

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Оленин М. И., Романов О. Н., Марголин Б. З., Сорокин А. А., Зернов Э. А., Бушуев С. В., Бережко Б. И., Шахкян С. А., Апинов Ж. Э. Влияние гомогенизационного отжига на процессы карбидообразования в литом металле и в поковке из стали марки 10X16H20M2T 7

Бобылёв Э. Э., Стороженко И. Д., Попов Р. А. Кинетика формирования на конструкционных сталях карбидохромовых диффузионных слоев, полученных комплексной химико-термической обработкой 21

Сенникова Л. Ф., Гангало А. Н., Ткаченко В. М., Волкова Г. К., Глазунова В. А., Климова Е. Х. Влияние гидроэкструзии на структуру и механические свойства меди М06, предварительно обработанной равноканальным угловым прессованием 31

Адашкин А. М., Бутрим В. Н., Каширцев В. В., Трушников А. С., Гребенюк И. М. Улучшение технологических свойств сплавов системы Ni–Cr 38

Рынденков Д. В., Карягин Д. А., Смирнов М. О., Волкова Е. Н. Зональная макроструктурная неоднородность изделий из жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом металлургии гранул, и причина ее образования 49

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Ангелуц А. А., Марков М. А., Новиков М. М., Шкуринов А. П., Черобыло С. А. Разработка и исследование фотополимерных керамических паст для стереолитографического аддитивного производства 58

Бурков А. А., Коневцов Л. А., Быцур А. Ю. Осаждение металлокерамического покрытия Ti–ZrV₂ на титановый сплав Ti–6Al–4V методом электроискрового легирования с применением нелокализованного электрода 69

Красиков А. В., Меркулова М. В., Гошкодеря М. Е. Эксплуатационные свойства покрытий Ni–W, Co–W и Ni–P–W, упрочненных за счет термической обработки 80

Красиков А. В., Меркулова М. В. Технологические особенности электроосаждения покрытия Ni–P из пирофосфатных и цитратных электролитов 89

Киреев С. Ю., Козлов Г. В., Киреева С. Н., Янгуразова А. З., Кирилина Ю. Н., Балыбердин А. С. Импульсные гальваностатические режимы электролиза для повышения коррозионной стойкости экологичных покрытий на основе сплава олово – цинк 97

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Тарасова П. Н., Капитонова Ю. В., Сивцева-Гладкина Н. П., Лазарева Н. Н., Охлопкова А. А., Кычкина Ю. В., Канеева А. А. Структура и свойства полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и галлуазита разных марок 108

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 122

Абакунова Е. В., Стручкова Т. С., Ярусова С. Б., Данилова С. Н., Панасенко А. Е., Охлопкова А. А., Гордиенко П. С. Характеристики композиционных материалов на основе ПТФЭ и волластонита из рисовой соломы 136

Сидорова С. А., Тюрина С. А., Рашутин Н. А., Демин В. Л., Щелков В. А. Влияние природы инертного носителя на эффективность микрокапсулирования ингибитора коррозии и накипеобразования 145

Артамонов Е. А., Рябуха К. Н., Смылова Л. А. Влияние диоксида кремния, полученного газофазным способом и методом осаждения, на свойства ненасыщенной полиэфирной смолы 156

Федоров Ю. Ю., Шадрин Н. В. Особенности влияния полисульфона на низкотемпературную ударную вязкость эпоксидной смолы 164

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Григорьев И. С., Галяткин С. Н., Васильева Е. А., Карпов В. М. Исследование влияния термокинетических условий охлаждения наплавленного металла типа 09Х31Н8АМ2 на формирование фазового состава с учетом термической обработки 173

Фомин Г. Б., Маркова Ю. М., Морозовская И. А., Тимофеев М. Н. Влияние термической обработки на структуру и свойства зоны сплавления антикоррозионного покрытия, выполненного импульсной аргонодуговой наплавкой, и стали Cr–Mo–V 184

