П., Гуляев А. С. Медные сплавы: марки, свойст-ва, применение: справочник / под общ. ред. Ю. Н. Райкова. – М.: Институт «Цветметобработка», 2011. – 456 с.
2. Livramento V., Correia J.B., Shohoji N., Osawa E. Nanodiamond as an effective reinforcing component for nano-copper // Diamond and Related Materials. – 2007. – V. 16. – P. 202–204.
3. Safonova M. N., Fedotov A. A., Syromiatnikova A. S., Structural hardening of composite materials based on a metal matrix // Procedia Structural Integrity. – 2020. – V. 30. – P. 136–143.
4. Correia J. B., Livramento V., Shohoji N., Tresso E., Yamamoto K., Taguchi T., Hanada K., Ōsawa E. Bulk Copper-nanodiamond Nanocomposites; Processing and Properties // Materials Science Forum. – 2008. – V. 587–588. – P. 443–447.
5. Смирнов В. М., Тимофеев Д. А., Шалунов Е. П. Дисперсно-упрочненная связка на основе порошковой меди для алмазного инструмента // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы II международной научно-практической конференции. – Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, 2016. – С. 317–320.
6. Popov V. A. Several Aspects of Application of Nanodiamonds as Reinforcements for Metal Matrix Composites // Applied Science. – 2021. – V. 11. – P. 4695.
7. Hanada K., Nakayama K., Sano T., Imahori A., Negishi H., Mayuzumi M. Fabrication and Characterization of Cluster Diamond Dispersed Copper-Based Matrix Composite // Materials and Manufacturing Processes. – 2000. – V. 15 (3). – P. 325–345.
8. Попов В. А. Разработка способов получения и улучшения свойств композиционных материалов с применением нанопорошков // Дис. … докт. техн. наук. – М.: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2018. – 359 с.
9. Сивцева А. В., Акимова М. П., Шарин П. П., Яковлева С. П. Влияние модификации наноалмазами на трибологические характеристики композиционного материала на основе оловянной бронзы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2025. – Т. 27. – № 2. – С. 64–73.
10. Попов В. А., Зайцев В. А. Исследование возможности применения наноалмазов в композиционных материалах для упрочнения алюминиевой матрицы // Труды V Международной конференции «Новые перспективные материалы и технологии их получения–2010». – Волгоград, 2010. – С. 73–74.
11. Hanada K., Matsuzaki K., Sano T. Thermal properties of diamond particle-dispersed Cu composites // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – V. 153–154. – P. 514–518.
12. Liang Y., Meinhardt T., Jarre G., Ozawa M., Vrdoljak P., Schöll A., Reinert F., Krueger A. Deagglomeration and surface modification of thermally annealed nanoscale diamond // Journal of Colloid and Interface Science. – 2011. – V. 354 (1). – P. 23–30.
13. Josset S., Muller O., Schmidlin L., Pichot V., Spitzer D. Nonlinear optical properties of detonation nanodiamond in the near infrared: Effects of concentration and size distribution // Diamond and Related Materials. – 2013. – V. 32. – P. 66–71.
14. Elomaa O., Oksanen J., Hakala T. J., Shenderova O., Koskinen J. A comparison of tribological properties of evenly distributed and agglomerated diamond nanoparticles in lubricated high-load steel–steel contact // Tribology International. – 2014. – V. 71. – P. 62–68.
15. Bobrovnitchii G. S., Skury A. L. D., Monteiro S. N., Tardim R. C. Effect of nanodiamond addition on the mechanical properties of polycrystalline metallic and polymeric composites // Material Science Forum. – 2010. – V. 660–661. – P. 848–853.

16. Kaftelen H., Öveçoğlu M. L. Microstructural characterization and wear properties of ultra dispersed nanodiamond (UDD) reinforced Al matrix composites fabricated by ball milling and sintering / H. Kaftelen // Journal of Composite Materials. – 2012. – V. 46. – P.1521–1534.
17. Nunes D., Livramento V. , Mardolcar U. V., Correia J. B., Carvalho P. A. Tungsten–nanodiamond composite powders produced by ball milling // Journal of Nuclear Materials. – 2012. – V. 426 (1–3). – P. 115–119.
18. Syam Sundar L., Shusmitha K., Singh M. K., Sousa A. C. M. Electrical conductivity enhancement of nanodiamond–nickel (ND–Ni) nanocomposite based magnetic nanofluids // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2014. – V. 57. – P. 1–7.
19. Шарин П. П. Новый метод приготовления твердосплавной шихты с упрочняющими наночастицами для изготовления матриц алмазных инструментов // Вестник СВФУ. – 2016. – Т. 51. – № 1. – С. 78–87.
20. Патент № 2525192 РФ. Способ приготовления твердосплавной шихты с упрочняющими частицами наноразмера / П. П. Шарин, М. П. Лебедев, Г. Г. Винокуров, В. Е. Гоголев, П. П. Петров, А. А. Платонов, В. П. Атласов. Заявл. 07.05.2013, опубл. 10.08.2014.
21. Патент № 2586979 РФ. Способ получения композиций из полимера и наноразмерных наполнителей / Т. А. Охлопкова, П. П. Шарин, А. А. Охлопкова, Р. В. Борисова. Заявл. 06.06.2015, опубл. 10.06.2016.

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.791.042

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛА ШВА, ВЫПОЛНЕННОГО МЕХАНИЗИРОВАННЫМ СПОСОБОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ

А. Л. ГАВШИНСКИЙ[1], канд. техн. наук, П. В. МЕЛЬНИКОВ[2], канд. техн. наук, В. Б. ГРИБАНОВА[2]
[1] ООО «Магмавэлд-СПб», 198517, Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Новые заводы, 56/5. E-mail: Russia@magmaweld.com
[2] НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49. E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 1.04.2026
После доработки 13.05.2026
Принята к публикации 15.05.2026

Рассмотрен вопрос постоянства сварочно-технологических, механических свойств и химического состава наплавленного металла при сварке порошковой проволокой марки 48ПП-8Н при изменении параметров режима сварки (сварочного тока, напряжения дуги, скорости сварки и состава защитного газа).

Ключевые слова: порошковая проволока, погонная энергия, механические свойства
DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-166-172

ЛИТЕРАТУРА

1. Поздняков В. Д., Маркашова Л. И., Жданов С. Л., Бердникова Е. Н., Завдовеев А. В., Максименко А. А. Сопоставление методик оценки влияния термического цикла сварки на ударную вязкость металла ЗТВ сварных соединений низколегированных сталей // Автоматическая сварка. – 2016. – № 10 (757). – С. 28–34.
2. Поздняков В. Д., Завдовеев А. В., Жданов С. Л., Максименко А. В. Влияние термического цикла сварки на структуру и свойства металла ЗТВ высокопрочной стали контролируемой прокатки // Автоматическая сварка. – 2018. – № 10. – С. 11–16.
3. Кархин В. А., Тишков М. К., Алдаие Я., Паршин С. Г., Левченко А. М. Методика прогнозирования микроструктуры и механических свойств зоны термического влияния сварного соединения из высокопрочной стали в различных средах // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2024. – № 8 (830). – С. 60–66.
4. Wang W., Wang H. R. Laboratory Development of High Strength Steel Plates with Excellent HAZ Toughness at Large Heat Inputs. – Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co, Ltd, Shanghai 201900, China.
5. Фастов С. А., Зорин И. В., Харламов В. О., Лысак В. И. Исследование влияния погонной энергии на структуру наплавленного металла бейнитного класса // Известия ВолгГТУ. – 2022. – С. 58–62.
6. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. Ч. 3. Техническое наблюдение за изготовлением материалов.

7. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. 14. Сварка.
8. ГОСТ Р 52927-2015. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия.
9. ГОСТ 26271-84. Проволока порошковая для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей. Общие технические условия.
10. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.
11. ГОСТ 1778-2022. Металлопродукция из сталей и сплавов. Металлографические методы определения неметаллических включений.

УДК 621.791.92

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННОГО ПОКРЫТИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ СПОСОБОМ ЛЕНТОЙ ТИПА 25% Cr – 22% Ni – 2% Mo – 0,2% N ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО В СРЕДАХ СИНТЕЗА КАРБАМИДА

Н. И. ЗАТОКОВЕНКО[1], М. Н. ТИМОФЕЕВ[2], канд. техн. наук, Д. Х. СТАРЦЕВА[1], А. Ю. ПАНЬШИН[3], Е. И. КУЦЕНКО[1], А. С. САВЕЛКОВ[1]

[1] АО «Уралхиммаш», 620010, г. Екатеринбург, пер. Хибиногорский, 33

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

[3] АО «НИИК», 606008, г. Дзержинск, ул. Грибоедова, дом 31. E-mail: Nikolay.Zatokovenko@sinara-group.com

Поступила в редакцию 10.06.2026
После доработки 15.06.2026
Принята к публикации 20.06.2026

Приведены результаты исследований структуры, механических и коррозионных свойств многослойного однородного наплавленного покрытия на низколегированную сталь 14ХГС, выполненного электро-шлаковым способом лентой типа 25% Cr – 22% Ni – 2% Mo – 0.2% N без последующей термической обработки. Показано, что электрошлаковая наплавка указанной лентой обеспечивает высокое качество наплавленной поверхности, химический состав которой соответствует составу стали 02Х25Н22АМ2, поверхностные слои коррозионно-стойки в средах синтеза карбамида. Несмотря на отсутствие термической обработки, зона термического влияния не имеет повышенных значений твердости. Структура наплавленного металла представлена аустенитом и не имеет дефектов в виде горячих трещин. Применение технологии электрошлаковой наплавки обеспечивает равномерность распределения твердости по всему сечению наплавленной детали, что обеспечивает высокую деформационную способность, подтвержденную результатами испытаний образцов на статический изгиб.

Ключевые слова: антикоррозионная наплавка, электрошлаковая наплавка, твердость наплавленного металла, межкристаллитная коррозия, аустенитная структура
DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-173-182

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузюков А. Н., Крикун В. П. Межкристаллитная коррозия оборудования производства карбамида, изготовленного из низкоуглеродистых аустенитных сталей // Защита металлов. – 1996. – Т. 32. – № 4. – С. 364–367.
2. Фельдгандлер Э. Г., Савкина Л. Я., Кристаль М. М. и др. Новая коррозионно-стойкая сталь 02Х25Н22АМ2 для сред повышенной агрессивности // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1992. – № 8. – С. 27–29.
3. Фельдгандлер Э. Г., Свистунова Т. В., Савкина Л. Я., Лапшина О. Б. Особо низкоуглеродистая азотсодержащая аустенитная сталь 02Х25Н222АМ2 // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 2. – С. 27–31.
4. Susan Pak, Solveig Rigdal, Leif Karlsson, Ann-Charlotte Gustavsson. Electroslag and Submerged Arc Stainless Steel Strip Cladding // Anti-Corrosion Methods and Materials. – 1998. – Т. 45. – N 1P. 41–47.
5. Тимофеев М. Н., Морозовская И. А., Галяткин С. Н., Затоковенко Н. И., Куценко Е. И., Лозовицкий Н. А. Исследование коррозионно-стойких наплавок оборудования АЭУ, выполненных ленточным электродом дуговым и электрошлаковым способами // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 1 (105). – С. 94–106.

6. Митрофанов В. М., Мастенко В. Ю., Волосов Н. А., Лобанов Е. С. Исследование и аттестация материалов и технологий автоматической электрошлаковой наплавки лентой под флюсом и приварки внутрикорпусных устройств к внутренним поверхностям корпусов емкости системы быстрого ввода бора // Тяжелое машиностроение. – 2021. – № 7–8. – С. 10–16.
7. Мастенко В. Ю., Волобуев Ю. С., Волосов Н. А., Митрофанов В. М., Симонова О. Н., Королев С. Ю., Потапов Н. Н. Исследование свойств наплавленного металла и плакированного соединения, полученного при электрошлаковой наплавке однородного однослойного антикоррозионного покрытия на внутреннюю поверхность труб главного циркуляционного трубопровода АЭУ // Сварочное производство. – 2021. – № 9. – С. 3–14.
8. Sattari-Far I., Andersson M. Cladding Effects on Structural Integrity of Nuclear Components // Ski Report. – 2006. – V. 23. – P. 4–5.
9. Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Морозовская И. А. Проблемы создания сварочных материалов для наплавки антикоррозионного покрытия корпусов реакторов атомных энергетических установок с водным теплоносителем // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 2 (42). – С. 129–143.
10. EN ISO 14343: 2009. Welding consumables – Wire electrodes, strip electrodes, wires and rods for arc welding of stainless and heat resisting steels – Classification.
11. EN ISO 14174:2019. Welding consumables – Fluxes for submerged arc welding and electroslag welding – Classification.
12. ГОСТ Р 54153-2010. Сталь. Метод атомно-эмиссионного спектрального анализа.
13. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.
14. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения.
15. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.
16. ГОСТ 6032-2017. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии.
17. ГОСТ 5632-2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.
18. ГОСТ Р 54803-2011. Сосуды стальные сварные высокого давления. Общие технические требования.
19. Paschhold R., Karlsson L., Gittos M. F. Disbonding of Austenitic Weld Overlays in Hydroprocessing Applications // The ESAB Welding and Cutting Journal. – 2007. – V. 62. – N 1. – P. 10–15.
20. Karlsson L., Pak S., Gustavsson A.C. Improved Disbonding Resistance And Lower Consumable Cost-New Strip Cladding Concept For Hydrogen Atmospheres // Svetsaren (ESAB Welding-WPSAmerica). – 2007. – V. 1.
21. Липпольд Д., Котеки Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющих сталей – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 467 с.
22. Сокол И. Я., Ульянин Е. А., Фельдгандлер Э. Г. и др. Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас. Справ. изд. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.

УДК 621.791.92:621.039.536.2

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ЛЕНТОЙ КОРПУСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АТОМНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

В. М. МИТРОФАНОВ, Н. А. ВОЛОСОВ, канд. техн. наук, Н. Н. ПОТАПОВ, д-р техн. наук, С. Ю. ВОЛОБУЕВ
115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4, корп. 1А

Поступила в редакцию 7.04. 2026
После доработки 15.04.2026
Принята к публикации 27.04.2026

Приведены сравнительные характеристики двух способов ленточной наплавки под флюсом. Показано преимущество электрошлаковой наплавки лентой (ЭШН). Описаны особенности материалов, применяемых при ЭШН, а также принцип работы магнитных систем, применяющихся для магнитного управления сварочной ванной при электрошлаковой наплавке лентой под флюсом. Впервые установлено влияние смещения ленты от зенита при наплавке цилиндрических поверхностей на химический состав антикоррозионного покрытия и, в частности, на стойкость против межкристаллитной коррозии (МКК). Установленные зависимости позволяют выполнять прогнозный расчет свойств металла однородного однослойного антикоррозионного покрытия (ООАП).

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, магнитное поле, керамический флюс, смещение от зенита
DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-183-195

ЛИТЕРАТУРА

1. Мастенко В. Ю., Старченко Е. Г., Волобуев Ю. С. Исследование процесса и разработка материалов и технологии электрошлаковой наплавки под флюсом коррозионного покрытия поверхнос-тей атомно-энергетического и химического оборудования // Тяжелое машиностроение. – 2011. – № 5. – С. 6–11.
2. Мастенко В. Ю., Волобуев Ю. С., Волосов Н. А, Митрофанов В. М., Симонова О. Н., Королев С. Ю. Исследование свойств наплавленного металла и плакированного соединения, полученного при электрошлаковой наплавке однородного однослойного антикоррозионного покрытия на внутреннюю поверхность труб главного циркуляционного трубопровода АЭУ // Технология машиностроения. – 2021. – № 2. – С. 15–26.
3. Huwer W., Einhorn F. Leistungssteigerung beim Unterpuver – Auftragschweissen mit Bandelektrode // DVS-Berichte. – 1974. – N 32. – P. 91–97.
4. Nahano S., Nishiyama N., Hiro T., Tsuboi J. MAGLAY Process – Electro-Magnetic Controlled Overlay Welding Process with ESW // Kawasaki Steel Technical Report. – 1981. – N 2.
5. Каленский В. К. Особенности и некоторые технологические характеристики процесса электрошлаковой наплавки одной электродной лентой (обзор) // Автоматическая сварка. – 1999. – № 3. – С. 16–21.
6. Seidel G., Hess H. Untersuchungen zum Elektro-Schlake-Plattieren mit Bandelektroden in waage-rechter Position // Abschlussbericht des Forschungsvorhabens. SLV Duisburg. – 1975. – N 2689.
7. Nahano S., Nishiyama N., Hiro T., Tsuboi J. MAGLAY Process – Electro-Magnetic Controlled Overlay Welding Process with ESW // Kawasaki Steel Technical Report. – 1980. – N 12. – V. 1. – P. 177–188.
8. Bemst A. V., Daemen R. Placage en conche d'acier inoxydable a bas C par soudage sous laitier electro-conducteur avec feuillard // DVS Berichte. – 1982. – N 75. – P. 17–20.
9. Волобуев Ю. С., Мастенко В. Ю., Волобуев С. Ю., Потапов Н. Н., Певкин П. С. Специальный керамический флюс для антикоррозионной ленточной наплавки в электрошлаковом режиме оборудования для АЭС и нефтехимии // Сварочное производство. – 2014. – № 11. – С. 6–12.
10. Волобуев Ю. С., Старченко Е. Г., Мастенко В. Ю., Волобуев С. Ю. Флюс для автоматической наплавки ленточным электродом / зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 02.07.2014. Патент на изобретение № 2526623 МПК B23K 35/362.
11. Потапов Н. Н., Волобуев Ю. С., Курланов С. А. Количественная оценка металлургических свойств сварочных флюсов // Сварочное производство. – 1980. – № 10. – С. 4–6.
12. Митрофанов В. М. Исследование влияния магнитного поля на характер формирования валиков при электрошлаковой наплавке лентой под флюсом однородного однослойного антикоррозионного покрытия. Ч. 1: Магнитное поле при электрошлаковой наплавке лентой. Разработка модели и расчет его величины // Тяжелое машиностроение. – 2024. – № 1–2. – С. 19–25.
13. Митрофанов В. М. Исследование влияния магнитного поля на характер формирования валиков при электрошлаковой наплавке лентой под флюсом однородного однослойного антикоррозионного покрытия. Ч. 2: Экспериментальное исследование особенностей взаимодействия собственного и внешнего магнитных полей // Тяжелое машиностроение. – 2024. – № 3. – С. 14–20.
14. Митрофанов В. М., Волосов Н. А. Исследование влияния формы магнитных наконечников на параметры внешнего магнитного поля при электрошлаковой наплавке лентой под керамическим флюсом // Сварочное производство. – 2025. – № 3. – С. 5–12.
15. Мастенко В. Ю., Волобуев Ю. С., Волосов Н. А., Митрофанов В. М., Симонова О. Н., Комолов В. Н. Электрошлаковая наплавка лентой под керамическим флюсом однородного однослойного антикоррозионного покрытия внутренней поверхности труб диаметром 850 и 990 мм для АЭС // Сварочное производство. – 2019. – № 11. – С. 29–37.
16. Тимофеев М. Н., Морозовская И. А., Галяткин С. Н., Затоковенко Н. И., Куценко Е. И., Лозовицкий Н. А. Исследование коррозионно-стойких наплавок оборудования АЭУ, выполненных ленточным электродом дуговым и электрошлаковым способами // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 1. – С. 94–106.

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.357.74:669.5'24:620.197

© 2026
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
http://www.crism-prometey.ru

РАЗРАБОТКА БЕЗБОРНОГО СУЛЬФАТНО-АЦЕТАТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СПЛАВОМ ЦИНК–НИКЕЛЬ

С. Ю. КИРЕЕВ, д-р техн. наук
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», 440026, Пенза, ул. Красная, д. 40

Поступила в редакцию 26.01.2026
После доработки 30.03.2026
Принята к публикации 12.05.2026

Предложен электролит на сульфатно-ацетатной основе без содержания борной кислоты для получения защитных покрытий сплавом Zn–Ni. Проведен анализ влияния технологических параметров (катодная плотность тока, соотношение концентраций ионов металлов, содержание ацетат- и цитрат-ионов, величина pH, температурный режим) на состав сплава и эффективность процесса. Установлены оптимальные параметры технологического процесса, обеспечивающие получение покрытий с содержанием никеля 12–15 мас.% при высоких значениях выхода по току 85–92%. Полученные покрытия характеризуются высокой устойчивостью к коррозионному воздействию в нейтральном солевом тумане (время до появления красной коррозии составляет 2000–3000 ч), что превосходит показатели существующих материалов. Стабильность электролита подтверждена испытаниями в режиме длительной работы при общей нагрузке до 300 ампер-часов на литр объема. Предложены состав электролита и технологические режимы, рекомендуемые для внедрения в производственные процессы промышленного назначения.

Ключевые слова: электроосаждение, сплав Zn–Ni, безборный электролит, сульфатно-ацетатный, коррозионная стойкость, выход по току
DOI:10.22349/1994-6716-2026-127-3-196-207

ЛИТЕРАТУРА

1. Koch G. Cost of corrosion: Trends in oil and gas corrosion research and technologies // Woodhead Publishing. – 2017. – P. 3–30. DOI: 10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2
2. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast) // Official Journal of the European Union. – 2011. OJ L 174, 01.07.2011. – P. 88–110.
3. Fashu S., Khan R. Recent work on electrochemical deposition of Zn–Ni (-X) alloys for corrosion protection of steel // Anti-Corrosion Methods and Materials. – 2019. – V. 66. – N 1. – P. 45–60. DOI: 10.1108/ACMM-06-2018-1957
4. Abou-Krisha M. M. Electrochemical studies of zinc–nickel codeposition in sulphate bath // Applied Surface Science. – 2005. – V. 252. – Is. 4. – P. 1035–1048. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.01.161
5. Regulation (EC) No 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures. – OJ L 353, 31.12.2008. – P. 1–1355.
6. Maniam K. K., Paul S. Progress in electrodeposition of zinc and zinc nickel alloys using ionic liquids // Applied Sciences. – 2020. – V. 10. – Is. 15. – P. 5321. DOI: 10.3390/app10155321
7. Anwar S., Zhang Y., Khan F. Electrochemical behaviour and analysis of Zn and Zn–Ni alloy anticorrosive coatings deposited from citrate baths // RSC Advances. – 2018. – V. 8. – N 51. – P. 28861–28873. DOI: 10.1039/C8RA04650F
8. Beltowska-Lehman E., Ozga P., Swiatek Z., Lupi C. Electrodeposition of Zn–Ni protective coatings from sulfate–acetate baths // Surface and Coatings Technology. – 2002. – V. 151–152. – P. 444–448. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01614-0
9. Mosavat S. H., Shariat M. H., Bahrololoom M. E. Study of corrosion performance of electrode-posited nanocrystalline Zn–Ni alloy coatings // Corrosion Science. – 2012. – V. 59. – P. 81–87. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.02.012
10. Bernasconi R. et al. Electrodeposition of ZnNi Alloys from Ethylene Glycol for Corrosion Protection // Electrochemical Society Meeting Abstracts – 2020. – N 20. – P. 1228–1228. DOI: 10.1149/MA2020-01201228mtgabs
11. Bae S. H. et al. Effect of solution temperature on electrodeposition behavior of Zn–Ni alloy from alkaline zincate solution // ISIJ International. – 2022. – V. 62. – Is. 7. – P. 1522–1531. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-076
12. Kireev S. Yu., Perelygin Yu. P., Kireeva S. N., Jaskula M. J. Methods to determine the current efficiency in AC electrolysis // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2021. – V. 46. – P. 343–352. DOI: 10.1007/s13369-020-04786-y
13. Hegde A. C., Venkatakrishna K., Eliaz N. Electrodeposition of Zn–Ni, Zn–Fe and Zn–Ni–Fe alloys // Surface and Coatings Technology. – 2010. – V. 205. – Is. 7. – P. 2031–2041. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.102

14. Hosseini M. G., Ashassi-Sorkhabi H., Ghiasvand H. A. Y. Electrochemical studies of Zn–Ni alloy coatings from non-cyanide alkaline bath containing tartrate as complexing agent // Surface and Coatings Technology. – 2008. – V. 202. – Is. 13. – P. 2897–2904. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.10.022
15. Anwar S., Khan F., Zhang Y. H. The Performance of Zn–Ni Alloy Coating Electrodeposited from Stabilized Bath // Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd. – 2022. – V. 1058. – P. 149–155. DOI: 10.4028/p-qxs29h
16. Chelaru J. D., Felecan M. O. The study of the corrosion zinc-nickel coated ST2 stainless steel // Machines. Technologies. Materials. 2023. – V. 17. – No 7. – P. 275–277.
17. Durairajan A. et al. Development of a New Electrodeposition Process for Plating of Zn–Ni–X (X = Cd, P) Alloys: I. Corrosion Characteristics of Zn–Ni–Cd Ternary Alloys // Journal of the Electrochemical Society. – 2000. – V. 147. – N 5. – P. 1781–1786. DOI: 10.1149/1.1393434
18. Кирикова Д. И., Киреева С. Н., Киреев С. Ю., Перелыгин Ю. П. Электроосаждение цинка из кислого лактатного электролита с использованием униполярного гальваностатического режима импульсного электролиза // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2016. – Т. 24. – № 3. – С. 32–38. DOI: 10.47188/0869-5326_2016_24_3_32
19. Kireev S. Yu., Frolov A. V. Electrodeposition of nickel coatings from acetate-chloride electrolyte using galvanostatic pulse electrolysis // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2021. – V. 57. – P. 1375–1379. DOI: 10.1134/S2070205121070078
20. Kireev S. Yu., Kozlov G. V., Kireeva S. N., Yangurazova A. Z., Kirilina Yu. N. The Effect of Electrolysis Modes on Internal Stresses in Electroplates // Russian Journal of Electrochemistry. – 2025. – V. 61. – N 11. – P. 773–778. DOI: 10.1134/S1023193525601007

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.039.531:669.15–194.56:620.194.2

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕАКТОРОВ СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА, канд. техн. наук, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул.Шпалерная, д. 49.
E-mail: npk6@crism.ru

Поступила в редакцию 23.04.2026
После доработки 20.05.2026
Принята к публикации 20.05.2026

Проведены исследования сопротивления коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) трех облученных аустенитных материалов в водной среде, имитирующей теплоноситель I контура проектируемого исследовательского реактора на воде со сверхкритическим давлением – МТИР. Две аустенитные хромоникелевые стали рассматриваются в качестве кандидатных материалов для внутрикорпусных устройств реактора, а третий материал рассматривается в качестве кандидатного для антикорро-зионной наплавки на корпус реактора. В результате выполненных автоклавных испытаний при различных уровнях напряжений и последующей идентификации микротрещин с помощью СЭМ для каждого материала определено значение порогового напряжения, ниже которого КРН отсутствует для рассматри-ваемого облу-ченного состояния материала. На основе полученных результатов выбраны материалы, позво-ляющие обеспечить отсутствие КРН в процессе эксплуатации реактора МТИР.

Ключевые слова: коррозионное растрескивание, облученные аустенитные материалы, автоклавные испытания, сверхкритическое давление, микротрещина, теплоноситель
DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-208-231

ЛИТЕРАТУРА

1. Седов А. А., Бландинский В. Ю., Котов Я. А. и др. Концепция ядерной энергетической установки на базе многоцелевого тестового исследовательского реактора малой мощности с легководным теплоносителем сверхкритических параметров // Теплоэнергетика. – 2023. – № 5. – С. 5–22.
2. Седов А. А., Пустовалов С. Б., Котов Я. А. и др. Развитие легководной технологии на базе энергетических реакторов ВВЭР-СКД // ВАНТ. Ядерно-реакторные константы. – 2024. – № 2. – С. 158–175.

3. Лапин А. С., Бландинский В. Ю., Невиница В. А. и др., Нейтронно-физические особенности реактора МТИР-СКД как экспериментальной базы для отработки перспективных легководных реакторных технологий // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 18–31. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.02
4. Васина Н. К., Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Курсевич И. П. Радиационное распухание аустенитных сталей: влияние различных факторов. Обработка экспериментальных данных и формулировка определяющих уравнений // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 4 (48). – С. 69–88.
5. Кальченко А. С., Брык В. В., Воеводин В. Н., Лазарев Н. П. Моделирование распухания стали Х18Н10Т в имитационных и реакторных условиях // ВАНТ. ФРП и РМ. – 2009. – Вып. 4–2 (94). – С. 131–139.
6. Карзов Г. П., Марголин Б. З. Основные механизмы радиационного повреждения материалов ВКУ и материаловедческие проблемы их длительной эксплуатации // Росэнергоатом. − 2015. −№ 2. − С. 8–15.
7. Пиминов В., Евдокименко В. Оценка прочности и ресурса ВКУ действующих и сооружае-мых реакторов типа ВВЭР: реалистичный и консервативный прогнозы // РЭА.– 2015.– № 2. – С. 16–19.
8. Bruemmer S. M., Simonen E. P., Scott P. M. et al. Radiation-induced material changes and susceptibility to intergranular failure of light-water-reactor core internals // J. Nucl. Mater. – 1999. – N 274. – P. 299–314.
9. Namburi H. K., Hojna A., Zdenek F. Effect of tensile strain on microstructure of irradiated core internal material // Proc. of the 24th International Conference Nuclear Energy for New Europe. – Slovenia, Portoroz, 2015.
10. Ehrnstén U., Pakarinen J., Karlsen W. Investigations on core basket bolts from a VVER 440 power plant // Engineering Failure Analysis. – 2013. – N 33. – P. 55–65.
11. Was G., Ampornrat P., Gupta G., Teysseyre S., West E., Allen T., Sridharan K., Tan L., Chen Y., Ren X., et al. Corrosion and stress corrosion cracking in supercritical water // J. Nucl. Mater. – 2007. – V. 371. – P. 176–201.
12. Nai-qiang Zhang, Hong Xu, Bao-rang Li et al. Influence of the dissolved oxygen content on corrosion of the ferritic–martensitic steel P92 in supercritical water // Corrosion Science. – 2012. – V. 56. – P. 123–128.
13. Yashar Behnamian, Amir Mostafaei, Alireza Kohandehghan et al. Internal oxidation and crack susceptibility of alloy 310S stainless steel after long term exposure to supercritical water at 500°C // The Journal of Supercritical Fluids. – 2016. – N 120 (1). – P. 161–172.
14. Teysseyre S., Was G. S. Stress Corrosion Cracking of Austenitic Alloys in Supercritical Water // Corrosion. – 2006. – V. 62. – N 12. – P. 1100–1116.
15. Tsuchiya Y., Kano F., Saito N. et al. SCC and Irradiation Properties of Metals under Supercritical-water Cooled Power Reactor Conditions. – GENES4/ANP2003, Kyoto, Japan. – Paper 1096.
16. Марголин Б. З., Пирогова Н. Е., Потапова В. А. и др. Исследование механизмов коррозионного растрескивания стали для ВКУ ВВЭР на основе имитационных испытаний // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 4 (92). – С. 193–218.
17. Novotny R., Hähner P., Siegl, J. et al. Stress corrosion cracking susceptibility of austenitic stainless steels in supercritical water conditions // J. Nucl. Mater. – 2011. – V. 409 (2). – P. 117–123.
18. Janik P., Novotny R., Nilsson et al. Pre-qualification of cladding materials for SCWR fuel qualification testing facility – stress corrosion cracking testing // The 6th International Symposium on Supercri-tical Water-cooled Reactors (ISSCWR-6). – 2013. – Shenzhen, Guangdong, China. – Paper ISSCWR6-13034.
19. Penttilä S., Toivonen A. Oxidation and SCC behaviour of austenitic and ODS steels in supercritical water // The 6th International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors (ISSCWR-6). – 2013. – Shenzhen, Guandong, China. – Paper ISSCWR6-13029.
20. Zhou R., West E. A., Jiao Z., Was G. S. Irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic alloys in supercritical water // J. Nucl. Mater. – 2009. – V. 395. – P. 11–22.
21. Kenik E. A., Busby J. T. Radiation-induced degradation of stainless steel light water reactor internals // Materials Science and Engineering R. – 2012. – N 73. – P. 67–83.
22. Fukuya K. Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2013. – V. 50 (3). – P. 213–254.
23. Busby J. T., Was G. S., Kenik E. A. Isolating the effect of radiation-induced segregation in irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels // J. Nucl. Mater. – 2002. – N 302. – P. 20–40.
24. Chung H. M., Ruther W. E., Sanecki J. E. et al. Irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels: recent progress and new approaches // J. Nucl. Mater. – 1996. – N 239. – P. 61–79.
25. Jacobs A. J. 16th International Symposium On Radiation on Materials / Kumar A. S., Gelles D. S., Nanstad R. K., Little E. A. (Eds.). – ASTM-STP 1175, ASTM, Philadelphia, 1993. – P. 902.
26. Требования ПНАЭ Г-7-009. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка, основные положения. – 1990.

27. Margolin B., Sorokin A., Belyaeva L. Link between neutron and ion irradiation hardening for stainless austenitic and ferritic-martensitic steels // Metals. – 2024. – V. 14. – P. 99.
28. Kryukov A., Debarberis L., Hähner P., Gillemot F., Oszvald F. Thermal annealing as a method to predict results of high temperature irradiation embrittlement // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 432. – P. 501–504.
29. Margolin B., Pirogova N., Sorokin A., Morozov A. Correlation between grain boundary strength determined by impact test of miniature specimen and stress corrosion cracking resistance of irradiated austenitic steels used for the internals of WWER-type and PWR-type nuclear reactors // Engineering Failure Analysis. – 2021. – V. 127 (3). – Art. 105544.
30. Fujimoto K., Yonezawa T., Wachi E. et al. Effect of the Accelerated Irradiation and Hydrogen/Helium Gas on IASCC Characteristics for Highly Irradiated Austenitic Stainless Steels // Proc. 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Water Reactors, PA. – 2005. – P. 299–310.
31. Ernestova M. Influence of the Neutron Spectrum on the Sensitivity to IASCC and Microstructure of CW 316 Material // Proceedings of the 8th International Symposium Fontevraud 8, Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs Safety, Performance and Reliability, SFEN. – 2014.
32. Margolin B., Pirogova N., Sorokin A. et al. Investigation of Stress Corrosion Cracking Resistance of Irradiated 12Cr Ferritic-Martensitic Stainless Steel in Supercritical Water Environment. Materials. – 2023. – V. 16. – Is. 7. – Art. 2585.
33. Margolin B., Sorokin A., Pirogova N. et al. Analysis of mechanisms inducing corrosion cracking of irradiated austenitic steels and development of a model for prediction of crack initiation // Engineering Failure Analysis. – 2020. – V. 107. – Art. 104235. – P. 1–20.
34. Nishioka H., Fukuya K., Fujii K., Torimaru T. IASCC Initiation in Highly Irradiated Stainless Steels under Uniaxial Constant Load Conditions // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – N 45 (10). – P. 1072–1077.
35. Toivonen A., Aaltonen P., Karlsen W. Post-irradiation SCC investigations on highly irradiated core internals component materials // Proceedings of Fontevraud 6 Conference “Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs”. – Sept. 18–22 2006, Royal Abbey, France.
36. Bosch R. W., Vankeerberghen M., Gérard R. Crack initiation testing of thimble tube material under PWR conditions to determine a stress threshold for IASCC // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 461. – P. 112–121.
37. Conermann J., Shogan R., Fujimoto K., Yonezawa T., Tamaguchi Y. Irradiation effects in a highly irradiated cold worked stainless steel removed from a commercial PWR // Proceedings of 12th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors. – USA, August 14–18, 2005. – P. 277–287.
38. Freyer P., Mager T., Burke M., Hot cell crack initiation testing of serious heats of highly irra-diated 316 stainless steel components obtained from three commercial PWRs // Proceedings of 13th Intern. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors. – Canada, August 19–23, 2007.
39. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюрев В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющих сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970. – 422 с.
40. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия,1969. – 752 с.
41. ГОСТ 50753–95. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из специальных сталей и сплавов.
42. Сорокин А. А., Марголин Б. З., Курсевич И. П., Минкин А. И., Неустроев В. С., Белозеров С. В. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 2 (66). – С. 131–152.
43. Марголин Б. З., Костылев В. И., Морозов А. М. и др. Влияние нейтронного облучения и пострадиационного отжига на механические свойства и трещиностойкость металла антикоррозионной наплавки корпусов реакторов ВВЭР. Ч. 2: Прогнозирование механических свойств и трещиностойкости металла наплавки // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 3 (91) – С. 229–244.
44. ГОСТ Р 59115.14-2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водного энергетического реактора.

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL "VOPROSY MATERIALOVEDENIYA", 2026, No 3 (127)

CONTENTS

On the occasion of Mikhail Valentinovich Kovalchuks 80th anniversary *5*

METALS SCIENCE. METALLURGY

Kondratyev N.A., Khlusova E.I., Motovilina G.D., Dmitryuk A.I. Structure and mechanical properties of 5–15 mm-thick sheet metal after simulation of hot continuous rolling on a laboratory mill *10*

Ustyuzhina E.V., Fomina O.V., Motovilina G.D., Kalinin G.Yu., Borovskaya O.D. Studies of the effect of heat treatment on the structure and properties of the 45G17YU3 steel *25*

Malyutina Yu.N., Kuzmin R.I., Dudareva A.A., Shelepov D.A., Khabirov R.R., Burov V.G. Annealing effects on the microstructure and microhardness of NbC-based coatings *33*

FUNCTIONAL MATERIALS

Kolesnikov V.I., Abzaev Yu.A., Kolesnikov I.V., Polityko K.N., Syrtanov M.S. Structural-phase state and nuclear structure of a multilayer TiN-AlSiN film on a steel substrate *46*

Burkov A.A., Bytsura A.Yu., Kulik M.A., Krutikova V.O. Microstructure, wear resistance, and oxidation resistance of WC/Ni-Al layered cermet coatings produced by electro-spark alloying *64*

Klimova A.P., Malykhin A.Yu., Panich A.A., Dzyuba E.B. Synthesis, structure, and piezoelectric properties of $CH_3CH_3PbCl_3$ hybrid perovskites *78*

Cherkesov Z.A. Study of the conditions for obtaining iron (III) molybdate by solid-phase synthesis *91*

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

Antipov V.V., Matvienko G.V., Mushnikova S.Yu., Artamonov E.A., Panfilova A.P. Effects of glass microspheres on the properties of phenolic foam used for thermal insulation of ship hull structures *99*

Negrov D.A., Putintsev V.Yu., Knyazev E.V., Glotov A.I., Veber D.A. Influence of synthesis technology on structure and tribological properties of polymer composite *118*

Nikolaeva M.A., Starostin N.P., Tikhonov R.S., Danzanova E.V., Ammosova O.A. Electrofusion welding of complex-shaped parts to a polyethylene pipe at low temperatures *132*

Uskov V.G., Ozhogin A.V., Strokova S.V., Ilyasov S.G. Effect of a polymethylene-*p*-triphenyl borate additive on the physicomechanical properties of wollastonite-filled ABS plastic *142*

Akimova M.P., Sharin P.P., Sivtseva A.V., Yakovleva S.P. Effects of the method of reinforcing detonation nanodiamond powder additives on the structure and tribological characteristics of a composite material *152*

WELDING, WELDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES

Gavshinsky A.L., Melnikov P.V., Gribanova V.B. Investigation of the influence of welding process parameters on the characteristics of the weld metal deposited using mechanized flux-cored wire welding *168*

Zatokovenko N.I., Timofeev M.N., Startseva D.Kh., Panshin A.Yu., Kutsenko E. I., Savelkov A. S., Investigation of the structure and properties of a weld overlay produced by electroslag strip cladding using a 25% Cr – 22% Ni – 2% Mo – 0.2% N alloy for equipment operating in urea synthesis environments *173*

Mitrofanov V.M., Volosov N.A., Potapov N. N., Volobuev S.Yu. Specifics of technology and materials for electroslag strip surfacing of pressure vessel components for nuclear power plants of JSC NPO TsNIITMASH *183*

CORROSION AND PROTECTION OF METALS

Kireev S.Yu. Development of a boron-free sulfate-acetate electrolyte for the electrochemical deposition of anticorrosive zinc-nickel alloy coatings *196*

RADIATION MATERIALS SCIENCE

Margolin B.Z., Pirogova N.E., Sorokin A.A. Investigation of stress corrosion cracking in irradiated austenitic materials for reactor components operating with supercritical coolant parameters *208*

Guidelines for authors of the scientific and technical journal "Voprosy Materialovedeniya". Manuscript requirements *232*

© 2026
NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey"
http://www.crism-prometey.ru

METALS SCIENCE. METALLURGY

UDC 669.14.018.295:621.771.016–413

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 5–15 mm-THICK SHEET METAL AFTER SIMULATION OF HOT CONTINUOUS ROLLING ON A LABORATORY MILL

N.A. KONDRATYEV, Cand. Sc. (Eng), E.I. KHLUSOVA, Dr Sc. (Eng), G.D. MOTOVILINA, Cand. Sc. (Eng), A.I. DMITRYUK

NRC "Kurchatov Institute" – Central Research Institute of Structural Materials "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: npk3@crism.ru

Received July 22, 2026

Revised August 3, 2026

Accepted August 5, 2026

Abstract—Sheet metal products with a thickness of 5–15 mm and a strength range of 460 to 890 MPa were manufactured from steel with a standardized chemical composition after hot rolling simulation using thermomechanical treatment with accelerated cooling. The effects of the end rolling temperature, cooling rate, and coiling temperature on the structure and mechanical properties of the sheet metal products were studied.

Keywords: low-carbon alloy shipbuilding steel, continuous rolling, simulation modeling, thermomecha-nical processing, high-strength steel, cold resistance, ferrite, pearlite, bainite, martensite

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-10-24

REFERENCES

1. Goritsky, V.M., Guseva, I.A., Lushkin, M.A., Shneiderov, G.R., Sravnenie koeffitsientov anizotropii udarnoy vyazkosti na obraztsakh Charpy konstruktsionnykh stalei, izgotovlennykh po Evronormam i standartam Rossii [Comparison of impact toughness anisotropy coefficients on Charpy specimens of structural steels manufactured according to European norms and Russian standards], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2013, V. 79, No 10, pp. 78–83.

2. Goritsky, V.M., Shneiderov, G.R., Goritsky, O.V., Vliyanie anizotropii udarnoy vyazkosti na kharakteristiki soprotivleniya khrupkomu razrusheniyu vysokoprochnykh stalei, podvergnutykh termomekhani-cheskoy obrabotke [Influence of impact toughness anisotropy on the characteristics of brittle fracture resistance of high-strength steels subjected to thermomechanical treatment], *Metallurg*, 2020, No 5, pp. 42–49.

3. Poletskov, P.P., Kuznetsova, A.S., Alekseev, D.Yu., Nikitenko, O.A., Lopatina, E.V., Analiz mirovogo urovnya razrabotok v oblasti proizvodstva goryachekatanogo vysokoprochnogo khladostoykogo listovogo prokata s predelom tekuchesti ≥ 600 N/mm2 [Analysis of world-class developments in the field of production of hot-rolled high-strength cold-resistant sheet metal products with a yield strength ≥ 600 N/mm^2], *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*, V. 18, No 4, pp. 32–38.

4. Poletskov, P.P., Alekseev, D.Yu., Kuznetsov, A.S., Gulin, A.E., Emalieva, D.G., Issledovanie vliyaniya rezhimov uskorennogo okhlazhdeniya na strukturoobrazovanie i svoistva rulonnogo prokata [Study of the influence of accelerated cooling modes on the structure formation and properties of rolled metal products], *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*, 2022, V. 20, No 2, pp. 91–97.

5. Poletskov, P.P., Koptseva, N.V., Efimova, Yu.Yu., Alekseeva, D.Yu., Gulin, A.E., Kupriyanova, O.A., Issledovanie tekhnologicheskikh rezhimov proizvodstva stalnogo prokata dlya gibkikh nasosno-kompressornykh trub [Study of technological modes of production of rolled steel products for flexible tubing], *Tekhnologii metallurgii, mashinostroyeniya i materialoobrabotki*, 2023, No 22, pp. 91–98.