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Фоменко В. Н., Марголин Б. З., Шишков Ф. Л. Метод определения механических свойств и истинной диаграммы деформирования материала оболочек твэлов посредством испытания кольцевых образцов. Часть 1. Анализ существующих и разработка нового метода 196

Фоменко В. Н., Марголин Б. З., Шишков Ф. Л. Метод определения механических свойств и истинной диаграммы деформирования материала оболочек твэлов посредством испытания кольцевых образцов. Часть 2. Расчетная и экспериментальная верификация 210

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов 227

УДК 669.15–194.56:621.785.3

ВЛИЯНИЕ ГОМОГЕНИЗАЦИОННОГО ОТЖИГА НА ПРОЦЕССЫ КАРБИДООБРАЗОВАНИЯ В ЛИТОМ МЕТАЛЛЕ И В ПОКОВКЕ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 10Х16Н20М2Т

М. И. ОЛЕНИН, д-р техн. наук, О. Н. РОМАНОВ, канд. техн. наук, Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук, Э. А. ЗЕРНОВ, С. В. БУШУЕВ, Б. И. БЕРЕЖКО, канд. техн. наук, С. А. ШАХКЯН, Ж. Э. АПИНОВ

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

Поступила в редакцию 11.04.2025

После доработки 11.09.2025

Принята к публикации 17.09.2025

Приведены экспериментальные данные по повышению уровня пластичности в поковке из стали аустенитного класса марки 10Х16Н20М2Т. Установлено, что на повышение уровня пластичности практически без изменения уровня прочности оказывает влияние гомогенизационный отжиг, выполненный при температуре 1250°С с выдержкой 35 ч, обеспечивающий растворение карбидов, карбонитридов и нитридов титана.

Ключевые слова: гомогенизационный отжиг, стали аустенитного класса, растворение карбидов, обработка металла давлением, деформация, разливка стали, металл крупногабаритной поковки, механические свойства стали, карбиды и карбонитриды

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-7-20

ЛИТЕРАТУРА

1. Стали и сплавы энергетического оборудования. Справочник / Под ред. С. Б. Рыжова. – М.: Машиностроение, 2008. – 960 с.
2. Бескоровайный Н. М., Калинин Б. А., Платонов П. А., Чернов И. И. Конструкционные материалы ядерных реакторов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 704 с.
3. Добрынина М. В., Филимонов Г. Н., Павлов В. Н. Влияние режима окончательной обработки на структуру горячедеформированной аустенитной стали марки 08Х18Н10Т // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2 (70). – С. 25–32.
4. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. Изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1977. – 480 с.

© 2025

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

5. Онищенко А. К., Беклемищев Н. Н. Теория промышленнойковки стали и сплавов. – М.: Спутник, 2011. – 245 с.
6. Онищенко А. К. Мегапластическая деформация и оптимальная величина укова слитков // Технология металлов. – 2006. – № 10. – С. 12–15.
7. Охрименко Я. М., Тюрин В. А. Теория процессовковки слитков на прессах. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
8. Волков С. Е., Волков А. Е., Забалуев Ю. И., Буряковский Г. А. Неметаллические включения и дефекты в электрошлаковом слитке. – М.: Металлургия, 1979. – 105 с.
9. Лебедев А. Г., Дуб В. С., Гуденко А. С., Змиенко Д. С., Корнеев А. Е. Возможность управления характеристиками включений нитридов и карбонитридов в низкоуглеродистой аустенитной стали // Электрометаллургия. – 2012. – № 1. – С. 24–29.
10. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов: Учебник для вузов. Изд. 4-е. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
11. Паршин А. М. Структура, прочность и пластичность нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, применяемых в судостроении. – Л.: Судостроение, 1972. – 288 с.
12. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. Н. Рентгеноструктурный анализ. – М.: Металлургия, 1970. – 234 с.
13. Горынин В. И., Оленин М. И. Пути повышения хладостойкости сталей и сварных соединений. – СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 2017. – 331 с.
14. Семенов Е. И. Ковка и объемная штамповка: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1972. – 352 с.