6. Kondratyev, N.A., Khlusova, E.I., Anisimov, D.M., Borovskaya, O.D., Vybor parametrov vysokoskorostnoy termodeformatsionnoy obrabotki Cr-Ni-Mo stali na osnovanii imitatsionnogo modelirovaniya [Selection of parameters of high-speed thermal deformation processing of Cr-Ni-Mo steel based on simulation modeling], *Voprosy materialovedeniya*, 2024, No 1 (117), pp. 5–19.

7. Kondratyev, N.A., Khlusova, E.I., Motovilina, G.D., Belikova, Yu.A., Imitatsionnoe modelirovanie protsessov strukturoobrazovaniya pri proizvodstve listovogo prokata tolshchinoy menee 10 mm iz vysokoprochnoy beynitno-martensitnoi stali [Simulation modeling of structure formation processes in the production of sheet metal products less than 10 mm thick made of high-strength bainitic-martensitic steel], *Voprosy materialovedeniya*, No 1 (125), 2026, pp. 10–24.

8. Khlusova, E.I., Sych, O.V., Orlov, V.V., Khladostoikie stali. Struktura, svoistva, tekhnologii [Cold-resistant steels. Structure, properties, technologies], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2021, V. 122, No 6, pp. 621–657.

9. Sudyin, V.V., Stepanov, P.P., Kantor, M.M., Efron, L.I., Vorkachev, K.G., Zharkov, S.V., Sopostavlenie vliyaniya mikrostrukturnykh faktorov na udarnuyu vyazkost okoloshovnoy zony svarnykh trub klassa prochnosti K60 [Comparison of the influence of microstructural factors on the impact toughness of the heat-affected zone of welded pipes of strength class K60], *Stal*, 2022, No 1, pp. 44–50.

UDC 669.15-194.56:621.785

STUDIES OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE 45G17YU3 STEEL

E.V. USTYUZHINA, O.V. FOMINA, Dr Sc. (Eng), G.D. MOTOVILINA, Cand Sc. (Eng), G.Yu. KALININ, Dr Sc. (Eng), O.D. BOROVSKAYA

NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey",49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation.

E-mail: mail@crism.ru

Received July 9, 2026

Revised July 20, 2026

Accepted July 23, 2026

Abstract–-An analysis of the strength and plastic characteristics, as well as structural changes in austenitic-class steel after normalization in the temperature range of 650℃–950℃, has been carried out. The temperature heating range for normalizing sheet rolled products made of 45G17Yu3 steel grade has been determined.

Keywords: sheet steel, low-magnetic steel, normalization, austenitic grain, crystallization, sulfides

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-25-32

ACKNOWLEDGMENTS

Experimental studies were carried out using equipment of the Collective Use Center "Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials" at the National Research Center "Kurchatov Institute" – Central Research Institute of Structural Materials "Prometey".

REFERENCES

1. Malyshevsky, V.A., Tsukanov, V.V., Kalinin, G.Yu., Fomina, O.V., Sovremennye malomagnitnye stali dlya sudostroeniya [Modern low-magnetic steels for shipbuilding], *Sudostroenie*, 2009, No 5, pp. 19–-21.
2. Gulyaev, A.P., Metallovedenie [Metal science], Moscow: Metallurgiya, 1977.
3. Kanfor, S.S., Korpusnaya stal [Vessel steel], Leningrad: Sudpromgiz, 1960.
4. Bernshtein, M.L., Zaymovsky, V.A., Kaputkina, L.M., *Termomekhanicheskaya obrabotka stali* [Thermomechanical treatment of steel], Moscow: Metallurgiya, 1983.
5. Golub, Yu.V., Pankova, E.A., Vliyanie rezhimov termodeformatsionnoi obrabotki na protsessy rekristallizatsii pri prokatke stali 45G17Yu3 [Influence of thermomechanical treatment modes on recrystallization processes during rolling of 45G17Y3 steel], *Voprosy materialovedeniya*, 2015, No 4, pp. 7–16.
6. Sagaradze, V.V., Uvarov, A.I., *Uprochnenie austenitnykh st*alei [Hardening of austenitic steels], Moscow: Nauka, 1989.
7. Fizicheskoe metallovedenie [Physical metal science], Kan, R.U., Haazen, P. (Eds.), Moscow: Metallurgiya, 1987, V. 1.
8. Kovneristy, Yu.K., Blinov, V.M., Vlasov, Ya.Ya., et al., Fiziko-mekhanicheskie svoistva vysokoprochnykh nemagnitnykh stalei tipa 45G14N9F. Vysokoprochnye nemagnitnye splavy [Physico-mechanical properties of high-strength non-magnetic steels of type 45G14N9F, High-strength non-magnetic alloys]: *Conference reports*, Moscow: Nauka, 1973.
9. Mirzoev, D.A., Vorobyov, I.I., Yakovleva, I.L., Elektronno-mikroskopicheskie issledovaniya kharaktera vydeleniya sulfidov v stali 40KhGM posle vysokotemperaturnoi termicheskoi obrabotki [Electron microscopic studies of the nature of sulfide precipitation in 40KhGM steel after high-temperature heat treatment], *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*, 2006, No 3 (33), pp. 12–17.

UDC 621.791.92 : 621.785.3

ANNEALING EFFECTS ON THE MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS OF NBC-BASED COATINGS

Yu.N. MALYUTINA[1, 2], Cand. Sc. (Eng), R.I. KUZMIN[1], Cand. Sc. (Eng), A.A. DUDAREVA[1], D.A. SHELEPOV[1], R.R. KHABIROV[1], V.G. BUROV[1], Dr Sc. (Eng)

[1] Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, 630073 Novosibirsk, Russian Federation

[2] *M. Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15 Lavrentyev Ave, 630090 Novosibirsk, Russian Federation.E-mail: iuliiamaliutina@gmail.com*

Received February 17, 2026
Revised May 13, 2026
Accepted June 24, 2026

Abstract—The paper examines the effect of heat treatment on the microstructure and microhardness of NbC coatings produced by non-vacuum electron beam cladding on 12Kh18N10T austenitic steel. A comprehensive analysis of phase transformations, diffusion processes, and microstructure evolution during annealing in the temperature range of 600–1100°C with 3, 5, and 10 hours holding was performed. It was found that at 600°C, fine dispersive particles of chromium carbide of the $M_{23}C_6$ type are formed in the coating structure, while the microhardness increases insignificantly. At 900°C, a significant increase in microhardness to 520 HV is observed, which is 1.95 times higher than that of the untreated coating, due to dispersion strengthening caused by the uniform distribution of secondary and precipitated carbide phases. At 1100°C, primary carbides coagulate and grow, secondary carbides spheroidize, and the coating's microhardness decreases.

Keywords: NbC-based coating, non-vacuum electron beam cladding, annealing, microhardness, carbide precipitation

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-33-45

ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out in accordance with the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSUN-2023-0009).

The study was carried out at the Center for Collective Use "Structure, Mechanical, and Physical Properties of Materials."

REFERENCES

1. Lee, T., Jeong, W., Chung, S., Ryu, H.J., Effects of TiC on the microstructure refinement and mechanical property enhancement of additive manufactured Inconel 625/TiC metal matrix composites fabrica-ted with novel core-shell composite powder, *J. Mater. Sci. Technol*., 2023, V. 164, pp. 13–26. URL: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.04.033
2. Ren, Y., Li, L., Zhou, Y., Wang, S., In situ synthesized VC reinforced fe-based coating by using extreme high-speed laser cladding, *Mater. Lett*., 2022, V. 315, Art. 131962. URL: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131962
3. Gupta, A., Hussain, M., Misra, S., Das, A.K., Mandal, A., Processing and characterization of laser sintered hybrid B4C/CBN reinforced Ti-based metal matrix composite, *Opt. Lasers Eng*., 2018, No 105, pp. 159–172. URL: https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.01.015
4. Chu, Z., Wei, F., Zheng, X., Zhang, C., Yang, Y., Microstructure and properties of TiN/Fe-based amorphous composite coatings fabricated by reactive plasma spraying, *J. Alloys Compd*., 2019, V. 785, pp. 206–213. URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.171
5. Ma, Z., Wang, Q., Liang, Y., Cui, Z., Meng, F., Chen, L., Wang, Z., Yu, T., Liu, C., The mechanism and machinability of laser-assisted machining zirconia ceramics, *Ceram. Int*., 2023, V. 49, Art. 16971–16984. URL: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.059
6. Wu, C., Ma, M., Liu, W., Zhong, M., Zhang, H., Zhang, W., Laser cladding in-situ carbide particle reinforced Fe-based composite coatings with rare earth oxide addition, *Journal of Rare Earths*, 2009, No 27, pp. 997–1002. URL: https://doi.org/10.1016/S1002-0721(08)60377-4
7. Maslarevic, A., Bakic, G.M., Djukic, M.B., Rajicic, B., Maksimovic, V., Pavkov, V., Microstructure and wear behavior of MMC coatings deposited by plasma transferred arc welding and thermal flame spraying processes, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2020, V. 73, pp. 259–271. DOI: 10.1007/s12666-019-01831-9
8. Li, Q., Lei, Y., Fu, H., Growth characteristics and reinforcing behavior of in-situ NbCp in laser cladded Fe-based composite coating, *J. Mater. Sci. Technol*., 2015, V. 31, pp. 766–772. URL: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.06.012
9. Krylova, T.A., Chumakov, Yu.A., Fabrication of Cr-Ti-C composite coating by non-vacuum elect-ron beam cladding, *Mater. Lett*., 2020, No 274, Art. 128022. URL: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128022
10. Wang, J., Li, L., Tao, W., Crack initiation and propagation behavior of WC particles reinforced Fe-based metal matrix composite produced by laser melting deposition, *Opt. Laser Technol*., 2016, No 82, pp. 170–182. URL: https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.03.008

11. Yang, J., Huang, J., Fan, D., Chen, S., Microstructure and wear properties of Fe–6wt.%Cr–0.55wt.%C–Xwt.%Nb laser cladding coating and the mechanism analysis, *Mater. Des*., 2015, No 88, pp. 1031–1041. URL: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.108
12. Zhang, Z., Yu, T., Kovacevic, R., Erosion and corrosion resistance of laser cladded AISI 420 stainless steel reinforced with VC, *Appl. Surf. Sci*., 2017, No 410, pp. 225–240. URL: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.137
13. Li, S., Niu, W., Lei, Y.-W., Zheng, Y., Microstructure and wear performance of ex/in-situ TiC reinforced CoCrFeNiW0.4Si0.2 high-entropy alloy coatings by laser cladding, *J. Alloys Compd*., 2024, V. 1002, Art. 175458. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175458
14. Powder Metallurgy Data: Refractory, Hard and Intermetallic Materials, Beiss, P., Ruthardt, R., Warlimont, H., (Eds.), Springer-Verlag: Berlin; Heidelberg, 2002, V. 2A2.
15. Liu, Y., Wang, K., Fu, H., Yang, X., Lin, J., Effect of NbC addition on the microstructure and wear resistance of laser cladding nickel-based alloy coatings, *J. Mater. Eng. Perform*., 2024, V. 33, pp. 12437–12451. DOI: 10.1007/s11665-023-08828-y
16. Zhang, Z., Lei, S., Xie, X., Yan, Z., Li, W., Zhao, X., Influence of vacuum heat treatment on wear behavior of HVAF sprayed WC-Cr3C2-Ni coatings, *Vacuum*, 2023, V. 216, Art. 112431. URL: https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112431
17. Luo, Z., Yu, H., Yang, J., Feng, Y., Xie, G., Misra, R.D.K., Effect of heat treatment on the microstructure, impact toughness and wear resistance of Fe-based/B4C composite coating by vacuum cladding, *Surf. Coat. Technol*., 2023, V. 459, Art. 129386. URL: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129386
18. Yurgin, A.B., Ruktuev, A.A., Stepanova, N.V., Riznitsky, A.E., Khudyakov, D.V., Bataev, I.A., Influence of heat treatment on the structure and properties of CoCrFeMnNi + NbC coatings obtained by nonvacuum electron-beam surfacing, *Metallurgist*, 2025, V. 69, pp. 110–117. DOI: 10.1007/s11015-025-01921-8
19. Mishra, T.K., Sahu, P., Gedam, V., Jain, A., Atkare, S., Effect of heat treatment on abrasive wear behaviour of Ni-WC coatings, *Mater. Today Proc*., 2023, September. URL: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.335
20. Ryabinkina, P., Bushueva, E., Nikulina, A., Structure and properties of austenitic steel surface-doped with NbC, *Mater. Today Proc*., 2019, V. 11, pp. 436–440. URL: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.009
21. Zimogliadova, T.A., Bataev, A.A., Lazurenko, D.V, Bataev, I.A., Bataev, V.A., Golkovsky, M.G., Saage, H., Ogneva, T.S., Ruktuev, A.A., Structural characterization of layers fabricated by non-vacuum electron beam cladding of Ni-Cr-Si-B self-fluxing alloy with additions of Nb and B, *Mater. Today Commun*, 2022, V. 33, Art. 104363. URL: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104363
22. Ogneva, T., Emurlaev, K., Malyutina, Y., Domarov, E., Chakin, I., Ruktuev, A., Riabinkina, P., Yurgin, A., Bataev, I., Heat treatment induced structural transformations and high-temperature oxidation behavior of Al21Co22Cr22Fe13Ni22 high-entropy coatings produced by non-vacuum electron beam cladding, *Metals*, 2023, V. 13 (10), p. 1689. DOI: 10.3390/met13101689
23. Cao, Y., Zhi, S., Gao, Q., Tian, X., Geng, T., Guan, X., Qin, C., Formation behavior of in-situ NbC in Fe-based laser cladding coatings, *Mater. Charact*., 2016, No 119, pp. 159–165. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.08.005
24. Easterling, K.E., Porter, D.A., Sherif, M., Phase transformations in metals and alloys, CRC Press, 2009, 3rd ed.
25. Krauss, G., Steels: Processing, Structure, and Performance, ASM International, 2015, 2nd ed.
26. Raghavan, V., C-Fe-Nb (Carbon-Iron-Niobium), *J. Phase Equilibria Diffus*., 2009, V. 30, pp. 92–93. DOI: 10.1007/s11669-008-9448-z

FUNCTIONAL MATERIALS

UDC 621.793.7:539.23

STRUCTURAL-PHASE STATE AND NUCLEAR STRUCTURE OF A MULTILAYER TiN-AlSiN FILM ON A STEEL SUBSTRATE

V.I. KOLESNIKOV[1], Acad. RAS, Yu. A. ABZAEV[2], Dr Sc. (Phys-Math), I.V. KOLESNIKOV[1], K.N. POLITYKO[1], M.S. SYRTANOV[3], Cand. Sc. (Eng)

[1] Rostov State Transport University, 2 Rostovsky Strelkovy Regiment of the People's Militia Sq, 344038 Rostov Region, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Tomsk State University of Architecture and Building, 2 Solyanskaya Sq, 634003 Tomsk, Russian Federation

[3] National Research Tomsk Polytechnic University, 65 Lenin Avenue, 634050 Tomsk, Russian Federation

Received August 5, 2026

Revised August 28, 2026

Accepted September 2, 2026

Abstract—Metastable nitride coatings of the TiN–AlSiN system are of interest as multilayered, heterogeneous materials in which the high hardness and thermochemical stability of the TiN phase are combined with the potential to form silicon-containing nitride and silicide regions. This study examines a TiN–AlSiN film produced via vacuum ion-plasma deposition on a steel substrate. The sample was fabricated using the sequence Ti (underlayer) + TiN + AlSiN + TiN + … + AlSiN; deposition was carried out using a titanium cathode and a silumin cathode (Al–Si = 88/12) with nitrogen introduced into the vacuum chamber. Structural analysis was performed using the Rietveld method, while the electronic structure and chemical bonding parameters were investigated within the framework of density functional theory using the CASTEP code, the PBE functional, and ultrasoft pseudopotentials. The results demonstrate that the structural-phase state constitutes a complex, hierarchically organi-zed TiN/AlSiN system. In addition to the B1-structured TiN and the α-Fe steel substrate, the model incorporates the silicon-nitrogen β-Si_3N_4 phase and the Si_4Ti_4 silicide phase; these reflect the chemical heterogeneity of the AlSiN layer and the potential interlayer interaction between Ti-containing and Si-containing regions. For TiN, a cubic unit cell with a lattice parameter of 4.1993 Å was obtained after relaxation, and the N–Ti bond population was found to be +0.70 at a bond length of 2.09964 Å. Population analysis indicates a pronounced covalent contribution alongside a significant ionic component, driven by charge transfer from Ti to N. In Si_4Ti_4, a covalent Si–Si bond and a mixed Si–Ti bond were identified, whereas direct Ti–Ti interaction is weak or antibonding. For β-Si_3N_4, the mixed covalent-ionic nature of the Si–N bond was confirmed, though the high sensitivity of Mulliken analysis to short interatomic distances and basis function overlap was noted. Based on the population analysis data, fundamental calculations were performed for local bond stiffness, shear resistance, interface adhesion energy, and the Archard wear coefficient. The results establish a link between phase composition, unit cell relaxation, and electron density distribution and the mesomechanical behavior of the TiN–AlSiN multilayer film.

Keywords: TiN–AlSiN, multilayer coating, DFT, CASTEP, Rietveld, Mulliken, Hirshfeld, TiN, β-Si_3N_4, Si_4Ti_4, chemical bonding, physical mesomechanics

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-46-63

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation, project No 21-79-30007-P, URL: https://rscf.ru/project/21-79-30007/.

REFERENCES

1. Mayrhofer, P.H., Mitterer, C., Hultman, L., Clemens, H., Microstructural design of hard coatings, *Progress in Materials Science*, 2006, V. 51, pp. 1032–1114.
2. Veprek, S., Veprek-Heijman, M.G.J., Industrial applications of superhard nanocomposite coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2008, V. 202, pp. 5063–5073.
3. Holleck, H., Material selection for hard coatings, *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1986, V. 4, pp. 2661–2669.
4. Musil, J., Hard and superhard nanocomposite coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2000, V. 125, pp. 322–330.
5. Hultman, L., Thermal stability of nitride thin films, *Vacuum*, 2000, V. 57, pp. 1–30.
6. Patscheider, J., Nanocomposite hard coatings for wear protection, *MRS Bulletin*, 2003, V. 28, pp. 180–183.
7. Rietveld, H.M., A profile refinement method for nuclear and magnetic structures, *Journal of Applied Crystallography*, 1969, V. 2, pp. 65–71.
8. Knotek, O., Löffler, F., Krämer, G., Multicomponent and multilayer physically vapour deposited coatings, *Surface and Coatings Technology*, 1992, V. 54–55, pp. 241–248.
9. Barshilia, H.C., Deepthi, B., Selvakumar, N., Jain, A., Rajam, K.S., Nanolayered multilayer coatings of TiN/CrN prepared by reactive direct current magnetron sputtering, *Applied Surface Science*, 2007, V. 253, pp. 5076–5083.
10. Clark, S.J., Segall, M.D., Pickard, C.J., Hasnip, P.J., Probert, M.I.J., Refson, K., Payne, M.C., First principles methods using CASTEP, *Zeitschrift für Kristallographie*, 2005, V. 220, pp. 567–570.
11. Perdew, J.P., Burke, K., Ernzerhof, M., Generalized gradient approximation made simple, *Physical Review Letters*, 1996, V. 77, No 18, pp. 3865–3868.
12. Vanderbilt, D., Soft self-consistent pseudopotentials in a generalized eigenvalue formalism, *Physical Review B*, 1990, V. 41, pp. 7892–7895.
13. Monkhorst, H.J., Pack, J.D., Special points for Brillouin-zone integrations, *Physical Review B*, 1976, V. 13, pp. 5188–5192.

14. Mulliken, R.S., Electronic population analysis on LCAO–MO molecular wave functions, *Journal of Chemical Physics*, 1955, V. 23, pp. 1833–1840.
15. Hirshfeld, F.L., Bonded-atom fragments for describing molecular charge densities, *Theoretica Chimica Acta*, 1977, V. 44, pp. 129–138.
16. Kohn, W., Sham, L.J., Self-consistent equations including exchange and correlation effects, *Physical Review*, 1965, V. 140, pp. A1133–A1138.
17. Hohenberg, P., Kohn, W., Inhomogeneous electron gas, *Physical Review*, 1964, V. 136, pp. B864–B871.
18. Karpinsky, V.I., Lyakishev, N.P., Fiziko-khimicheskie osnovy formirovaniya nitridnykh pokryty [The physicochemical foundations of nitride coating formation], *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2000, No 5, pp. 45–52.
19. Münz, W.D., Titanium aluminum nitride films: a new alternative to TiN coatings, *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1986, V. 4, pp. 2717–2725.
20. Rebouta, L., Andritschky, M., Silva, M.F.da, Soares, J.C., Structural characterization of TiAlN coatings, *Surface and Coatings Technology*, 1995, V. 76–77, pp. 70–74.
21. Pettifor, D.G., Theoretical predictions of structure and related properties of intermetallics, *Materials Science and Technology*, 1992, V. 8, pp. 345–349.
22. Tabor, D., *The hardness of metals*, Oxford: Oxford University Press, 1951.
23. Hill, R., The elastic behaviour of a crystalline aggregate, *Proceedings of the Physical Society. Section A*, 1952, V. 65, pp. 349–354.
24. Archard, J.F., Contact and rubbing of flat surfaces, *Journal of Applied Physics*, 1953, V. 24, pp. 981–988.
25. Rice, J.R., A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, *Journal of Applied Mechanics*, 1968, V. 35, pp. 379–386.

UDC 621.762.34:621.793.6

MICROSTRUCTURE, WEAR RESISTANCE, AND OXIDATION RESISTANCE OF WC/Ni-Al LAYERED CERMET COATINGS PRODUCED BY ELECTRO-SPARK ALLOYING

A.A. BURKOV[1], Cand Sc. (Phys-Math), A.Yu. BYTSURA[1], M.A. KULIK[1], V.O. KRUTIKOVA[2]

[1] Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 153 Tikhookeanskaya St, 680042 Khabarovsky Krai, Khabarovsk, Russian Federation

[2] Yu. A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 65 Kim Yu Chen St, 680000 Khabarovsk, Russian Federation

Received April 6, 2026
Revised August 8, 2026
Accepted August 13, 2026

Abstract—To increase the wear resistance and oxidation resistance of steel products, composite coatings based on WC/Ni-Al, representing metal-ceramic gradient materials, were obtained on the surface of a sample of 45 steel by electric spark deposition. The coatings were obtained by alternating deposition of layers of tungsten carbide and nickel-aluminum composition using a non-localized electrode. It is established that changing the mode of applying layers allows you to adjust the ratio of their heights. The average thickness of the prepared two-layer metal-ceramic coatings increased monotonously from 34.4 to 58.2 microns with an increase in the pulse duration during the application of the first layer from 20 to 500 microseconds. According to X-ray analysis, the composition of the layered coatings contains reflexes of the phases AlNi, Fe-Ni, WC, WC_{1-x} and W_2C, which indicates the structure of the metalloceramic composite. According to scanning electron microscopy data, the coatings had a heterogeneous structure with light inclusions of tungsten carbides in the micron and submicron ranges. In the lower part of the coatings, there is an accumulation of tungsten carbide, which was formed during the deposition of the first layer. The corrosion behavior of the coatings was investigated by the methods of potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy. It is shown that the use of two–layer WC/Ni-Al coatings makes it possible to improve the corrosion behavior of steel 45 and increase heat resistance at 700 °C from 5 to 19 times. The microhardness of the coating surface was close and ranged from 6.34 to 6.6 GPa, which corresponds to the hardness of the Ni-Al layer. It has been established that the use of two–layer metal-ceramic WC/Ni-Al coatings makes it possible to reduce and stabilize the coefficient of friction of the surface of parts made of 45 steel. It is shown that with an increase in the pulse duration when applying a layer with tungsten carbide, the wear of coatings decreased monotonously due to an increase in the ratio of the thickness of the WC layer to the Ni-Al layer.

Keywords: WC/Ni-Al-based composite coatings, microstructure, wear resistance, heat resistance, layered cermet coatings, electro-spark alloying
DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-64-77

ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out within the framework of the state assignment of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (R&D project No 075-00399-26-00).

This work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (R&D project No 126020216322-5).

REFERENCES

1. Mari, D., Bolognini, S., Feusier, G., Cutard, T., Verdon, C., Viatte, T., Benoit, W., TiMoCN based cermets: Part 1. Morphology and phase composition, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2003, V. 21, No 1–2, pp. 37–46. URL: https://doi.org/10.1016/S0263-4368(03)00010-6
2. Pirso, J., Viljus, M., Letunovitš, S., Juhani, K., Joost, R., Three-body abrasive wear of cermets, *Wear*, 2011, V. 271, Is. 11–12, pp. 2868–2878. URL: https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.06.005
3. Dvornik, M.I., Vlasova, N.M., Sravnitelny analiz ekspluatatsionnoi stoikosti submikronnogo tverdogo splava WC-10Co, spechennogo iz poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem v masle [Comparative analysis of the operational durability of a submicron hard alloy WC10Co sintered from powder obtained by electroerosive dispersion in oil], *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya*, 2023, V. 17, No 1, pp. 75–84. URL: https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-1-75-84
4. Ojo-Kupoluyi, O., Tahir, S., Baharudin, B., Azmah Hanim, M., Anuar, M., Mechanical properties of WC-based hardmetals bonded with iron alloys – A review, *Materials Science and Technology*, 2017, V. 33, No 5, pp. 507–517. URL: https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1186929
5. Straumal, B., Konyashin, I., WC-based cemented carbides with high entropy alloyed binders: a review, *Metals*, 2023, V. 13, No 1, p. 171. URL: https://doi.org/10.3390/met13010171
6. Piechowiak, D., Kania, A., Łukaszkiewicz, N., Miklaszewski, A., Properties and Microstructure Evaluation in NiAl-xWC (x = 0− 90 wt.%) Intermetallic-Based Composites Prepared by Mechanical Alloying, *Materials*, 2023, V. 16, No 5, p. 2048. URL: https://doi.org/10.3390/ma16052048
7. Matos, F.A.D.F., Corrêa, E.O., Balbino, N.A.N., Huanca, D.R. Evaluation of Electrochemical Corrosion Behavior of WC-Ni-Al and WC-Co Cemented Carbides, *Materials Research*, 2026, V. 29, p. e20240516.
8. Yuan, J., Wang, Q., Liu, X., Lou, S., Li, Q., Wang, Z., Microstructures and high-temperature wear behavior of NiAl/WC-Fex coatings on carbon steel by plasma cladding, *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, V. 842, p. 155850. URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155850
9. Liu Wen, Bai Chao, Study on Plasma-spraying Ni-Al-WC Alloy Layer on the Surface of Chrome Cast Iron and Alloy Layer's Microstructure and Properties, *Atomic Energy Science and Technology*, 2002, V. 36, No Z1, p. 454. URL: https://doi.org/10.7538/yzk.2002.36.z1.0454
10. Yan, Z., Zeng, D., Yang, R., Li, W., Microstructural evolution and tribological properties of WC-Ni60 coatings fabricated by laser cladding with different Al additions, *Materials Characterization*, 2025, p. 115311. URL: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2025.115311
11. Burkov, A.A., Ispolzovanie granul Ni i Al i poroshka WC dlya elektroiskrovogo naneseniya metallokeramicheskikh pokrytiy [The use of Ni and Al granules and WC powder for electrospark deposition of metalceramic coatings], *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya*, 2025, V. 19, No 2, pp. 62–72. URL: https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-2-62-72
12. Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., Renna, G., Advancements in electrospark deposition (ESD) technique: A short review, *Coatings*, 2022, V. 12, No 10, p. 1536. URL: https://doi.org/10.3390/coatings12101536
13. Burkov, A.A., Bytsura, A.Y., Influence of substrate surface quality on electro-spark alloying, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2024, V. 60, No 2, pp. 204–210. URL: https://doi.org/10.3103/S1068375524020030
14. Kudryashov, A.E., Levashov, E.A., Repnikov, N I., Makarov, A.V., Perspektivy primeneniya tekhnologii elektroiskrovogo legirovaniya i SVS-elektrodnykh materialov dlya povysheniya stoikosti prokatnykh valkov [Prospects for the use of electrospark alloying technology and SHS electrode materials to improve the wear resistance of rolling mill rolls], *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo*, 2018, No 2, pp. 63–66.
15. Panov, A.V., Dolgiy, Z.O., Rusina, N.S., Formirovanie zharostoikikh pokrytiy na splave VT9 metodom elektroiskrovogo legirovaniya [Formation of heatresistant coatings on VT9 alloy using the electricspark alloying method], Kosmodrom "Vostochny" – budushchee kosmicheskoi otrasli Rossii, 2013, pp. 57–64.

16. Tarelnyk, V.B., Paustovsky, A.V., Tkachenko, Y.G., Konoplianchenko, E.V., Martsynkovsky, V.S., Antoszewsky, B., Electrode materials for composite and multilayer electrospark-deposited coatings from Ni–Cr and WC–Co alloys and metals, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2017, V. 55, No 9, pp. 585–595. URL: https://doi.org/10.1007/s11106-017-9843-2
17. Khimukhin, S.N., Eremina, K.P., Khe, V.K., Structure of combined intermetallic electrospark coatings on steel 45, *Metal Science and Heat Treatment*, 2025, V. 66, No 11–12, pp. 671–677. URL: https://doi.org/10.1007/s11041-025-01102-z
18. Burkov, A.A., Khe, V.K., Bytsura, A.Y., Electroerosion Series of Metals for Electric Spark Deposition Based on Solution of the Heat-Conduction Problem, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2024, V. 60, No 4, pp. 599–606. URL: https://doi.org/10.3103/S1068375524700169
19. Kwok, D.Y., Neumann, A.W., Contact angle measurement and contact angle interpretation, *Advances in Colloid and Interface Science*, 1999, V. 81, Is. 3, pp. 167–249. URL: https://doi.org/10.1016/S0001-8686(98)00087-6
20. Almond, E.A., Gee, M.G., Results from a UK interlaboratory project on dry sliding wear, *Wear*, 1987, V. 120, No 1, pp. 101–116.
21. Kennedy, F.E., Lu, Y., Baker, I., Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting, *Tribology International*, 2015, V. 82, pp. 534–542. URL: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.10.022
22. Nataraja, M., Balakumar, G., Santhosh, N., Naik, M.R., Characterization of wear rate of Al-12 wt% Si alloy based MMC reinforced with ZrO_2 particulates, *Materials Research Express*, 2024, V. 11, No 3, p. 036522. URL: https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad3468
23. Zeng, H., Sun, W., Tang, H., Jiang, F., Wang, L. Surface Roughness and Its Role in Flotation Behavior, Wettability, and Bubble–Particle Interactions: A Systematic Review, *Applied Sciences*, 2025, V. 15, Is. 8, p. 4557. URL: https://doi.org/10.3390/app15084557
24. Rosalbino, F., Scavino, G., Corrosion behaviour assessment of cast and HIPed Stellite 6 alloy in a chloride-containing environment, *Electrochimica Acta*, 2013, V. 111, pp. 656–662. URL: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.08.019
25. Burkov, A.A., Kulik, M.A., Bytsura, A.Yu., Struktura i svoistva Al–Ni–Fe-pokrytiy na stali 35, poluchennykh metodom elektroiskrovogo legirovaniya [The structure and properties of Al–Ni–Fe coatings on steel 15, obtained by electrospark alloying], Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 2024, No 7 (829), pp. 22–30
26. Alves, A.C., Wenger, F., Ponthiaux, P., et al., Corrosion mechanisms in titanium oxide-based films produced by anodic treatment, *Electrochimica Acta*, 2017, V. 234, pp. 16–27. URL: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.011
27. Burkov A. A., Kulik M. A. Struktura, zharostoikost, korrozionnaya i tribologicheskaya kharakteristiki pokrytiy, prigotovlennykh elektroiskrovym osazhdeniem poroshkov Ni i Al na stal 35 [The structure, heat resistance, corrosion resistance, and tribological characteristics of coatings prepared by electrospark deposition of Ni and Al powders onto 35 steel], *Neorganicheskie materialy*, 2024, V. 60, No 7, pp. 833–845.
28. Lu, J.Z., Cao, J., Lu, H.F., Zhang, L.Y., Luo, K.Y., Wear properties and microstructural analyses of Fe-based coatings with various WC contents on H13 die steel by laser cladding, *Surface and Coatings Technology*, 2019, V. 369, pp. 228–237. URL: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.063
29. Burkov, A., Dvornik, M., Kulik, M., Bytsura, A., Vliyanie granulometrii poroshka karbida volframa na kharakteristiki metallokeramicheskikh pokrytiy WC/Fe-Ni-Al [The influence of the granulometry of tungsten carbide powder on the characteristics of WC/FeNiAl cermet coatings], *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*, 2025, V. 27, N 3, pp. 221–235.

UDC 548.736.442.6:537.226.86

SYNTHESIS, STRUCTURE, AND PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF $CH_3NH_3PBCL_3$ HYBRID PEROVSKITES

A.P. KLIMOVA, A.Yu. MALYKHIN, A.A. PANICH, Dr Sc. (Eng), E.B. DZYUBA, Cand Sc. (Eng)
Southern Federal University, Institute of High Technologies and Piezotechnics, 10 Milchakova St, Rostov-on-Don, 344090 Russian Federation. E-mail:malyhin@sfedu.ru

Received November 24, 2025
Revised April 30, 2026
Accepted May 13, 2026

Abstract—Hybrid metal-organic perovskites based on methylammonium lead halides attract significant research attention in the fields of photovoltaics and optoelectronics. The interest in these materials stems from the record-

breaking growth dynamics of solar energy conversion efficiency, which under laboratory conditions has already reached values competitive with commercial silicon-based solar cells. The methylammonium lead chloride ($CH_3NH_3PbCl_3$ or $MAPbCl_3$) considered in this study possesses a perovskite-like crystal lattice, which under certain conditions enables a piezoelectric response comparable to that of well-known ceramic compositions based on lead zirconate titanate (PZT). We have conducted work aimed at obtaining $MAPbCl_3$ crystals and studying their structural characteristics, stability, as well as photoelectric and piezoelectric properties. A rationale is provided for choosing a synthesis method optimal in terms of reaction rate, reagent availability, and equipment requirements. The sonochemical method was enhanced by cyclic treatment, and processing parameters were selected to ensure the best crystal quality in the shortest possible time. As a result of the study, samples were obtained that exhibit chemical stability and resistance to atmospheric exposure under normal conditions, as confirmed by X-ray phase analysis. Scanning electron microscopy was used to study the samples, revealing the dependence of the crystal surface structure on the duration of ultrasonic treatment. Mechanical hysteresis loops and piezoelectric properties were investigated. A comparative analysis with a lead zirconate titanate (PZT) piezoceramic material was performed.

Keywords: methylammonium lead chloride, metal-organic perovskite; sonochemical synthesis; piezoelectric response; ferroelectrics; piezoelectrics

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-78-90

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment, project No FENW-2025-0005.

REFERENCES

1. Xia, J., Qiu, X., Liu, Y., et al., Ferroelectric Wide-Bandgap Metal Halide Perovskite Field-Effect Transistors: Toward Transparent Electronics, *Advanced scienc*e, 2023, V. 10, No 10.
2. Ip, H.A., Quan, L.N., Adachi, M.M., et al., A two-step route to planar perovskite cells exhibiting reduced hysteresis, *Applied physics letters*, 2015, V. 106, No 14.
3. De Quilettes, D.W., Vorpahl, S.M., Stranks, S.D., et al., Impact of microstructure on local carrier lifetime in perovskite solar cells, *Science*, 2015, V. 348, No 6235, pp. 683–686.
4. Grancini, G., D'Innocenzo, V., Dohner, E.R., et al., $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite single crystals: surface photophysics and their interaction with the environment, *Chemical Science*, 2015, V. 6, No 12, pp. 7305–7310.
5. Smecca, E., Valenzano, V., Valastro, S., et al., Two-step $MAPbI_3$ deposition by low-vacuum proximity-space-effusion for high-efficiency inverted semitransparent perovskite solar cells, *Journal of materials chemistry A*, 2021, V. 9, No 30, pp. 16456–46469.
6. Popov, G., Mattinen, M., Kemell, M., et al., Scalable Route to the Fabrication of $CH_3NH_3PbI_3$ Perovskite Thin Films by Electrodeposition and Vapor Conversion, *ACS Omega*, 2016, V. 1, No 6, pp. 1296–1306.
7. Zhang, C., He, Z., Mogensen, M., et al., A deep-dyeing strategy for ultra-stable, brightly luminescent perovskite-polymer, *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, V. 9, No 10, pp. 3396–3402.
8. Xia, J., Qiu, X., Liu, Y., et al., Ferroelectric Wide-Bandgap Metal Halide Perovskite Field-Effect Transistors: Toward Transparent Electronics, *Advanced science*, 2023, V. 10, No 10.
9. Bu, T., Li, J., Zheng, F., et al., Universal passivation strategy to slot-die printed SnO2 for hysteresis-free efficient flexible perovskite solar module, *Nature Communications*, 2018, No 9.
10. Warren, G.W., Henein, H., Solubility of $PbCl_2$ in DMSO and DMSO – water solutions, *Hydrometallurgy*, 1997, No 1–2, pp. 243–247.
11. Bi, D., Moon, S.J., Häggman, L., et al., Using a two-step deposition technique to prepare perovskite ($CH_3NH_3PbI_3$) for thin film solar cells based on ZrO_2 and TiO_2 mesostructures, *RSC Advances*, 2013, V. 3, No 41.
12. Han, G., Zhang, S., Boix, P.P., Wong, L.H., et al., Towards high efficiency thin film solar cells, *Progress in Materials Science*, 2017, No 87, pp. 246–291.
13. Hsu, H.P., Li, L.C., Shellaiah, M., Sun, K.W., et al. Structural, Photophysical, and Electronic Properties of $CH_3NH_3PbI_3$ Single Crystals, *Scientific Reports*, 2019, No 7.
14. Nayak, P.K., Moore, D.T., Wenger, B., et al., Mechanism for rapid growth of organic–inorganic halide perovskite crystals, *Nature Communications*, 2016, No 7.
15. Vasiljevic, M., Kollár, M., Spirito, D., et al., "Forbidden" Polarisation and Extraordinary Piezo-electric Effect in Organometallic Lead Halide Perovskites, *Advanced Functional Materials*, 2022, V. 32, No 40.
16. Eperon, G.E., Habisreutinger, S.N., Leijtens, T., et al., The Importance of Moisture in Hybrid Lead Halide Perovskite Thin Film Fabrication, *ACS Nano*, 2015, V. 9, No 9, pp. 9380–9393.

17. López, C. A., Abia, C., Rodrigues, J.E., et al., Enhanced stability in $CH_3NH_3PbI_3$ hybrid perov-skite from mechano-chemical synthesis: structural, microstructural and optoelectronic characterization, *Scientific Reports*, 2020, No 10.
18. Torres-Martínez, D. Y., Millán, M., Aguilar, B., et al., Synthesis and characterization of $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite thin films obtained in one step, *Physica B: Condensed Matter*., 2020, No 585.
19. Dang, Y., Liu, Y., Sun, Y., et al., Bulk crystal growth of hybrid perovskite material $CH_3NH_3PbI_3$, *CrystEngComm*., 2015, V. 17, No 3.
20. Awol, N., Amente, C., Verma, G., et al., Morphology and surface analyses for $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite thin films treated with versatile solvent–antisolvent vapors, *RSC Advances*, 2021, V. 11, No 29.
21. Kashchiev, D., *Nucleation: Basic Theory with Applications*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
22. Vekilov, P.G., The two-step mechanism of nucleation of crystals in solution, *Nanoscale*, 2010, No 2 (11), pp. 2346–2357. DOI: 10.1039/c0nr00628a
23. Vekilov, P.G., Nucleation, *Crystal growth & design*, 2010, V. 10, N 12, pp. 5007–5019.
24. Kurz, W, Fisher, D.J., Rappaz, M., *Fundamentals of solidification*: 5th ed., Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2023.
25. Davey, R.J, Garside, J., *From Molecules to Crystallizers*, Oxford: Oxford University Press, 2000.
26. Xiang, L., Fu, M., Wang, T., et al., Application and development of ultrasound in industrial crystallization, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, No 111.
27. Promtov, M.A., Perspektivy primeneniya kavitatsionnykh tekhnologiy dlya intensifikatsii khimiko- tekhnologicheskikh protsessov [Prospects for the use of cavitation technologies to intensify chemical and technological processes], *Vestnik TGTU*, 2008, No 4.
28. Hagenson, L.C., Doraiswamy, L.K., Comparison of the effects of ultrasound and mechanical agi-tation on a reacting solid-liquid system, *Chemical Engineering Science*, 1998, V. 53, No 1, pp. 131–148.
29. Dalvi, S.V., Yadav, M.D., Effect of ultrasound and stabilizers on nucleation kinetics of curcumin during liquid antisolvent precipitation, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, No 24, pp. 114–122.
30. Guo, Z., Jones, A.G., Li, N., The effect of ultrasound on the homogeneous nucleation of BaSO4 during reactive crystallization, *Chemical Engineering Science*, 2006, V. 61, No 5, pp. 1617–1626.
31. Kordyllaa, A., Krawczyka, T., Tumakakab, F., et al., Modeling ultrasound-induced nucleation during cooling crystallization, *Chemical Engineering Science*, 2009, No 64 (8), pp. 1635–1642.
32. Nandia, P., Girial, C., Swain, D., et al., Room temperature growth of $CH_3NH_3PbI_3$ single crystals by solvent evaporation method, *CrystEngComm*., 2018, V. 21, No 4.
33. Otraslevoi standart 11 0444-87: *Materialy piezokeramicheskie* [Piezoceramic materials].
34. Liu, Y., Kim, D., Levlev, A.V., et al., Ferroic Halide Perovskite Optoelectronics, *Advanced Functional Materials*, 2021, V. 31, No 36.

UDC 549.76

STUDY OF THE CONDITIONS FOR OBTAINING IRON (III) MOLYBDATE BY SOLID-PHASE SYNTHESIS

Z.A. CHERKESOV, Cand Sc. (Chem)
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, 173 Chernyshevsky St, 360004 Nalchik, Russian Federation. E-mail: cherkesovz@mail.ru

Received April 8, 2026
Revised May 13, 2026
Accepted May 14, 2026

Abstract—The paper presents computational and experimental material on the study of solid-phase interaction of reagents in the $Fe_2(SO_4)_3$–Na_2CO_3–MoO_3 system by methods of thermodynamics and chemical kinetics over a wide temperature range with a stoichiometric ratio of reactants. The thermodynamic parameters of the reactions occurring in the studied system are studied. It is shown that the processes associated with the synthesis of iron (III) molybdate are characterized by significant negative Gibbs energy, and this is essential for achieving the goal set in the work. An important role in this regard is played by the interaction of iron (III) sulfate with sodium carbonate, which results in a very unstable phase, the transition state of $Fe_2(CO_3)_3$, a donor of highly defective iron (III) oxide. The latter reacts intensively with thermally activated molybdenum (VI) oxide, forming iron (III) molybdate.

Based on the data obtained, a method for the synthesis of iron (III) molybdate has been developed, which, unlike known methods, is characterized by high process performance, yield and content of the base substance in a highly

dispersed state. The synthesis of iron molybdate was carried out after careful grinding of the initial reagents and sieving through a sieve. The temperature of the synthesis process at 600°C was maintained until a constant mass of the mixture was reached. The sinter was then cooled to room temperature and leached with hot (70–80°C) distilled water. The iron (III) molybdate precipitate was filtered and washed on a filter until it reacted negatively to the molybdate ion. The synthesized iron (III) molybdate was dried, washed, and calcined to a constant weight. The yield of iron (III) molybdenum acid is 99.70% of the theoretical value. The work also contains material on the identification of the synthesized product by modern research methods.