УДК 621.785.5:621.793.6

КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ НА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЯХ КАРБИДОХРОМОВЫХ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ КОМПЛЕКСНОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Э. Э. БОБЫЛЁВ, канд. техн. наук, И. Д. СТОРОЖЕНКО, Р. А. ПОПОВ

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 350072,
Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2. E-mail: ebobylev@mail.ru

Поступила в редакцию 5.03.2025

После доработки 3.04.2025

Принята к публикации 11.04.2025

Рассмотрена кинетика формирования на сталях Ст3, 40Х, 40Х13, 12Х18Н10Т диффузионных слоев, содержащих карбиды хрома и α -твердый раствор, в результате комплексной химико-термической обработки. Комплексная химико-термическая обработка заключается в предварительной газовой цементации и последующем диффузионном легировании хромом в среде легкоплавких жидкометаллических растворов. В результате исследований было выявлено, что на толщину диффузионного слоя на поверхности образцов, концентрацию и распределение хрома, а также на фазовый состав оказывают влияние химический состав стали, температура и длительность диффузионного насыщения. Диффузионный слой состоит из α -твердого раствора и карбидов одного (Cr_7C_3) или двух видов (Cr_7C_3 и Cr_{23}C_6). При температурах диффузионного насыщения 1000 и 1025°C во всех исследуемых временных диапазонах, а также при длительности выдержки 60 мин и температурах 1050 и 1070°C диффузионный слой содержит карбиды Cr_7C_3 . Выделение карбидов Cr_7C_3 и Cr_{23}C_6 наблюдалось при температурах диффузионного насыщения (свыше 1050°C) при длительности выдержки от 180 мин.

Ключевые слова: сталь, химико-термическая обработка, диффузия, кинетика, карбид, хром

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-21-30

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколова И. С., Оборин А. В., Порозова С. Е. Модифицирование поверхности сталей, применяемых в арматуростроении // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2024. – № 18 (4). – С. 83–90. URL: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-4-83-90>
2. Красиков А. В., Меркулова М. В., Михайлов М. С., Петров С. Н. Наноструктура гальванических покрытий Ni–W, отожженных при различных температурах // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 2 (118). – С. 46–54. URL: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2024-118-2-46-54>
3. Колубаев А. В., Сизова О. В. Структура и свойства покрытий, полученных способом газотермического напыления // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2024. – № 67 (6). – С. 710–715. URL: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-710-715>
4. Yang K., Chen C., Xu G., Jiang Z., Zhang S., Liu X. HVOF sprayed Ni–Mo coatings improved by annealing treatment: Microstructure characterization, corrosion resistance to HCl and corrosion mechanisms // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – V. 19. – P. 1906–1921. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.181
5. Liang J., Liu Y., Yang Sh., Yin X., Chen S., Liu Ch. Microstructure and wear resistance of laser cladding Ti–Al–Ni–Si composite coatings // Surface and Coatings Technology. – 2022. – V. 445. – P. 128727. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128727
6. Dervishi E., McBride M., Edwards R., Gutierrez M., Li N., Buntyn R., Hooks D. E. Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions // Surface and Coatings Technology. – 2022. – V. 444. – P. 128652. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128652
7. Bathini L., Prasad M. J. N. V., Wasekar N. P. Development of continuous compositional gradient Ni–W coatings utilizing electrodeposition for superior wear resistance under sliding contact // Surface and Coatings Technology. – 2022. – V. 445. – P. 128728. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128728
8. Китаев Н. И., Пичхидзе С. Я. Разработка ресурсосберегающей технологии диффузионного хромирования поверхностного слоя стали 12ХН3А при высокотемпературном микродуговом воздействии // Технология машиностроения. – 2024. – № 8. – С. 22–28. DOI: 10.34641/TM.2024.266.8.052
9. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Фомичев А. М., Новиков В. И. Технологические аспекты процесса формирования функциональных тонкопленочных покрытий на узлах прецизионных приборов // Металлообработка. – 2023. – № 3 (135). – С. 67–76.
10. Пашков М. В., Хисамутдинов Р. М. Технологические решения по нанесению специальных покрытий для повышения износостойкости деталей и узлов машин // Ползуновский вестник. – 2024. – № 3. – С. 223–227. URL: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.032>
11. Zhang M., Shi X., Li Z., Xu H. Enhanced corrosion and wear resistance of gradient graphene–CrC nanocomposite coating on stainless steel // Carbon. – 2021. – V. 174. – P. 693–709. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.12.007
12. Wang D., Lin S., Zhen Y., Yin Z., Ye F., Gao X., Qiao Y., Xue Y., Yang H., Zhou K. Failure mechanisms of CrN and CrAlN coatings for solid particle erosion resistance // Vacuum. – 2022. – V. 204 (3). – P. 111313. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111313
13. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. Т. 1 / Под общ. ред. Н. П. Лекишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.
14. Li Q., Song P., Zhang R., Li Zh., Wang Yu, Du P., Lu J. Oxidation behavior and Cr–Zr diffusion of Cr coatings prepared by atmospheric plasma spraying on zircaloy-4 cladding in steam at 1300 C // Corrosion Science. – 2022. – V. 203. – P. 110378. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110378
15. Sahu J. N., Sasikumar C. Development of hard and wear resistant surface coating on Ni–Cr–Mo steel by surface mechano-chemical carburization treatment (SMCT) // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – V. 263. – P. 285–295. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.027
16. Nurakov S., Belotserkovsky M., Suleimenov T., Aitlessov K. Application of chemical-thermal treatment for hardening of sprayed with supersonic coatings // Procedia Computer Science. – 2019. – V. 149. – P. 360–364. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.149

17. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов: Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия. – 1985. – 256 с.
18. Meissner T. M., Oskay C., Bonk A., Grégoire B., Donchev A., Solimani A., Galetz M. C. Improving the corrosion resistance of ferritic-martensitic steels at 600°C in molten solar salt via diffusion coatings // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2021. – V. 227. – P. 111105. DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111105
19. Пряхин Е. И., Михайлов А. В., Сивенков А. В. Технологические особенности поверхностного легирования металлических изделий Cr-Ni-комплексами в среде расплавов легкоплавких металлов // *Черные металлы*. – 2023. – № 2. – С. 58–66.
20. Соколов А. Г., Бобылёв Э. Э., Попов Р. А. Особенности формирования диффузионных покрытий, полученных комплексной химико-термической обработкой конструкционных сталей // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2023. – № 25 (1). – С. 98–109. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-98-109
21. Sokolov A. G., Boblyov E. E. Features and regularities in formation of diffusion nickel-copper coatings on steels in the medium of low-melting liquid-metal solutions // *CIS Iron and Steel Review*. – 2022. – V. 23. – P. 56–60. DOI: 10.17580/cisr.2022.01.11
22. Boblyov E. E., Storozhenko I. D. Influence of Diffusion Alloying of Steel 20 in Medium of Low-Melting Liquid Metal Solutions by Elements of Ni–Cu System on Elemental Composition and Properties of Surface Layers // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2024. – V. 15, Is. 4. – P. 964–967. URL: <https://doi.org/10.1134/S2075113324700461>
23. Sokolov A. G., Bobylev E. E., Storozhenko I. D. Mechanism and Peculiarities of Formation of Diffusion Coatings Based on Carbide-Forming Elements on Steel Surfaces in the Medium of Fusible Liquid-Metal Solutions // *Steel Translation*. – 2023. – V. 53. – P. 37–41. URL: <https://doi.org/10.3103/S0967091223010114>
24. Соколов А. Г., Бобылёв Э. Э., Марченко В. Д. Влияние комплексной химико-термической обработки на коррозионную стойкость стальных изделий // *Ползуновский вестник*. – 2023. – № 3. – С. 238–244. URL: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.32>
25. Патент РФ № 2767108. Соколов А. Г., Бобылёв Э. Э., Стороженко И. Д., Попов Р. А. Устройство для диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических растворов. – 2022. – 9 с.