Keywords: solid-phase synthesis, system, iron (III) molybdate, identification

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-91-98

REFERENCES

1. Zhukov, A.B., Rumyantsev, R.N., Ilyin, A.A., Ilyin, A.P., Okislenie metanola do formaldegida v promyshlennykh usloviyakh s ispolzovaniem razlichnykh zhelezomolibdenovykh katalizatorov [Oxidation of methanol to formaldehyde in industrial conditions using various ferromolybdenum catalysts], *Izv. vuzov. Ser. Khimiya i khim. tekhnologiya*, 2016, V. 59, No 5, pp. 65–71. DOI: 10.6060/tcct.20165905.5356
2. Thrane, J., Mentztel, U.V., Thorhauge, M., Hoj, M., Jensen, A.D., A Review and experimental revisit of alternative catalysts for selective oxidation of methanol to formaldehyde, *Catalysts*, 2021, V. 11, No 11, pp. 13–19. DOI: 10.3390/catal11111329
3. Kim, T.H., Ramachandra, B., Saidutta, M.B., Choo, K.Y., Song, S.D., Rhee, J.W., Selective Oxidation of Methanol to Formaldehyde Using Modified Iron-Molybdate Catalysts, *Cat. Lett*., 2004, V. 98, pp. 161–165. DOI:10.1007/S10562-004-7932-6
4. Latypova, S.Sh., Yeseva, E.A., Sinikova, N.A., Akopyan, A.V., Kataliticheskie sistemy na osnove molibdatov dlya aerobnogo okisleniya organicheskikh substratov [Catalytic systems based on molybdates for aerobic oxidation of organic substrates]: review, *Non-pathogenic catalysis*, 2023, V. 8, No 2, pp. 24–42. DOI: 10.56304/S2414215823020028
5. Rumyantsev, R.N., Ilyin, A.A., Pimenova, K.R., Ilyin, A.P., Issledovanie usloviy obrazovaniya molibdata zheleza (III) pri keramicheskom i mekhanokhimicheskom sinteze [Investigation of the conditions of formation of iron (III) molybdate during ceramic and mechanochemical synthesis], *Rossiysky khimichesky zhurnal*, 2015, V. 19, No 4, pp. 97–102.
6. Dao, K.K., Ilyin, A.A., Ilyin, A.P., Issledovanie sinteza molibdata zheleza v protsesse mekhanohimicheskoi aktivatsii [Investigation of iron molybdate synthesis in the process of mechanochemical activation], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regionalnoe prilozhenie*, 2019, No 2 (58), pp. 139–149.
7. Chen, L., et al., Effect of Oxygen–Iron Composition on Charge Transport and Interface Reaction in Hematite, *ACS Catalysis*, 2020, V. 10, No 4, pp. 2413–2418. DOI: 10.1021/acscatal.9b04538
8. Qin, Y., et al., Facile synthesis of oxygen vacancies enriched α-Fe_2O_3 for peroxymonosulfate activation: A non-radical process for sulfamethoxazole degradation, *Journal of Hazardous Materials*, 2021, V. 419, Art. 126447. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126447
9. Shurdumov, G.K., Cherkesov, Z.A., O kontseptsii razrabotki optimizirovannoi tekhnologii polucheniya molibdatov i volframatov d-elementov v tverdykh fazakh na osnove obmennykh reaktsiy vo vzaimnykh sistemakh $MeSO_4$–Na_2CO_3–$Mo(W)O_3$ pri ikh termicheskoi obrabotke (Me–d-element) [On the concept of developing an optimized technology for the production of molybdates and tungstates of d-elements in solid phases based on exchange reactions in mutual MeSO4–Na2CO3–Mo(W)O3 systems during their heat treatment (Me–d-element)], 2018, *Chemical bulletin*, V. 1, No 4, pp. 31–39.
10. Shurdumov, G.K., Cherkesov, Z.A., Mokaeva, L.I., Ob effekte massoobmena sistem $Mn(Fe,Co)Mo(W)O_4$–Na_2CO_3 I okruzhayushchei sredy i neobkhodimosti ego ucheta pri identifikatsii molibdatov i volframatov polivalentnykh d-elementov Mn, Fe, Co na osnove termogravimetricheskikh dannykh [On the effect of mass transfer of $Mn(Fe,Co)Mo(W)O_4$ – Na_2CO_3 systems and the environment and the need to take it into account when identifying molybdates and tungstates of polyvalent d-elements Mn, Fe, Co based on thermogravimetric data], *Izv. vuzov. Ser. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2019, V. 62, No 4, pp. 111–1120. DOI: 10.6060/ivkkt.20186100.5724
11. Glushko, V.P., *Termicheskie konstanty veshchestv* [Thermal constants of substances], Moscow: Nauka, 1981, Is. 10, Part 1.
12. Karzhavin, V.K., Termodinamicheskie velichiny khimicheskikh elementov i soedineniy [Thermodynamic quantities of chemical elements and compounds], Apatity: Izd-vo Kolskogo nauchnogo tsentra RAS, 2011.

13. Volkov, A.I., Zharsky, I.M., *Termodinamicheskie kharakteristiki veshchestv* [Thermodynamic characteristics of substances]: handbook, Minsk: Bukmaste, 2014.
14. Stepanovskikh, E.I., Brusnitsyna, L.A., Vinogradova, T.V., *Fizicheskaya khimiya dlya inzhenerov* [Physical chemistry for engineers], Ekaterinburg: Izd-vo Uralskogo universiteta, 2022.
15. Eremin, V.V., *Osnovy fizicheskoi khimii* [Fundamentals of physical chemistry]: textbook. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013, Part 1.
16. Yaroslavtsev, A.B., *Fizicheskaya khimiya* [Physical chemistry], Nauchny Mir Publ., 2018.
17. Hamburg, Yu.D., *Khimicheskaya termodinamika* [Chemical thermodynamics], Moscow: Laboratoriya znaniy, 2016.
18. Nikolenko, N.V., Kostynyuk, A.O., Gutenoir, F., Kalashnikov, Yu.V., Khimicheskoe osazhdenie smesei molibdata zheleza (III) s trioksidom molibdena nepreryvnoi kristallizatsiei [Chemical precipitation of mixtures of iron (III) molybdate with molybdenum trioxide by continuous crystallization], *Neorgan. Materialy*, 2014, V. 50, No 11, pp. 12–31. DOI: 10.7868/S0002337X14110128
19. Shurdumov, G.K., Tlimakhova, E.Kh., Shurdumov, B.K., Cobalt tungstate synthesis in melts of the (K_2WO_4-KCl)eut-$CoSO_4$ (K,CoIICl,SO_4,WO_4) system, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2010, V. 55, pp. 1568–1572. DOI: 10.1134/S003602361009024X

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

UDC [678.632+666.189.3]:536.212.3

EFFECTS OF GLASS MICROSPHERES ON THE PROPERTIES OF PHENOLIC FOAM USED FOR THERMAL INSULATION OF SHIP HULL STRUCTURES

V.V. ANTIPOV, Dr Sc. (Eng), G.V. MATVIENKO, S.Yu. MUSHNIKOVA, Dr Sc. (Eng), E.A. ARTAMONOV, Cand Sc. (Eng), A.P. PANFILOVA

NRC "Kurchatov Institute" – Central Research Institute of Structural Materials "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

Received July 15, 2026

Revised August 14, 2026

Accepted August 14, 2026

Abstract—The paper investigates the structure and physicochemical properties of phenolic foam containing a hybrid filler: perlite (5–6.6 wt.%) and varying amounts of hollow glass microspheres (5–40 wt.%). It is shown that incorporating up to 30% glass microspheres reduces hygroscopicity, moisture content, and water absorption by a factor of 2.8–5, while increasing compressive strength 30-fold. At the same time, the thermal conductivity coefficient rose from 0.04 to 0.06 W/(m·K) and the density increased from 76 to 330 kg/m³. Higher concentrations of hollow glass microspheres (35–40%) caused a sharp decline in compressive strength and an increase in water absorption. Relationships were established between porosity and foam structure versus physicochemical properties. Optimal filler (hollow glass microsphere) contents were determined based on the required density of the phenolic foam.

Keywords: hollow glass microspheres, perlite, phenolic foam, thermal insulation, ship hull structures, hygroscopicity

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-99-117

REFERENCES

1. Bobrov, Yu.L., Ovcharenko, E.G., Shojhet, B.M., Petukhova, E.Yu., *Teploizolyatsionnye materialy i konstruktsii* [Thermal insulation materials and structures], Moscow: Infra-M, 2003.
2. Kolosova, A.S., Pikalov, E.S., Sovremennye gazonapolnennye polimernye materialy i izdeliya [Modern gasfilled polymer materials and products], *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2020, No 10, pp. 54–67.
3. Berlin, A.A., Shutov, F.A., *Penopolimery na osnove reaktsionnosposobnykh oligomerov* [Polyurethane foams based on reactive oligomers], Moscow: Khimiya, 1978.
4. Lu, X., Li, Y., Chen, Z., Li, S., Wang, X., Liu, Q., Recent Trends in Polymer Matrix Solid Buoyancy Materials: A Review, *Polymers*, 2024, No 16, Art. 2307. URL: https://doi.org/10.3390/polym16162307
5. Bakhman, A., Myuller, K., *Fenoplasty* [Phenolic resins], Moscow: Khimiya, 1978.
6. Mougel, C., Garnier, T., Cassagnau, P., Sintes-Zydowicz, N., Phenolic foams: A review of mechanical properties, fire resistance and new trends in phenol substitution, *Polymer*, 2019, No 164, pp. 86–117. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.12.050

7. Ushkov, V.A., Goryuchest gazonapolnennykh polimerov [The flammability of gasfilled polymers], *Stroitelstvo: nauka i obrazovanie*, 2017, V. 7, Is. 3 (24), St. 5. URL: http://nso-journal.ru
8. Petkova-Slipetsi, R., Zlateva, P., An analysis of the structure and thermal conductivity of hollow microsphere filled syntactic foams, *Civil and Environmental Engineering*, 2019, V. 15, Is. 1, pp. 36–41. DOI: 10.2478/cee-2019-0006
9. Andrianov, R.A., Ponomarev, Yu.E., *Penoplasty na osnove fenolformaldegidnykh polimerov* [Foams based on phenolformaldehyde polymers], Izdatelstvo Rostovskogo universiteta, 1987.
10. Andreev, A.K., Ermakov, B.S., *Materialy dlya nizkotemperaturnoi tekhniki* [Materials for LowTemperature Technology]: study guide, St Petersburg: ITMO, 2016.
11. Torlova, A.S., Vitkalova, I.A., Pikalov, E.S., Tekhnologii proizvodstva, svoistva i oblasti primeneniya kompozitsiy na osnove fenolformaldegidnykh smol [Production technologies, properties, and applications of compositions based on phenolformaldehyde resins], *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki*, 2017, No 2, pp. 96–114.
12. Zastrogina, O.B., Sinyakov, S.D., Serkova, E.A., Materialy na osnove fenolformaldegidnykh oligomerov rezolnogo i novolachnogo tipov [Materials based on phenol-formaldehyde oligomers of the resorcinol and novolac types]: review. Part 1, *Trudy VIAM*, 2021, No 10 (104), pp. 58–66.
13. Sudareva, N.G., Smyslova, L.A., Nazarova, N.N., Matvienko, Zh.V., *Sovremennye mashinostroitelnye materialy. Nemetallicheskie materialy* [Modern engineering materials. Non-metallic materials], Professional, 2012, pp. 581–619.
14. Donskoy, A.A., Krasnov, L.L, Baritko, N.V., Matveeva, I.A., Isaev, A.Yu., Polimernye teplo- i ognezashchitnye materialy [Polymeric heat and fireretardant materials], *75 let. Aviatsionnye materialy. Izbrannye trudy VIAM*, 2007, pp. 322–326.
15. Lebedev, V.L., Kosulnikov, V.Yu., Sery, P.V., Troshkin, S.N., Logunova, A.A., Lysenko, A.P., Modelirovanie rezhimov polimerizatsii krupnogabaritnykh blokov iz sferoplastika [Modeling the polymerization conditions for largesized blocks made of spheroplastic], *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2019, V. 4, No 390, pp. 67–84.
16. Yazici, M., Fahr, P., Shukla, A., Gunes, S., Akay, S.K., Development of a Polymer Based Syntactic Foam for High Temperature Applications, *Acta Physica Polonica A*, 2014, V. 125, No 2, pp. 526–528.
17. Fredi, G., Ronconi, G., Galvagnini, F., Mazzanti, V., Zanelli, M., Mollica, F., Dorigato, A., Modeling the thermal behavior of multifunctional syntactic foams containing phase change materials for heat management applications, *Polymer Composites*, 2024, No 45, pp. 15590–15603.
18. Mouritz, A.P., Gibson, A.G., Fire Properties of Polymer Composite Materials, Solid mechanics and its applications, Springer, 2006, V. 143, p. 398.
19. Dai, J., Peng, C., Zhang, S., Wu, S., Shi, M., Huang, Z., Investigation on the Mechanical and Thermal Insulation Properties of Hollow Microspheres: Phenolic Syntactic Foams, *Advances in Materials Science and Engineering*, V. 2022, Is. 1, Art. ID 2509090, p. 10. URL: https: doi.org/10.1155/2022/2509090
20. Wang, H., Yan, R., Cheng, H., Zou, M., Wang, H., Zheng, K., Hollow glass microspheres/phenolic syntactic foams with excellent mechanical and thermal insulate performance, *Front. Chem.*, 2023, V. 11, Art. 1216706. DOI: 10.3389/fchem.2023.1216706
21. Tassaw, D.F., Barburski, M., Kassie, B.B., The Role of Hollow Glass Microspheres as Functional Fillers in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review, *Materials*, 2025, V. 18, Is. 21, p. 27. doi.org/10.3390/ma18214974
22. Soloviev, S.A., Solovieva, O.V., Akhmetova, I.G., Vankov, Yu.V., Shakurova, R.Z., Chislennoe issledovanie teploprovodnosti kompozitnogo teploizolyatsionnogo materiala s mikrogranulami [Numerical study of the thermal conductivity of a composite thermal insulation material with microgranules], *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2022, V. 24, No 1, pp. 86–98. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-86-98
23. Apanasevich, N.S., Sokol, A.A., Kudlash, A.N., Lapko, K.N., Syomuha, A.Yu., Erohovec, A.M., Termostoikie teploizoliruyushchie kompozitsionnye materialy na osnove polykh mikrosfer i tverdykh fosfatnykh svyazuyushchikh: razrabotka i issledovanie [Heat resistant thermal insulating composite materials based on hollow micro-spheres and solid phosphate binders: development and research], *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya*, 2022, No 2, pp. 70–82. URL: https://doi.org/10.33581/2520-257X-2022-2-70-82
24. Xing, Z., Ke, H., Wang, X., Zheng, T., Qiao, Y., Chen, K., Zhang, X., Zhang, L., Bai, C., Li, Z., Investigation of the Thermal Conductivity of Resin-Based Lightweight Composites Filled with Hollow Glass Microspheres, *Polymers*, 2020, V. 12, Is. 3.
25. Knop, A., *Fenolnye smoly i materialy na ikh osnove* [Phenolic resins and materials based on them], Moscow, M.: Khimiya, 1983.

26. Dvorko, I.M., Poluchenie, svoistva i primenenie penoplastov na osnove novolachnykh fenoloformaldegidnykh oligomerov [Preparation, properties, and application of foams based on novolac phenol-formaldehyde oligomers], *Plasticheskie massy*, 2003, No 7, pp. 17–20.
27. GOST 17177-94: *Materialy i izdeliya stroitelnye teploizolyatsionnye. Metody ispytaniy* [Construction thermal insulation materials and products. Test methods].
28. OST 5.9296: *Materialy teploizolyatsionnye dlya sudostroeniya. Metody ispytaniy* [Thermal insulation materials for shipbuilding. Test methods].
29. GOST 7076-99: *Materialy i izdeliya stroitelnye. Metody opredeleniya teploprovodnosti i termicheskogo soprotivleniya na statsionarnom teplovom rezhime* [Construction materials and products. Methods for determining thermal conductivity and thermal resistance under steadystate thermal conditions].
30. Kurnosov, A.O., Vavilova, M.I., Melnikov, D.A., Tekhnologii proizvodstva steklyannykh napolnitelei i issledovanie vliyaniya appretiruyushchego veshchestva na fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki stekloplastikov [Technologies for the production of glass fillers and a study of the effect of the appertaining substance on the physical and mechanical characteristics of fiberglass composites], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2018, Is. 50, No 1, pp. 64–70.

UDC 678.742:621.891

INFLUENCE OF SYNTHESIS TECHNOLOGY ON STRUCTURE AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE

D.A. NEGROV, Cand Sc. (Eng), V.Yu. PUTINTSEV, Cand Sc. (Eng), E.V. KNYAZEV, Cand Sc. (Eng), A.I. GLOTOV, D.A. VEBER

Omsk State Technical University, 11 Mira Avenue, 644050 Omsk, Russian Federation. E-mail: den.veber.18@bk.ru

Received February 12, 2026

Revised April 13, 2026

Accepted April 30, 2026

Abstract—This paper presents an improved technology for manufacturing filled composite materials based on polytetrafluoroethylene and milled micrometer-scale carbon fiber. The conventional static pressing method for the composite mixture is supplemented by the application of external biharmonic action—involving high (~17 kHz) and low (~100 Hz) frequencies—during the solid-phase synthesis process. This method increased wear resistance by 32% compared to standard pressing. Furthermore, the study demonstrates a more uniform distribution of carbon fiber particles within the polymer matrix, resulting from the mechanical vibration of the powder inside the mold. Photoelectron spectroscopy revealed a decrease in the fluorine-to-carbon concentration ratio. This phenomenon is likely attributable to a more uniform distribution of carbon fibers throughout the volume of the composite material.

Keywords: polymer composite material, carbon fibers, antifriction properties, amplitude modulation, ultrasound

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-118-131

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant No FSGF-2024-0003).

REFERENCES

1. Youwang, T., Yong, H., Lei, Z., Miao, S., Low friction and wear characteristics formed by mechanically induced surface nanocrystallization: A review of recent advances, *Friction*, 2024, V. 13, No 6, p. 9440971. URL: https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9440971
2. Holmberg, K., Erdemir, A., Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions, *Friction*, 2017, V. 5, pp. 263–284. URL: https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5
3. Tang, Z., Li, H., A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007–present), Current Opinion, *Solid State & Materials Science*, 2014, V. 18, No 3, pp. 119–139. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.cossms.2014.02.002
4. Mello, J.D.B. De, Carbon-based solid lubricants: An overview, *Friction*, 2025, V. 13, No 1, p. 9441017. URL: https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9441017
5. Wang, J., Yan, F., Xue, Q., Tribological behavior of PTFE sliding against steel in sea water, *Wear*, 2009, V. 267, No 9–10, pp. 1634–1641. URL: https://doi.org/10.1007/s11434-009-0578-4

6. Gulkin, A.V., Teploukhov, A.N., Semenyuk, N.A., Sazankov, A.P., Kartashova, A.E.,Skakun, D.V., Vliyanie obiemnoi modifikatsii nanorazmernymi chastitsami dioksida tsirkoniya na strukturu i mekhanicheskie svoistva kompozitsionnogo materiala na osnove politetraftoretilena [Effect of bulk modification by nanosized zirconium dioxide particles on the structure and mechanical properties of a composite material based on polytetrafluoroethylene], *Omsky nauchny vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie*, 2024, V. 8, No 4, pp. 100–106. URL: https://doi.org/10.25206/2588-0373-2024-8-4-100-106
7. Conte, M., Fernandez, B., Igartua, A., Effect of surface temperature on tribological behavior of PTFE composites, *Surface Effects and Contact Mechanics X*., 2011, V. 71, pp. 219–230. URL: https://doi.org/10.2495/978-1-78466-167-0/019
8. Wang, J., Zhao, H., Huang W., Wang, X., Investigation of porous polyimide lubricant retainers to improve the performance of rolling bearings under conditions of starved lubrication, *Wear*, 2017, V. 380-381, pp. 52–58. URL: https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.008
9. Wan, H., Ye, Y., Chen, L., Chen, J., Zhou, H., Influence of Polyfluo-Wax on the Friction and Wear Behavior of Polyimide/Epoxy Resin–Molybdenum Disulfide Bonded Solid Lubricant Coating, *Tribology Transacations*, 2016, V. 59, No 5, pp. 889–895. URL: https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1118585
10. Li, J., The Effect of Carbon Fiber Content on the Mechanical and Tribological Properties of Carbon Fiber Reinforced PTFE Composites, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2010, V. 49, No 4, pp. 332–336. URL: https://doi.org/10.1080/03602550903413995
11. Li, H., Wang, G., Wu, Y., Jiang, N., Niu, K. Functionalization of carbon nanotubes in poly-styrene and properties of their composites: a review, *Polymers*, 2024, V. 16, No 6, p. 770. URL: https://doi.org/10.3390/polym16060770
12. Arunachalam, S.J., Saravanan, R., Sathish, T., Venkatesh, R., Integration of nanographene and action of fiber sequences on functional behaviour of composite laminates, *International Polymer Processing*, 2025, V. 40, No 2, pp. 205–215. URL: https://doi.org/10.1515/ipp-2024-0149
13. Kakhramanov, N.T., Allahverdieva, K.V., Mustafaeva, F.A., Structure and properties of conducting composites based on polyolefins and carbon black, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2022, V. 95, No 8, pp. 1146–1152. URL: https://doi.org/10.1134/S1070427222080092
14. Markova, M.A., Razrabotka kompozitsionnykh materialov tribotekhnicheskogo naznacheniya na osnove politetraftoretilena, modifitsirovannogo uglerodnym voloknistym napolnitelem [Development of tribotechnical composite materials based on polytetrafluoroethylene modified with carbon fiber filler]: thesis for the degree of Cand of Sc (Eng), 2024, p. 177.
15. Panda, A., Dyadyura, K., Valícek, J., Harnicarova, M., Manufacturing Technology of Composite Materials-Principles of Modification of Polymer Composite Materials Technology Based on Polytetrafluoroethylene, *Materials*, 2017, V. 10, No 4, p. 377. URL: https://doi.org/10.3390/ma10040377
16. Grakovich, P., Sheiestova, V. A., Ivanov, L. F., Tseluev, M., Zhandarov, S., Investigation of structure and properties of boundary layers in composite materials with PTFE matrix, *Polymer materials and technologies*, 2017, V. 3, No 3, pp. 14–26. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21113808
17. Sucheninov, P.A., Adamenko, N.A., Sergeev, D.V., Razrabotka i issledovanie kompozitsionnykh materialov dlya uplotneniy vozdushnykh porshnevykh kompressorov [Development and Research of Composite Materials for Air Piston Compressor Seals], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, No 11 (59), pp. 66–69.
18. Negrov, D.A., Putintsev, V.Yu., Knyazev, E.V., The effect of ultrasonic and low-frequency vibrations during pressing on the morphology and tribological properties of a polymer composite, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2025, V. 39, No 3, pp. 1141–1149. URL: https://doi.org/10.1007/s12206-025-0210-9
19. Zhai, W.Z., Zhou, K., Nanomaterials in superlubricity, Advanced Functional Materials, 2019, V. 29, No 28, p. 1806395. URL: https://doi.org/10.1002/adfm.201806395
20. Negrov, D.A., Putintsev, V.Yu., Knyazev, E.V., Glotov, A.I., Veber, D.A., Vliyanie energii kolebatelnykh protsessov na strukturu i svoistva kompozitsionnogo materiala [Influence of the energy of oscillatory processes on the structure and properties of a composite material], *Voprosy materialovedeniya*, 2025, No 3 (123), pp. 122–135. URL: https://doi.org/10.22349/1994-6716-2025-123-3-122-135
21. Negrov, D.A., Putintsev, V.Yu., Glotov, A.I., Vliyanie usovershenstvovannoi tekhnologii pressovaniya na strukturoobrazovanie politetraftoretilena [The effect of improved pressing technology on the structure formation of polytetrafluoroethylene], *Polzunovsky vestnik*, 2024, No 1, pp. 240–244. URL: https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.031

22. Petrova, P.N., Markova, M.A., Fedorov, A.L., Issledovanie vliyaniya tekhnologij polu-cheniya na svoistva i strukturu kompozitov na osnove PTFE [Study of the Influence of Production Technologies on the Properties and Structure of PTFE-Based Composites], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*, 2024, V. 29, No 1, pp. 162–171. URL: https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-162-171
23. Sawae, Y., Morita, T., Takeda, K., Onitsuka, S., Kaneuti, J., Yamaguchi, T., Sugimura, J., Friction and wear of PTFE composites with different filler in high-purity hydrogen gas, *Tribology International*, 2021, V. 157, p. 106884. URL: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106884

UDC 621.791.46:621.643.411.4

ELECTROFUSION WELDING OF COMPLEX-SHAPED PARTS TO A POLYETHYLENE PIPE AT LOW TEMPERATURES

M.A. NIKOLAEVA, Cand Sc. (Phys-Math), N.P. STAROSTIN, Dr Sc. (Eng), R.S. TIKHONOV, Cand Sc. (Eng), DANZANOVA E.V., Cand Sc. (Eng), O.A. AMMOSOVA., Cand Sc. (Eng)

Federal Research Center "Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences," a separate division of the Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2 Petrovskogo St., 677980 Yakutsk

Received March 26, 2026

Revised April 9, 2026

Accepted April 30, 2026

Abstract—A method has been developed to determine embeddable heater power during the cooling stage of welding a branch saddle to a polyethylene pipe at low temperatures. This method solves a three-dimensional inverse heat conduction problem. Controlling the thermal process with the calculated heater power forms a supramolecular structure in the weld material and the heat-affected zone. This increases the joint's strength.

Keywords: polyethylene, branch saddle, thermal welding process, inverse problem, control, crystallization, supramolecular structure, strength

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-132-141

REFERENCES

1. Komarov, G.V., Soedineniya detaley iz polimernykh materialov [Connections of Parts Made of Polymer Materials]: Textbook, St Petersburg: Professiya, 2006.
2. Danzanova, E.V., *Svarka polietilenovykh trub dlya gazoprovodov pri estestvenno nizkikh temperaturakh* [Welding of Polyethylene Pipes for Gas Pipelines at Naturally Low Temperatures]: thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), Moscow, 2012.
3. Shurayts, A.L., Kargin, V.Yu., Volnov, Yu.N., Gazoprovody iz polimernykh materialov: Posobie po proyektirovaniyu, stroitelstvu i ekspluatatsii [Gas Pipelines Made of Polymer Materials: A Manual for Design, Construction, and Operation], Saratov: Zhurnal "Volga – XXI vek", 2007.
4. Starostin, N.P., Ammosova, O.A., Sovershenstvovanie upravleniya okhlazhdeniem pri elektromuftovoy svarke polietilenovykh trub v usloviyakh nizkikh temperatur [Improving cooling control in electro-fusion welding of polyethylene pipes at low temperatures], *Voprosy materialovedeniya*, 2023, No 3 (115), pp. 147–158. URL: https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-115-3-147-158
5. Avdonin, N.A., Matematicheskoe opisanie protsessov kristallizatsii [Mathematical Description of Crystallization Processes], Riga: Zinatne, 1980.
6. Samarsky, A.A., Vabishchevich, P.N. *Vychislitelnaya teploperedacha* [Computational heat transfer], Moscow, 2003.
7. Chebbo, Z., Vincent, M., Boujlal, A., et al., Numerical and experimental study of the electrofusion welding process of polyethylene pipes, *Polymer Engineering and Science*, 2015, V. 55, No 1, pp. 123–131.
8. Gallager, R., *Metod konechnykh elementov. Osnovy* [Finite element method. basics], Moscow: Mir, 1984.
9. Streng, G., Fiks, D., *Teoriya metoda konechnykh elementov* [Theory of the Finite Element Method], Moscow: Mir, 1977.
10. FEniCS Library. URL: http://fenicsproject.org/ (reference date 11/11/2025)
11. Starostin, N.P., Ammosova, O.A., Petrov, D.D., Botvin, G.V., Danzanova, E.V., Tikhonov, R.S., Nikolaeva, M.A., *Sposob svarki polimernykh trub soedinitelnymi detalyami s zakladnymi nagrevatelyami* [Method for welding polymer pipes with connecting parts with embedded heaters], 2025, Patent RF, No 2849117.

12. Alifanov, O.M., Nenarokomov, A.V., Salosina, M.O., *Obratnye zadachi v teplovom proektirovanii i ispytaniyakh kosmicheskikh apparatov* [Inverse problems in thermal design and testing of spacecraft], Moscow: MAI, 2021.
13. Starostin, N.P., Ammosova, O.A., Effektivnost upravleniya dvizheniem fronta kristallizatsii pri svarke polietilenovykh trub v usloviyakh nizkikh temperatur [Efficiency of crystallization front movement control during welding of polyethylene pipes at low temperatures], *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2025, V. 17, No 5, pp. 235–243.

UDC 678.073+549.642.41

EFFECT OF A POLYMETHYLENE-*p*-TRIPHENYL BORATE ADDITIVE ON THE PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF WOLLASTONITE-FILLED ABS PLASTIC

V.G. USKOV[1], A.V. OZHOGIN[2], S.V. STROKOVA[1], S.G. ILYASOV[1]

[1] Institute of Chemical and Energy Technologies Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Sotsialististicheskaya St, 659322 Siberian Federal District, Altaysky Krai, Biysk, Russian Federation. E-mail: v_uskov98@mail.ru

[2] Biysk Technological Institute Branch of the Altai State Technical University named after I. I. Polzunov , 27 Trofimov St, 659305 Siberian Federal District, Altaysky Krai, Biysk, Russian Federation

Received June 17, 2026
Revised August 4, 2026
Accepted August 11, 2026

Abstract—This study focuses on the development of a versatile ABS-based polymer composite material suitable for processing via both injection molding and 3D printing. Natural wollastonite was used as the filler. ABS-based composites containing up to 40% wollastonite were produced. The composition containing ABS and 20% wollastonite exhibited the optimal combination of properties, showing an increase in the modulus of elasticity of 6% for injection-molded samples and 14% for 3D-printed samples (compared to neat ABS). The addition of polymethylene-*p*-triphenyl borate to this composite further increased the tensile strength by 6% and the modulus of elasticity by 28% in injection-molded samples. For 3D-printed composite samples, the addition of poly-methylene-*p*-triphenyl borate increased the tensile strength by 6% and the modulus of elasticity by 19%. Thus, the ability of polymethylene-*p*-triphenyl borate to enhance interaction at the polymer-filler interface was demonstrated. The proposed composites were processed using injection molding, and filaments for 3D printing were also produced from them. A similar pattern of property changes was observed for samples manufactured by the different methods. It was found that wollastonite forms agglomerates within the composite. A polymer composite material with improved physicochemical and mechanical properties was successfully obtained; it can be used to manufacture functional parts via various methods, such as injection molding and 3D printing.

Keywords: wollastonite, 3D printing, polymer composite materials, additive technologies, filament, ABS plastic, FDM.

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-142-151

ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out within the framework of the core project No FUFE-2024-0011, "Development of advanced technologies for small-scale chemistry," using the instrumentation facilities of the Biysk Regional Shared-Use Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPKhET SB RAS, Biysk).

REFERENCES

1. Petrova, G.N., Larionov, S.A., Platonov, M.M., Perfilova, D.N., Thermoplastic materials of new generation for aviation, *Aviation Materials and Technologies*, 2017, pp. 420–436. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436
2. Lobov, E., Dobrydneva, A., Vindokurov, I., Tashkinov, M., Effect of Short Carbon Fiber Reinforcement on Mechanical Properties of 3D-Printed ABS, *Polymers*, 2023, V. 15 (9), Art. 2011. URL: https://doi.org/10.3390/polym15092011
3. Adeniran, O., Cong, W., Bediako, E., Aladesanmi, V. Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites: The Effect of Fiber Content on Compressive Properties, *Journal of Composites Science*, 2021, V. 5 (12), Art. 325. URL: https://doi.org/10.3390/jcs5120325
4. Yagrushkina, I.N., Dyuldina, M.V., Nogachev, A.G., Yakunin, K.P., Development of impact resistant polymer composition ABS/PC for automotive industry, *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2021, V. 2, pp. 80–88. DOI: https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-2-80-88

5. Moore, J.D., Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) – A Review, *Composites*, 1973, V. 4, pp. 118–130. URL: https://doi.org/10.1016/0010-4361(73)90585-5
6. Kovalenko, R.V., Modern polymeric materials and 3D printing technologies, *Bulletin of Kazan Technological University*, 2015, V. 18, Is. 1, pp. 263–266.
7. Chan, J.X., Wong, J.F., Hassan, A., Mohamad, Z., Othman, N. Mechanical properties of wollastonite reinforced thermoplastic composites: A review, *Polymer Composites*, 2019, pp. 1–35. URL: https://doi.org/10.1002/pc.25403
8. Wong, J.F., Chan, J.X., Hassan, A.B., et al., Thermal and flammability properties of wollastonite-filled thermoplastic composites: a review, *J Mater Sci*., 2021, V. 56, pp. 8911–8950. URL: https://doi.org/10.1007/s10853-020-05255-5
9. Wang, C.L., Zheng, S.L., Wang, H.F., Evaluation of Mechanical Properties of Polyamide 6(PA6) Filled with Wollastonite and Inorganic Modified Wollastonite, *Applied Mechanics and Materials*, 2012, V. 217–219, pp. 522–525. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.217-219.522
10. Yuan, X., Easteal, A.J., Bhattacharyya, D., Mechanical performance of rotomoulded wollastonite-reinforced polyethylene composites, *International Journal of Modern Physics B*, 2007, V. 21, No 07, pp. 1059–1066. URL: https://doi.org/10.1142/s0217979207036916
11. Meng Xiang Hai, et al., Evaluation of Mechanical Properties of Wollastonite/SBR Composite, *Advanced Materials Research*, 2011, V. 217–218, pp. 286–289. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.217-218.286
12. Tozhiev, P.Zh., Normurodov, B.A., Turaev, Kh.Kh., Dzhalilov, A.T., Physicomechanical properties of composite materials based on polyethylene and wollastonite, *Universum: technical sciences*, 2018, No 12/63.
13. Danilova, S.N., Yarusova, S.B., Okhlopkova, A.A., et al., Vliyanie sinteticheskogo vollastonita s razlichnoi morfologiei chastits na formirovanie poverkhnosti treniya kompozitov na osnove SVMPE [The effect of synthetic wollastonite with different particle morphologies on the formation of the friction surface of UHMWPEbased composites], *Materialovedenie*, 2025, No 4, pp. 26–35. DOI: 10.31044/1684-579X-2025-0-4-26-35
14. Gottlieb, E.M., Khasanova, A.R., Galimov, E.R., Sokolova, A.G., Epoxy antifriction materials with wollastonite, *Bulletin of MGSU*, 2019, V. 14, Is. 3 (125), pp. 311–321.
15. Khasanova, A.R., Effect of modification of epoxy compositions with wollastonite on the hardness of materials for mechanical engineering, 2017, pp. 373–376.
16. Gotlib, E.M., Galimov, E.R., Khasanova, A.R., et al., Dynamic mechanical properties of epoxy materials filled with wollastonite, *Bulletin of the Technological University*, 2018, V. 21, No 1, pp. 5–9.
17. Belousov, A.M., *Friction polymer composition*, 2004, N 2275394 C2.
18. Savostin, I.K., *Asbestos-free friction polymer composition*, 2009, No 2007134233/04.
19. Abdrakhimova, E.S., Abdrakhimov, V.Z., Ispolzovanie vollastonita v proizvodstve kerami-cheskikh izdeliy [The use of wollastonite in the production of ceramic products], *Materialovedenie*, 2004, No 10, pp. 47–52.
20. Devi, S.Y., Jagadish, D.R.L., Srikanth, S., Studies on wollastonite reinforced recycled ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) composites, *Interantional journal of scientific research in engineering and management*, 2022, V. 3, pp. 1–4. DOI: 10.55041/IJSREM11577
21. Huang, Ts., Enhancement of mechanical and tribotechnical properties of UHMWPE composites by incorporating silicon-containing fibers functionalized with silane reagents: doctoral thesis, Tomsk, 2021.
22. Panin, S.V., Kornienko, L.A., Buslovich, D.G., et al., Effect of UHMWPE powder size onto tribological and mechanical properties of composites loaded with functionalized chopped glass fibers, *AIP Conference Proceedings: Proceedings of the International Conference*, Tomsk, 01–05 October 2019, V. 2167, Tomsk, 2019, p. 020265. DOI 10.1063/1.5132132
23. Panin, S.V., Kornienko, L.A., Huang, Ts., et al., Mechanical and tribological properties of composites based on UHMWPE with glass fiber functionalized with silane-containing modifiers (part 2), *Assembly in mechanical engineering, instrument making*, 2019, No 9, pp. 407–414.
24. Novopoltseva, O.M., Keibal, N.A., et al., Effect of modification of mineral microfibers on the properties of fire- and heat protective coatings, *Izvestia Volgograd State Technical University*, 2021, May. DOI:10.35211/1990-5297-2021-5-252-42-47
25. Kurbanova, R.V., Kahramanov, N.T., Shatirova, M.I, et al., Synthesis of organosilicon compounds for finishing nanocomposites based on quartz and high-density polyethylene, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol*., 2018, V. 61, No 2, pp. 65–72. URL: https://doi.org/10.6060/tcct.20186102.5626
26. Ozhogin, A.V., Lensky, M.A., Korabelnikov, D.V., Svirina, Yu.Yu., Study of organoboron oligomers as strength modifiers for fiberglass plastics, *Plastics*, 2014, No 5–6, pp. 33–36.
27. Korabelnikov, D.V., *Improving the performance characteristics of polymer friction compositions by adding polymethylene-p-triphenyl ether of boric acid*: doctoral thesis, Biysk, Russia, 2012.

28. Ozhogin, A.V., Lensky, M.A., Korabelnikov, D.V., Novitsky, A.N., Organoboron oligomers as UV stabilizers for fiberglass, *Plastics*, 2018, No 11–12, pp. 58–60.
29. Danilova, S.N., Dyakonov, A.A., Vasilev, A.P., Okhlopkova, A.A., Tuisov, A.G., Kychkin, A.K., Kychkin, A.A., Effect of Borpolymer on Mechanical and Structural Parameters of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, *Nanomaterials* (Basel), 2021, V. 11, Is. 12, Art. 3398. URL: https://doi.org/10.3390/nano11123398
30. Uskov, V.G., Ozhogin, A.V., Budovich K.I., et al., Study of UV-Resistance of ABS Plastic Modified with Polymethylene-*p*-Triphenyl Ester of Boric Acid, *South Siberian Scientific Bulletin*, 2024, No 3 (55), pp. 129–134.

UDC 621.762.34:621.891

EFFECTS OF THE METHOD OF REINFORCING DETONATION NANODIAMOND POWDER ADDITIVES ON THE STRUCTURE AND TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF A COMPOSITE MATERIAL

M.P. AKIMOVA[1], Cand Sc. (Phys-Math), P.P. SHARIN[2], Dr Sc. (Eng), A.V. SIVTSEVA[2], S.P. YAKOVLEVA[2], Dr Sc. (Eng)

[1] Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Oktyabrskaya St, 677980 Yakutsk, Russian Federation. E-mail: administration@iptpn.ysn.ru

[2] V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2 Petrovskogo St, 677000 Yakutsk, Russian Federation. E-mail: presidium@prez.ysn.ru

Received, March 27, 2026
Revised, April 17, 2026
Accepted, April 17, 2026

Abstract—The paper describes the effect of the method for introducing reinforcing additives from detonation nanodiamond powder on the structure and tribological characteristics of a composite material based on tin bronze (80% Cu – 20% Sn). A comparative analysis of two methods for introducing diamond nanoparticles—mechanical mixing using a gravitational mill and ultrasonic dispersion—was carried out. A set of research methods showed that the method of preparing the powder mixture significantly affects the density, porosity, phase composition, uniformity of nanodiamond distribution, and tribological properties of the composite. The material obtained by mechanical mixing is characterized by a more uniform distribution of nanodiamond particles, a lower friction coefficient (0.24±0.02), and a more stable surface after wear tests (0.84±0.12 μm), but it has higher porosity (6%) and somewhat increased linear (1.84×10^{-5} m) and mass wear (1.33×10^{-2} g) compared to the sample obtained by ultrasonic dispersion. The results show that the choice of method for introducing nanodiamond particles should be taken into account when developing antifriction composite materials based on tin bronze.

Keywords: composite materials, tin bronze, nanodiamonds, mechanical mixing, ultrasonic dispersion, structure, tribological properties, wear resistance, friction coefficient, porosity

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-2-7-152-165

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Registration No of RDTE 124032600081-1). The work was performed using the instruments and equipment of the Shared Research Facility of the Federal Research Center "Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" (FRC YSC SB RAS).

REFERENCES

1. Raikov, Yu.N., Ashikhmin, G.V., Polukhin, V.P., Gulyaev, A.S., *Mednye splavy: marki, svoistva, primenenie* [Copper alloys: grades, properties, application]: reference book, Moscow: Tsvetmetobrabotka, 2011.
2. Livramento, V., Correia, J.B., Shohoji, N., Osawa, E., Nanodiamond as an effective re-inforcing component for nano-copper, *Diamond and Related Materials*, 2007, V. 16, pp. 202–204.
3. Safonova, M.N., Fedotov, A.A., Syromiatnikova, A.S., Structural hardening of composite materials based on a metal matrix, *Procedia Structural Integrity*, 2020, V. 30, pp. 136–143.
4. Correia, J.B., Livramento, V., Shohoji, N., Tresso, E., Yamamoto, K., Taguchi, T., Hanada, K., Ōsawa, E., Bulk Copper-nanodiamond Nanocomposites: Processing and Properties, *Materials Science Forum*, 2008, V. 587–588, pp. 443–447.
5. Smirnov, V.M., Timofeev, D.A., Shalunov, E.P., Dispersno-uprochnennaia sviazka na osnove poroshkovoi medi dlia almaznogo instrumenta [Dispertion strengthened sheaf on the basis of powder copper for the diamond tool], *Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii i liteinom proizvodstve: materialy II mezhdunarodnoi nauchno-*

prakticheskoi konferentsii, Cheboksary, Chuvashsky gosudarstvenny universitet im. I.N. Ulianova, 2017, pp. 317–320.
6. Popov, V.A., Several Aspects of Application of Nanodiamonds as Reinforcements for Metal Matrix Composites, *Applied Science*, 2021, V. 11, pp. 4695.
7. Hanada, K., Nakayama, K., Sano, T., Imahori, A., Negishi, H., Mayuzumi, M., Fabrication and Characterization of Cluster Diamond Dispersed Copper-Based Matrix Composite, Materials and Manufacturing Processes, 2000, V. 15, No 3, pp. 325–345.
8. Popov, V.A., *Razrabotka sposopov polucheniya i uluchsheniya svoistv kompozitsionnykh materialov s primeneniem nanoporoshkov* [Development of methods for producing and improving the properties of composite materials using nanopowders]: thesis for the degree of Cand. of Sc. (Eng), Moscow, National University of Science and Technology MISIS, 2018, 359 p.
9. Sivtseva, A.V., Akimova M.P., Sharin P.P., Yakovleva, S.P., Vliyanie modifikatsii nano-almazami na tribologicheskie kharakteristiki kompozitsionnogo materiala na osnove olovyannoi bronzy [Effect of nanodiamond modification on the tribological characteristics of a tin bronze composite material], *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2025, V. 27, no 2, pp. 64–73.
10. Popov, V.A., Zaitsev, V.A., Issledovanie vozmozhnosti primeneniia nanoalmazov v kompozitsionnykh materialakh dlia uprochneniya aliuminievoi matritsy [Study of the possibility of using nanodiamonds in composite materials for strengthening the aluminum matrix], *Trudy V Mezhdunarodnoi konferentsii "Novye perspektivnye materialy i tekhnologii ikh polucheniia–2010"*, Volgograd, 2010, pp. 73–74.
11. Hanada, K., Matsuzaki, K., Sano, T., Thermal properties of diamond particle-dispersed Cu composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, V. 153–154, pp. 514–518.
12. Liang, Y., Meinhardt, T., Jarre, G., Ozawa, M., Vrdoljak, P., Schöll, A., Reinert, F., Krueger, A., Deagglomeration and surface modification of thermally annealed nanoscale diamond, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, V. 354 (1), pp. 23–30.
13. Josset, S., Muller, O., Schmidlin, L., Pichot, V., Spitzer, D., Nonlinear optical properties of detonation nanodiamond in the near infrared: Effects of concentration and size distribution, *Diamond and Related Materials*, 2013, V. 32, pp. 66–71.
14. Elomaa, O., Oksanen, J., Hakala, T.J., Shenderova, O., Koskinen, J., A comparison of tribological properties of evenly distributed and agglomerated diamond nanoparticles in lubricated high-load steel–steel contact, *Tribology International*, 2014, V. 71, pp. 62–68.
15. Bobrovnitchii, G.S., Skury, A.L.D., Monteiro, S.N., Tardim, R.C., Effect of nano-diamond addition on the mechanical properties of polycrystalline metallic and polymeric composites, *Material Science Forum*, 2010, V. 660–661, pp. 848–853.
16. Kaftelen, H., Öveçoğlu, M.L., Microstructural characterization and wear properties of ultra dispersed nanodiamond (UDD) reinforced Al matrix composites fabricated by ball milling and sintering, *Journal of Composite Materials*, 2012, V. 46, pp. 1521–1534.
17. Nunes, D., Livramento, V., Mardolcar, U.V., Correia, J.B., Carvalho, P.A., Tungsten–nanodiamond composite powders produced by ball milling, *Journal of Nuclear Materials*, 2012, V. 426, No 1–3, pp. 115–119.
18. Syam Sundar, L., Shusmitha, K., Singh, M.K., Sousa, A.C.M., Electrical conductivity enhancement of nanodiamond–nickel (ND–Ni) nanocomposite based magnetic nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, V. 57, pp. 1–7.
19. Sharin, P.P., Novy metod prigotovleniia tverdosplavnoi shikhty s uprochniaiushchimi nanochastitsami dlia izgotovleniia matrits almaznykh instrumentov [New method of preparation of carbide mixture with a reinforcing nanoparticles for making of the matrix of diamond tools], *Vestnik SVFU*, 2016, V. 51, No 1, pp. 78–87.
20. Sharin, P.P., Lebedev, M.P., Vinokurov, G.G., Gogolev, V.E., Petrov, P.P., Platonov, A.A., Atlasov, V.P., *Sposob prigotovleniia tverdosplavnoi shikhty s uprochniaiushchimi nanochastitsami* [Production of hard alloy charge with hardening nanosized particles], Patent RF, No 2525192, 2014.
21. Okhlopkova, T.A., Sharin, P.P., Okhlopkova, A.A., Borisova, R.V., *Sposob polucheniia kompozitsii iz polimera i nanorazmernykh napolnitelei* [Method of producing compositions of polymer and nano-sized filler], Patent RF, No 2586979, 2016.

WELDING, WELDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES

UDC 621.791.042

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF WELDING PROCESS PARAMETERS ON THE CHARACTERISTICS OF THE WELD METAL DEPOSITED USING MECHANIZED FLUX-CORED WIRE WELDING

A.L. GAVSHINSKY[1] Cand Sc. (Eng), P.V. MELNIKOV[2], Cand Sc. (Eng), V.B. GRIBANOVA[2]

[1] LLC Magmaweld-SPb, Novye Zavody, 56/5, 198517 St Petersburg, Peterhof, Russian Federation. E-mail: Russia@magmaweld.com

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

Received, April 1, 2026

Revised, May 13, 2026

Accepted, May 15, 2026

Abstract—The issue of constancy of welding-technological, mechanical properties and chemical composition of deposited metal during welding with flux-cored wire grade 48PP-8N while varying welding parameters (welding current, arc voltage, welding speed, and shielding gas composition) is considered.

Keywords: flux-cored wire, heat input, mechanical properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-166-172

REFERENCES

1. Pozdnyakov, V.D., Markashova, L.I., Zhdanov, S.L., Berdnikova, E.N., Zavdoveev, A.V., Maksimenko, A.A., Sopostavlenie metodik otsenki vliyaniya termicheskogo tsikla svarki na udarnuyu vyazkost metalla ZTV svarnykh soedineniy nizkolegirovannykh staley [Comparison of methods for assessing the impact of the welding thermal cycle on the impact strength of the metal in the weld zone of low-alloy steels], *Avtomaticheskaya svarka*, 2016, No 10 (757), pp. 28–34.
2. Pozdnyakov, V.D., Zavdoveev, A.V., Zhdanov, S.L., Maksimenko, A.V., Vliyanie termicheskogo tsikla svarki na strukturu i svoistva metalla ZTV vysokoprochnoi stali kontroliruemoy prokatki [Influence of the welding thermal cycle on the structure and properties of the metal in the weld zone of high-strength controlled-rolling steel], *Avtomaticheskaya svarka*, 2018, No 10, pp. 11–165.
3. Karkhin, V.A., Tishkov, M.K., Aldaie, Ya., Parshin, S.G., Levchenko, A.M., Metodika prognozirovaniya mikrostruktury i mekhanicheskikh svoistv zony termicheskogo vliyaniya svarnogo soedineniya iz vysokoprochnoy stali v razlichnykh sredakh [Methodology for predicting the microstructure and mechanical pro-perties of the heat-affected zone of a high-strength steel weld in various environments], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2024, No 8 (830), pp. 60–66.
4. Wang, W., Wang, H.R., Laboratory Development of High Strength Steel Plates with Excellent HAZ Toughness at Large Heat Inputs, Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co, Ltd, Shanghai 201900, China
5. Fastov, S.A., Zorin, I.V., Kharlamov, V.O., Lysak, V.I., Issledovanie vliyaniya pogonnoi energii na strukturu naplavlennogo metalla beinitnogo klassa [Study of the effect of linear energy on the structure of bainitic weld metal], *Izvestiya VolgGTU*, 2022, pp. 58–62.
6. *Pravila tekhnicheskogo nablyudeniya za postroykoy sudov i izgotovleniem materialov i izdeliy dlya sudov. Ch. 3. Tekhnicheskoe nablyudenie za izgotovleniem materialov* [Rules for technical supervision of shipbuilding and the production of materials and products for ships. Part 3. Technical supervision of the production of materials].
7. *Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Ch. 14. Svarka* [Rules for the Classification and Construction of Marine Vessels. Part 14. Welding].
8. GOST 26271-84: *Provoloka poroshkovaya dlya dugovoy svarki uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley: Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Shipbuilding steel of normal, increased, and high strength. Technical specifications].
9. GOST 26271-84: *Provoloka poroshkovaya dlya dugovoi svarki uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley* [Shipbuilding steel of normal, increased, and high strength. Technical specifications].
10. GOST 6996-66: *Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv* [Welded joints. Methods for determining mechanical properties].
11. GOST 1778-2022: *Metalloproduktsiya iz staley i splavov. Metallograficheskie metody opredeleniya nemetallicheskikh vklyucheniy* [Metal products made of steels and alloys. Metallographic methods for determi-ning non-metallic inclusions].

UDC 621.791.92

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF A WELD OVERLAY PRODUCED BY ELECTROSLAG STRIP CLADDING USING A 25% Cr – 22% Ni – 2% Mo – 0.2% N ALLOY FOR EQUIPMENT OPERATING IN UREA SYNTHESIS ENVIRONMENTS

N.I. ZATOKOVENKO[1], M.N. TIMOFEEV[2], Cand Sc. (Eng), D.Kh. STARTSEVA[1], A.Yu. PANSHIN[3], E. I. KUTSENKO[1], A. S. SAVELKOV[1]

[1] JSC Uralkhimmash, 33 Khibinogorsky Lane, 620010 Ekaterinburg, Russian Federation

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

[3] JSC NIIK, 31 Griboedova St, 606008 Dzerzhinsk, Russian Federation. E-mail: Nikolay.Zatokovenko@sinara-group.com

Received June 10, 2026

Revised June 15, 2026

Accepted June 20, 2026

Abstract—The results of a study of the structure, mechanical, and corrosion properties of a multilayer homoge-neous weld deposit of 25% Cr – 22% Ni – 2% Mo – 0.2% N grade on 14CrMnSi steel, produced using the electroslag strip cladding without subsequent heat treatment, are presented. It is shown that electroslag specified strip cladding provides a high-quality weld surface, the chemical composition of which matches that of 02Cr25Ni22NMo2 steel. Despite the absence of heat treatment, the heat-affected zone does not exhibit elevated hardness values. The deposited metal structure is austenitic and is free of defects such as hot cracks. The use of electroslag cladding technology ensures uniform hardness distribution across the entire cross-section of the deposited part, resulting in high deformation capacity, confirmed by static bending test results.

Keywords: anti-corrosion surfacing, electroslag cladding, hardness of deposited metal, intergranular corrosion, austenitic structure

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-173-182

REFERENCES

1. Kuzyukov, A.N., Krikun, V.P., Mezhkristallitnaya korroziya oborudovaniya proizvodstva karba-mida, izgotovlennogo iz nizkouglerodistykh austenitnykh stalei [Intergranular corrosion of urea production equipment made of low-carbon austenitic steels], *Zashchita metallov*, 1996, V. 32, No 4, pp. 364–367.
2. Feldgandler, E.G., Savkina, L.Ya., Kristal, M.M., et al., Novaya korrozionnostoikaya stal 02H25N22AM2 dlya sred povyshennoj agressivnosti [New corrosion-resistant steel 02X25N22AM2 for highly aggressive environments], *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie*, 1992, No 8, pp. 27–29.
3. Feldgandler, E.G., Svistunova, T.V., Savkina, L.Ya., Lapshina, O.B., Osobo nizkouglerodistaya azotsoderzhashchaya austenitnaya stal 02H25N222AM2 [Special low-carbon nitrogen-containing austenitic steel 02X25N222AM2], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1996, No 2, pp. 27–31
4. Pak, S., Rigdal, S., Karlsson, L., Gustavsson A.-Ch., Electroslag and Submerged Arc Stainless Steel Strip Cladding, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 1998, V. 45 No 1, pp. 41–47.
5. Timofeev, M.N., Morozovskaya, I.A., Galyatkin, S.N., Zatokovenko, N.I., Kutsenko, E.I., Lozovitsky, N.A., Issledovanie korrozionnostoikikh naplavok oborudovaniya AEU, vypolnennykh lentochnym elektrodom dugovym i elektroshlakovym sposobami [Research on corrosion-resistant surfacing of nuclear power plant equipment performed using a tape electrode by the arc and electroslag methods], *Voprosy materialovedeniya*, 2021, No 1 (105), pp. 94–106.
6. Mitrofanov, V.M., Mastenko, V.Yu., Volosov, N.A., Lobanov, E.S., Issledovanie i attestatsiya materialov i tekhnologii avtomaticheskoi elektroshlakovoi naplavki lentoi pod flyusom i privarki vnutrikorpusnykh ustroistv k vnutrennim poverkhnostyam korpusov emkosti sistemy bystrogo vvoda bora [Research and certification of materials and technologies for automatic electroslag welding with a flux-cored tape and welding of internal devices to the internal surfaces of the containers of the rapid boron injection system], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2021, No 7–8, pp. 10–16.
7. Mastenko, V.Yu., Volobuev, Yu.S., Volosov, N.A., Mitrofanov, V.M., Simonova, O.N., Korolev, S.Yu., Potapov, N.N., Issledovanie svoistv naplavlennogo metalla i plakirovannogo soedineniya, poluchennogo pri elektroshlakovoi naplavke odnorodnogo odnosloinogo antikorrozionnogo pokrytiya na vnutrennyuyu poverkhnost trub glavnogo tsirkulyatsionnogo truboprovoda AEU [Study of the properties of the weld metal and clad joint obtained by

electroslag welding of a homogeneous single-layer anti-corrosion coating on the inner surface of the pipes of the main circulation pipeline of the nuclear power plant], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2021, No 9, pp. 3–14.
8. Sattari-Far, I., Andersson, M., Cladding Effects on Structural Integrity of Nuclear Components, *Ski Report*, 2006, V. 23, pp. 4–5.
9. Karzov, G.P., Galyatkin, S.N., Mikhaleva, E.I., Morozovskaya, I.A., Problemy sozdaniya svarochnykh materialov dlya naplavki antikorrozionnogo pokrytiya korpusov reaktorov atomnykh energeticheskikh ustanovok s vodnym teplonositelem [Problems of creating welding materials for overlaying an anti-corrosion coating on the reactor housings of nuclear power plants with water coolant], *Voprosy materialovedeniya*, 2007, No 2 (42), pp. 129-143.
10. EN ISO 14343: 2009: *Welding consumables* – Wire electrodes, strip electrodes, wires and rods for arc welding of stainless and heat resisting steels – Classification.
11. EN ISO 14174:2019: *Welding consumables* – Fluxes for submerged arc welding and electroslag welding – Classification.
12. GOST R 54153-2010: *Stal. Metod atomno-emissionnogo spektralnogo analiza* [Steel. Atomic emission spectral analysis method].
13. GOST 9012-59: *Metally. Metod izmereniya tverdosti po Brinellyu* [Metals. Brinell hardness measurement method].
14. GOST R ISO 6507-1-2007: *Metally i splavy. Izmerenie tverdosti po Vikkersu. Ch. 1. Metod izmereniya* [Metals and alloys. Measurement of Vickers hardness. Part 1. Measurement method].
15. GOST 6996-66: *Svarnye soedineniya. Metody ispytaniy na stoikost protiv mezhkristallitnoi korr*ozii [Welded joints. Methods for determining mechanical properties].
16. GOST 6032-2017: *Stali i splavy korrozionno-stoikie. Metody ispytaniy na stoikost protiv mezhkristallitnoi korrozii* [Corrosion-resistant steels and alloys. Methods of testing for resistance to intergranular corrosion].
17. GOST 5632-2014: *Legirovannye nerzhaveyushchie stali i splavy korrozionno-stoikie, zharostoikie i zharoprochnye. marki* [Alloyed stainless steels and alloys are corrosion-resistant, heat-resistant, and heat-resisting. Stamps].
18. GOST R 54803-2011: *Sosudy stalnye svarnye vysokogo davleniya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [High-pressure welded steel vessels. General technical requirements].
19. Paschhold, R., Karlsson, L., Gittos, M.F., Disbonding of Austenitic Weld Overlays in Hydroprocessing Applications, *The ESAB Welding and Cutting Journal*, 2007, V. 62, No 1, pp. 10–15.
20. Karlsson, L., Pak, S., Gustavsson, A.C., Improved disbonding resistance and lower consu-mable cost – new strip cladding concept for hydrogen atmospheres, *Svetsaren* (ESAB Welding-WPSAmerica), 2007, Issue 1.21
21. Lippold, D., Kotegi, D., Metallurgiya svarki i svarivaemost nerzhaveyushchikh stalei [Welding metallurgy and weldability of stainless steels], St Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011.
22. Sokol, I.Ya., Ulyanin, E.A., Feldgandler, E.G., et al., Struktura i korroziya metallov i splavov [Structure and corrosion of metals and alloys]: reference book, Moscow: Metallurgiya, 1989.

UDC 621.791.92:621.039.536.2

SPECIFICS OF TECHNOLOGY AND MATERIALS FOR ELECTROSLAG STRIP SURFACING OF PRESSURE VESSEL COMPONENTS FOR NUCLEAR POWER PLANTS OF JSC NPO TSNIITMASH

V.M. MITROFANOV, N.A. VOLOSOV, Cand Sc. (Eng), N. N. POTAPOV, Dr Sc. (Eng), S.Yu. VOLOBUEV
JSC NPO "TsNIITMASH", 4 Sharikopodshipnikovskaya St, build. 1A, 115088 Moscow, Russian Federation

Received April 7, 2026
Revised April 15, 2026
Accepted April 27, 2026

Abstract—The comparative features of two strip cladding methods are presented. The advantages of electroslag strip cladding (ESC) are shown. The cladding materials composition is described. The operating principle of magnetic systems used for magnetic control of the welding pool during ESC is described. For the first time, the effect of zenith shift on the cladding properties of cylindric surface, including chemical composition and resistance to intergranular corrosion, has been established. The identified correlations allow to predict single layer cladding properties.

Keywords: electroslag strip cladding, magnetic control system, agglomerated flux, zenith shift
DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-6-183-195

REFERENCES

1. Mastenko, V.Yu., Starchenko, E.G., Volobuev, Yu.S., Issledovanie protsessa i razrabotka materialov i tekhnologii elektroshlakovoi naplavki pod flyusom korrozionnogo pokrytiya poverkhnostei atomnoenergeticheskogo i

khimicheskogo oborudovaniya [Research into the process and development of materials and technology for electroslag surfacing under flux for corrosionresistant coating of surfaces of nuclear power and chemical equipment], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2011, No 5, pp. 6–11.
2. Mastenko, V.Yu., Volobuev, Yu.S., Volosov, N.A, Mitrofanov, V.M., Simonova, O.N., Korolev, S.Yu., Issledovanie svoistv naplavlennogo metalla i plakirovannogo soedineniya, poluchennogo pri elektroshlakovoi naplavke odnorodnogo odnosloinogo antikorrozionnogo pokrytiya na vnutrennyuyu poverkhnost trub glavnogo tsirkulyatsionnogo truboprovoda AEU [A study of the properties of the deposited metal and the clad joint obtained through electroslag surfacing of a uniform singlelayer anticorrosion coating on the inner surface of the pipes of the main circulation pipeline of the nuclear power plant], *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2021, No 2, pp. 15–26.
3. Huwer, W., Einhorn, F., Leistungssteigerung beim Unterpuver – Auftragschweissen mit Bandelektrode, *DVS-Berichte*, 1974, No 32, pp. 91–97.
4. Nahano, S., Nishiyama, N., Hiro, T., Tsuboi, J., MAGLAY Process – Electro-Magnetic Controlled Overlay Welding Process with ESW, Kawasaki Steel Technical Report, 1981, No 2.
5. Kalensky, V.K., Osobennosti i nekotorye tekhnologicheskie kharakteristiki protsessa elektroshla-kovoi naplavki odnoi elektrodnoi lentoi [Features and some technological characteristics of the electroslag surfacing process using a single electrode strip]: overview, *Avtomaticheskaya svarka*, 1999, No 3, pp. 16–21.
6. Seidel, G., Hess, H., Untersuchungen zum Elektro-Schlake-Plattieren mit Bandelektroden in waagerechter Position, Abschlussbericht des Forschungsvorhabens. SLV Duisburg, 1975, No 2689.
7. Nahano, S., Nishiyama, N., Hiro, T., Tsuboi, J., MAGLAY Process – Electro-Magnetic Controlled Overlay Welding Process with ESW, *Kawasaki Steel Technical Report*, 1980, No 12, V. 1, pp. 177–188.
8. Bemst, A.V., Daemen, R., Placage en conche d'acier inoxydable a bas C par soudage sous laitier electro-conducteur avec feuillard, *DVS Berichte*, 1982, No 75, pp. 17–20.
9. Volobuev Yu.S., Mastenko V.Yu., Volobuev S.Yu., Potapov N.N., Pevkin P.S. Spetsialny keramichesky flyus dlya antikorrozionnoi lentochnoi naplavki v elektroshlakovom rezhime oborudovaniya dlya AES i neftekhimii [Special ceramic flux for anticorrosion strip surfacing in the electroslag mode for equipment used in nuclear power plants and the petrochemical industry], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2014, No 11, pp. 6–12.
10. Volobuev, Yu.S., Starchenko, E.G., Mastenko, V.Yu., Volobuev, S.Yu., *Flyus dlya avtomaticheskoi naplavki lentochnym elektrodom*: Patent RF No 2526623 MPK V23K 35/362 [Flux for automatic surfacing with a strip electrode / registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on 02.07.2014. Patent for invention No 2526623, IPC B23K 35/362].
11. Potapov, N.N., Volobuev, Yu.S., Kurlanov, S.A., Kolichestvennaya otsenka metallurgicheskikh svoistv svarochnykh flyusov [Quantitative assessment of the metallurgical properties of welding fluxes], *Svarochnoe proizvodstvo*, 1980, No 10, pp. 4–6.
12. Mitrofanov, V.M., Issledovanie vliyaniya magnitnogo polya na kharakter formirovaniya vali-kov pri elektroshlakovoi naplavke lentoi pod flyusom odnorodnogo odnosloinogo antikorrozionnogo pokrytiya. Ch. 1: Magnitnoe pole pri elektroshlakovoi naplavke lentoi. Razrabotka modeli i raschet ego velichiny [A study of the influence of the magnetic field on the pattern of bead formation during electroslag surfacing with a tape under flux of a homogeneous singlelayer anticorrosion coating. Part 1: The magnetic field during electroslag surfacing with a tape. Model development and calculation of its magnitude], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2024, No 1–2, pp. 19–25.
13. Mitrofanov, V.M., Issledovanie vliyaniya magnitnogo polya na kharakter formirovaniya valikov pri elektroshlakovoi naplavke lentoi pod flyusom odnorodnogo odnosloinogo antikorrozionnogo pokrytiya. Ch. 2: Eksperimentalnoe issledovanie osobennostei vzaimodeistviya sobstvennogo i vneshnego magnitnykh polei [Study of the influence of the magnetic field on the pattern of bead formation during electroslag surfacing with a tape under flux to create a uniform singlelayer anticorrosion coating. Part 2: Experimental study of the features of the interaction between the selfgenerated and external magnetic fields], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2024, No 3, pp.14–20.
14. Mitrofanov, V.M., Volosov, N.A., Issledovanie vliyaniya formy magnitnykh nakonechnikov na parametry vneshnego magnitnogo polya pri elektroshlakovoi naplavke lentoi pod keramicheskim flyusom [A study of the influence of the shape of magnetic tips on the parameters of the external magnetic field during electroslag surfacing with a tape under a ceramic flux], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2025, No 3, pp. 5–12.
15. Mastenko, V.Yu., Volobuev, Yu.S., Volosov, N.A., Mitrofanov, V.M., Simonova, O.N., Komolov, V.N., Elektroshlakovaya naplavka lentoi pod keramicheskim flyusom odnorodnogo odnosloinogo antikorrozionnogo pokrytiya vnutrennei poverkhnosti trub diametrom 850 i 990 mm dlya AES [Electroslag surfacing with a tape under a ceramic flux to create a uniform singlelayer anticorrosion coating on the inner surface of pipes with diameters of 850 and 990 mm for nuclear power plants], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2019, No 11, pp. 29–37.

16. Timofeev, M.N., Morozovskaya, I.A., Galyatkin, S.N., Zatokovenko, N.I., Kutsenko, E.I., Lozovitsky, N.A., Issledovanie korrozionno-stoikikh naplavok oborudovaniya AEU, vypolnennykh lentochnym elektrodom dugovym i elektroshlakovym sposobami [A study of corrosionresistant surfacing of equipment for nuclear power plants, carried out using a strip electrode by arc and electroslag welding methods], *Voprosy materialovedeniya*, 2021, No 1, pp. 94–106.

CORROSION AND PROTECTION OF METALS

UDC 621.357.74:669.5'24:620.197

DEVELOPMENT OF A BORON-FREE SULFATE-ACETATE ELECTROLYTE FOR THE ELECTROCHEMICAL DEPOSITION OF ANTICORROSIVE ZINC-NICKEL ALLOY COATINGS

S.Yu. KIREEV, Dr Sc. (Eng)

Penza State University, 40 Krasnaya St., 440026 Penza, Russian Federation

Received January 26, 2026

Revised March 30, 2026

Accepted May 12, 2026

Abstract—A boron-free, sulfate-acetate-based electrolyte is proposed for producing protective Zn–Ni alloy coatings. The influence of process parameters—such as cathodic current density, metal ion concentration ratios, acetate and citrate ion content, pH, and temperature—on alloy composition and process efficiency was analyzed. Optimal process parameters were established to yield coatings with a nickel content of 12–15 wt.% and a high current efficiency of 85–92%. The resulting coatings exhibit high corrosion resistance in neutral salt spray tests (withstanding 2000–3000 hours before the appearance of red rust), outperforming existing materials. Electrolyte stability was confirmed through long-term operation tests with a total load of up to 300 ampere-hours per liter of solution. The electrolyte composition and processing conditions are proposed for implementation in industrial production.

Keywords: electrodeposition, Zn–Ni alloy, boron-free electrolyte, sulfate-acetate, corrosion resistance, current efficiency

DOI: 10.22349/1994-6716-2026-127-3-196-207

REFERENCES

1. Koch, G., *Cost of corrosion: Trends in oil and gas corrosion research and technologies*, Woodhead Publishing, 2017, pp. 3–30. DOI: 10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2
2. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast), *Official Journal of the European Union*, 2011, OJ L 174, 01.07.2011. pp. 88–110.
3. Fashu, S., Khan, R., Recent work on electrochemical deposition of Zn–Ni (-X) alloys for corrosion protection of steel, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2019, V. 66, No 1, pp. 45–60. DOI: 10.1108/ACMM-06-2018-1957
4. Abou-Krisha, M.M., Electrochemical studies of zinc–nickel codeposition in sulphate bath, *Applied Surface Science*, 2005, V. 252, Is. 4, pp. 1035–1048. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.01.161
5. *Regulation (EC) No 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures*, OJ L 353, 31.12.2008, pp.1–1355.
6. Maniam, K.K., Paul, S., Progress in electrodeposition of zinc and zinc nickel alloys using ionic liquids, *Applied Sciences*, 2020, V. 10, No 15, p. 5321. DOI: 10.3390/app10155321
7. Anwar, S., Zhang, Y., Khan, F., Electrochemical behaviour and analysis of Zn and Zn–Ni alloy anti-corrosive coatings deposited from citrate baths, RSC Advances, 2018, V. 8, No 51, pp. 28861–28873. DOI: 10.1039/C8RA04650F
8. Beltowska-Lehman, E., Ozga, P., Swiatek, Z., Lupi, C., Electrodeposition of Zn–Ni protective coatings from sulfate–acetate baths, *Surface and Coatings Technology*, 2002, V. 151–152, pp. 444–448. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01614-0
9. Mosavat, S.H., Shariat, M.H., Bahrololoom, M.E., Study of corrosion performance of electrodeposited nanocrystalline Zn–Ni alloy coatings, *Corrosion Science*, 2012, V. 59, pp. 81–87. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.02.012
10. Bernasconi, R.. et al., Electrodeposition of ZnNi Alloys from Ethylene Glycol for Corrosion Protection, *Electrochemical Society Meeting Abstracts*, 2020, V. MA2020-01 1228. DOI: 10.1149/MA2020-01201228mtgabs
11. Bae, S.H., et al., Effect of solution temperature on electrodeposition behavior of Zn–Ni alloy from alkaline zincate solution, *ISIJ International*, 2022, V. 62, Is. 7, pp. 1522–1531. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-076

12. Kireev, S.Yu., Perelygin, Yu.P., Kireeva, S.N., Jaskula, M.J., Methods to determine the current efficiency in AC electrolysis, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, V. 46, pp. 343–352. DOI: 10.1007/s13369-020-04786-y
13. Hegde, A.C., Venkatakrishna, K., Eliaz, N., Electrodeposition of Zn–Ni, Zn–Fe and Zn–Ni–Fe alloys, *Surface and Coatings Technology*, 2010, V. 205, Is. 7, pp. 2031–2041. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.102
14. Hosseini, M.G., Ashassi-Sorkhabi, H., Ghiasvand, H.A.Y., Electrochemical studies of Zn–Ni alloy coatings from non-cyanide alkaline bath containing tartrate as complexing agent, *Surface and Coatings Technology*, 2008, V. 202, Is. 13, pp. 2897–2904. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.10.022
15. Anwar, S., Khan, F., Zhang, Y.H., The Performance of Zn-Ni Alloy Coating Electro-deposited from Stabilized Bath, *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2022, V. 1058, pp. 149–155. DOI: 10.4028/p-qxs29h
16. Chelaru, J.D., Felecan, M.O., The study of the corrosion zinc-nickel coated ST2 stainless steel, *Machines. Technologies. Materials*, 2023, V. 17 No 7, pp. 275–277.
17. Durairajan, A., et al., Development of a New Electrodeposition Process for Plating of Zn–Ni–X (X = Cd, P) Alloys: I. Corrosion Characteristics of Zn–Ni–Cd Ternary Alloys, *Journal of the Electrochemical Society*, 2000, V. 147, No 5, pp. 1781–1786. DOI: 10.1149/1.1393434
18. Kirikova, D.I., Kireeva, S.N., Kireev, S.Yu., Perelygin, Yu.P. Elektroosazhdenie tsinka iz kislogo laktatnogo elektrolita s ispolzovaniem unipolyarnogo galvanostaticheskogo rezhima impulsnogo elektroliza [Electrodeposition of zinc from acidic lactate electrolyte using unipolar galvanostatic pulse electrolysis mode], *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 2016, V. 24, No 3, pp. 32–38. DOI: 10.47188/0869-5326_2016_24_3_32
19. Kireev, S.Yu., Frolov, A.V., Electrodeposition of nickel coatings from acetate-chloride electrolyte using galvanostatic pulse electrolysis, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2021, V. 57, pp. 1375–1379. DOI: 10.1134/S2070205121070078
20. Kireev, S.Yu., Kozlov, G.V., Kireeva, S.N., Yangurazova, A.Z., Kirilina, Yu.N., The Effect of Electrolysis Modes on Internal Stresses in Electroplates, *Russian Journal of Electrochemistry*, 2025, V. 61, No 11, pp. 773–778. DOI: 10.1134/S1023193525601007

RADIATION MATERIALS SCIENCE

UDC 621.039.531:669.15–194.56:620.194.2

INVESTIGATION OF STRESS CORROSION CRACKING IN IRRADIATED AUSTENITIC MATERIALS FOR REACTOR COMPONENTS OPERATING WITH SUPERCRITICAL COOLANT PARAMETERS

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), N.E. PIROGOVA, Cand Sc. (Eng), A.A. SOROKIN, Cand Sc. (Eng)
NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: npk6@crism.ru

Received April 23, 2026
Revised May 20, 2026
Accepted May 20, 2026

Abstract—Studies were conducted on the stress corrosion cracking (SCC) resistance of three irradiated austenitic materials in an aqueous environment simulating the primary coolant of the MTIR—a proposed supercritical-pressure water-cooled research reactor. Two austenitic chromium-nickel steels are being considered as candidate materials for the reactor's internal components, while the third material is a candidate for the corrosion-resistant cladding of the reactor vessel. Based on autoclave tests performed at various stress levels and the subsequent identification of microcracks via SEM, the threshold stress—below which SCC does not occur for the given irradiated state of the material—was determined for each material. The results obtained guided the selection of materials capable of ensuring freedom from SCC during the operation of the MTIR reactor.

Keywords: stress corrosion cracking, irradiated austenitic materials, autoclave tests, supercritical pressure, microcrack, coolant
DOI: 10.22349/1994-6716-2026-126-3-208-231

REFERENCES

1. Sedov A. A., Blandinskiy V. Yu., Kotov Ya. A. et al., Kontseptsiya yadernoy energeticheskoy ustanovki na baze mnogotselevogo testovogo issledovatelskogo reaktora maloĭ moshchnosti s legkovodnym teplonositelem sverkhkriticheskikh parametrov [Concept of a nuclear power plant based on a multi-purpose low-power research reactor with a supercritical light-water coolant], *Teploenergetika*, 2023, No 5, pp. 5–22.

2. Sedov, A.A., Pustovalov, S.B., Kotov, Ya.A., et al., Razvitie legkovodnoĭ tekhnologii na baze energeticheskikh reaktorov VVER-SKD [Development of light-water technology based on VVER-SKD power reactors], VANT. *Yaderno-reaktornye konstanty*, 2024, No 2, pp. 158–175.
3. Lapin, A.S., Blandinskiy, V.Yu., Nevinica, V.A., et al., Neitronno-fizicheskie osobennosti reaktora MTIR-SKD kak ekspirementalnoi bazy dlya otrabotki perspektivnykh legkovodnykh reaktornykh tekhnology [Neutron-physical features of the MTIR-SKD reactor as an experimental base for developing advanced light-water reactor technologies], *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2024, No 3, pp. 18–31. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.02
4. Vasina, N.K., Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Kursevich, I.P., Radiatsionnoe raspuha-nie austenitnykh stalei: vliyanie razlichnykh faktorov. Obrabotka eksperimentalnykh dannykh i formulirovka opredelyayushchikh uravneniy [Radiation swelling of austenitic steels: the influence of various factors. Processing of experimental data and formulation of governing equations], *Voprosy materialovedeniya*, 2006, No 4 (48), pp. 69–88.
5. Kalchenko, A.S., Bryk, V.V., Voevodin, V.N., Lazarev, N.P., Modelirovanie raspukhaniya stali H18N10T v imitatsionnykh i reaktornykh usloviyakh [Modeling of swelling of X18N10T steel under simulation and reactor conditions], *VANT. FRP i RM*, 2009, Is. 4–2 (94), pp. 131–139.
6. Karzov, G.P., Margolin, B.Z., *Osnovnye mekhanizmy radiatsionnogo povrezhdeniya materia-lov VKU i materialovedcheskie problemy ikh dlitelnoy ekspluatatsii* [The main mechanisms of radiation damage to VKU materials and the material science problems of their long-term operation], Rosenergoatom, 2015, No 2, pp. 8–15.
7. Piminov, V., Evdokimenko, V., *Otsenka prochnosti i resursa VKU deistvuyushchikh i sooruzhaemykh reaktorov tipa VVER: realistichny i konservativny prognozy* [Assessment of the strength and resource of VKRs of operating and under-construction VVER-type reactors: realistic and conservative forecasts], REA, 2015, No 2, pp. 16–19.
8. Bruemmer, S.M., Simonen, E.P., Scott, P.M., et al., Radiation-induced material changes and susceptibility to intergranular failure of light-water-reactor core internals, *J. Nucl. Mater*., 1999, No 274, pp. 299–314.
9. Namburi, H.K., Hojna, A., Zdenek, F., Effect of tensile strain on microstructure of irradiated core internal material, Proc. of the 24th International Conference Nuclear Energy for New Europe, Slovenia, Portoroz, 2015.
10. Ehrnstén, U., Pakarinen, J., Karlsen ,W., Investigations on core basket bolts from a VVER 440 power plant, *Engineering Failure Analysis*, 2013, No 33, pp. 55–65.
11. Was, G., Ampornrat, P., Gupta, G., Teysseyre, S., West, E., Allen, T., Sridharan, K., Tan, L., Chen, Y., Ren, X., et al., Corrosion and stress corrosion cracking in supercritical water, *J. Nucl. Mater*., 2007, V. 371, pp. 176–201.
12. Nai-qiang Zhang, Hong Xu, Bao-rang Li, et al., Influence of the dissolved oxygen content on corrosion of the ferritic–martensitic steel P92 in supercritical water, *Corrosion Science*, V. 56, 2012, pp. 123–128.
13. Yashar Behnamian, Amir Mostafaei, Alireza Kohandehghan, et al., Internal oxidation and crack susceptibility of alloy 310S stainless steel after long term exposure to supercritical water at 500°C, *The Journal of Supercritical Fluids*, 2016, No 120 (1), pp. 161–172.
14. Teysseyre, S., Was, G.S,. Stress Corrosion Cracking of Austenitic Alloys in Supercritical Water, *Corrosion*, 2006, V. 62, No 12, p. 1100–1116.
15. Tsuchiya, Y., Kano, F., Saito, N., et al., SCC and Irradiation Properties of Metals under Supercritical-water Cooled Power Reactor Conditions, *GENES4/ANP2003*, Kyoto, Japan, Paper 1096.
16. Margolin, B.Z., Pirogova, N.E., Potapova, V.A., et al., Issledovanie mekhanizmov korrozionnogo rastreskivaniya stali dlya VKU VVER na osnove imitatsionnykh ispytaniy [Research on the mechanisms of stress corrosion cracking of steel for VVER VCU based on simulation tests], *Voprosy materialovedeniya*, 2017, No 4 (92), pp. 193–218.
17. Novotny, R., Hähner, P., Siegl, J., et al.. Stress corrosion cracking susceptibility of auste-nitic stainless steels in supercritical water conditions, *J. Nucl. Mater*, 2011, V. 409 (2), pp. 117–123.
18. Janik, P., Novotny, R., Nilsson, et al., Prequalification of cladding materials for SCWR fuel qualification testing facility – stress corrosion cracking testing, *The 6th International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors (ISSCWR-6)*, Shenzhen, Guangdong, China. Paper ISSCWR6-13034, 2013.
19. Penttilä, S., Toivonen, A., Oxidation and SCC behaviour of austenitic and ODS steels in supercritical water, *The 6th International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors (ISSCWR-6)*, Shenzhen, Guandong, China, Paper ISSCWR6-13029, 2013.
20. Zhou, R., West, E.A., Jiao, Z., Was, G.S., Irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic alloys in supercritical water, *J. Nucl. Mater*., 2009, No 395, pp. 11–22.
21. Kenik, E.A., Busby, J.T., Radiation-induced degradation of stainless steel light water reactor internals, *Materials Science and Engineering R*, 2012, No 73, pp. 67–83.

22. Fukuya, K., Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structu-ral materials, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2013, V. 50 (3), pp. 213–254.
23. Busby, J.T., Was, G.S., Kenik, E.A., Isolating the effect of radiation-induced segregation in irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels, *J. Nucl. Mater*., 2002, No 302, pp. 20–40.
24. Chung, H.M., Ruther, W.E., Sanecki, J.E., et al., Irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels: recent progress and new approaches, *J. Nucl. Mater*., 1996, No 239, pp. 61–79.
25. Jacobs, A.J., *16th International Symposium On Radiation on Materials*, Kumar A.S., Gelles D.S., Nanstad R.K., Little E.A. (Eds.), ASTM-STP 1175, ASTM, Philadelphia, 1993, p. 902.
26. Trebovaniya PNAE G-7-009: *Oborudovanie i truboprovody atomnykh energeticheskikh ustanovok. Svarka i naplavka, osnovnye polozheniya* [Equipment and pipelines for nuclear power plants. Welding and surfa-cing, basic principles], 1990.
27. Margolin, B., Sorokin, A., Belyaeva, L., Link between neutron and ion irradiation hardening for stainless austenitic and ferritic-martensitic steels, *Metals*, 2024, V. 14.
28. Kryukov, A., Debarberis, L., Hähner, P., Gillemot, F., Oszvald, F., Thermal annea-ling as a method to predict results of high temperature irradiation embrittlement, *J. Nucl. Mater*., 2013, V. 432, pp. 501–504.
29. Margolin, B., Pirogova, N., Sorokin, A., Morozov, A., Correlation between grain boun-dary strength determined by impact test of miniature specimen and stress corrosion cracking resistance of irradiated austenitic steels used for the internals of WWER-type and PWR-type nuclear reactors, *Engineering Failure Analysis*, 2021, V. 127 (3), Art. 105544.
30. Fujimoto, K., Yonezawa, T., Wachi, E., et al., Effect of the Accelerated Irradiation and Hydrogen/Helium Gas on IASCC Characteristics for Highly Irradiated Austenitic Stainless Steels, *Proc. 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Water Reactors*, PA, 2005, pp. 299–310.
31. Ernestova, M., Influence of the Neutron Spectrum on the Sensitivity to IASCC and Microstructure of CW 316 Material, *Proceedings of the 8th International Symposium Fontevraud 8, Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs Safety, Performance and Reliability*, SFEN, 2014.
32. Margolin, B., Pirogova, N., Sorokin, A., et al., Investigation of Stress Corrosion Cracking Resistance of Irradiated 12Cr Ferritic–Martensitic Stainless Steel in Supercritical Water Environment, *Materials*, 2023, V. 16, Is. 7, Art. 2585.
33. Margolin B., Sorokin A., Pirogova N., et al., Analysis of mechanisms inducing corrosion cracking of irradiated austenitic steels and development of a model for prediction of crack initiation, *Engineering Failure Analysis*, 2020, V. 107, Art. 104235, pp. 1–20.
34. Nishioka, H., Fukuya, K., Fujii, K., Torimaru, T., IASCC Initiation in Highly Irradiated Stainless Steels under Uniaxial Constant Load Conditions, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2008, No 45 (10), pp. 1072–1077.
35. Toivonen, A., Aaltonen, P., Karlsen, W., Post-irradiation SCC investigations on highly irradiated core internals component materials, *Proceedings of Fontevraud 6 Conference "Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs"*, 18–22 Sept. 2006, Royal Abbey, France.
36. Bosch, R.W., Vankeerberghen, M., Gérard, R., Crack initiation testing of thimble tube material under PWR conditions to determine a stress threshold for IASCC, *J. Nucl. Mater*, 2015, V. 461, pp. 112–121.
37. Conermann, J., Shogan, R. Fujimoto, K., Yonezawa, T., Tamaguchi, Y., Irradiation effects in a highly irradiated cold worked stainless steel removed from a commercial PWR, *Proceedings of 12th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, USA, August 14–18, 2005, pp. 277–287.
38. Freyer, P., Mager, T., Burke, M., Hot cell crack initiation testing of serious heats of highly irradiated 316 stainless steel components obtained from three commercial PWRs, *Proceedings of 13th Intern. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, Canada, August 19–23, 2007.
39. Pogodin, V.P., Bogoyavlensky, V.L., Sentyurev, V.P., *Mezhkristallitnaya korroziya i korrozionnoe rastreskivanie nerzhaveyushchikh stalei v vodnykh sredakh* [Intergranular corrosion and corrosion cracking of stainless steels in aqueous environments], Moscow: Atomizdat, 1970.
40. Khimushin, F.F., *Zharoprochnye stali i spla*vy [Heat-resistant steels and alloys], Moscow: Metallurgiya, 1969.
41. GOST 50753–95: *Pruzhiny vintovye tsilindricheskie szhatiya i rastyazheniya iz spetsialnykh stalei i splavov* [Screw cylindrical compression and extension springs made of special steels and alloys].
42. Sorokin, A.A., Margolin, B.Z., Kursevich, I.P., Minkin, A.I., Neustroev, V.S., Belozerov, S.V., Vliyanie neitronnogo oblucheniya na mekhanicheskie svoistva materialov vnutrikorpusnykh ustroistv reaktorov tipa VVER [Influence of neutron irradiation on the mechanical properties of materials of internal devices of VVER-type reactors], *Voprosy materialovedeniya*, No 2 (66), 2011, pp. 131–152.

43. Margolin, B.Z., Kostylev, V.I., Morozov, A.M., et al., Vliyanie neitronnogo oblucheniya i postradiatsionnogo otzhiga na mekhanicheskie svoistva i treshchinostoikost metalla antikorrozionnoi naplavki korpusov reaktorov VVER. Ch. 2. Prognozirovanie mekhanicheskikh svoistv i treshchinostoikosti metalla naplavki [The effect of neutron irradiation and post-radiation annealing on the mechanical properties and crack resistance of the metal of the anti-corrosion surfacing of the VVER reactor vessels. Part 2. Prediction of the mechanical properties and crack resistance of the surfacing metal], *Voprosy materialovedeniya*, 2017, No 3 (91), pp. 229–244.
44. GOST R 59115.14-2021: *Obosnovanie prochnosti oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Raschet na soprotivlenie khrupkomu razrusheniyu korpusa vodo-vodnogo energeticheskogo reaktora* [Justification of the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Calculation of resistance to brittle fracture of the housing of a water-water power reactor].