УДК 669.3:621.77.016.2

ВЛИЯНИЕ ГИДРОЭКСТРУЗИИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДИ М06, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННОЙ РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ

Л. Ф. СЕННИКОВА, канд. техн. наук, А. Н. ГАНГАЛО, канд. техн. наук,
В. М. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук, Г. К. ВОЛКОВА, В. А. ГЛАЗУНОВА, Е. Х. КЛИМОВА
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина»,
283114, Донецк, ДНР, Россия, ул. Розы Люксембург, 72. E-mail: al-gangalo@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.02.2025

После доработки 29.05.2025

Принята к публикации 31.05.2025

Изучены закономерности формирования структуры и свойств меди, полученной в условиях интенсивной пластической деформации путем формирования субмикроструктурной структуры зеренного типа и последующей обработки гидроэкструзией с разной степенью разовой деформации. Установлено, что с увеличением степени разовой гидроэкструзии до $\epsilon = 1,2$ уровень прочности меди М06 не повышается по сравнению с ее прочностью после равноканального углового прессования. Это свидетельствует о начале процессов возврата и динамической рекристаллизации материала, что подтверждают структурные исследования с помощью электронной микроскопии на просвет и рентгеноструктурного анализа.

Ключевые слова: медь, равноканальное угловое прессование, гидроэкструзия, субмикроструктурная структура, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-31-37

ЛИТЕРАТУРА

1. Волокитина И. Е., Волокитин А. В. Эволюция микроструктуры и механических свойств меди в процессе прессование – волочение // Физика металлов и металловедение. – 2018. – № 119 (9). – С. 971–976.
2. Лежнев С. Н., Волокитина И. Е., Панин Е. А., Волокитин А. В. Эволюция микроструктуры и механических свойств меди при реализации совмещенного процесса прокатки – РКУ-прессование // Физика металлов и металловедение. – 2020. – № 121 (7). – С. 757–762.
3. Иванов А. М. Комбинирование методов деформационной обработки материалов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – Т. 10, № 83. – С. 19.
4. Иванов А. М. Упрочнение низколегированной стали комбинированием экструзии винтового и равноканального прессований // Вестник машиностроения. – 2017. – № 2. – С. 81.
5. Нугманов Д. П., Ситдилов О. Ш., Маркушев М. В. Поведение вторых фаз в магниевом сплаве МА14 при всесторонней изотермической ковке и последующей изотермической прокатке // Materials Letters. – 2017. – Т. 7, № 2. – С. 198–202.
6. Сенникова Л. Ф., Гангало А. Н., Волкова Г. К., Климова Е. Х. Закономерности формирования микроструктуры и механических свойств меди М1 в условиях комбинированной пластической деформации // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 4 (116). – С. 50–56.
7. Валиев Р. З., Жияев А. П., Лэнгдон Т. Дж. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы применения. – СПб.: Эко-Вектор, 2017. – 479 с.
8. Русаков А. А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 479 с.
9. Утяшев Ф. З., Рааб Г. И., Валитов В. А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов. – СПб.: Научное издание, 2020. – 185 с.
10. Трефилов В. И. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. – Киев: Наукова думка, 1989. – 254 с.
11. Рогачев С. О., Землякова Н. В. Особенности рекристаллизации меди в процессе интенсивной пластической деформации при комнатной температуре // Вестник научно-технического развития. – 2024. – № 173.
12. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.
13. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. – М.: Металлургия, 1982. – 583 с.
14. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, Рентгенография и электронная микроскопия. – М.: Металлургия, 1982. – 631 с.

УДК 669.24 ' 26:669.018.44

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ni-Cr

А. М. АДАСКИН¹, канд. техн. наук, В. Н. БУТРИМ², д-р техн. наук, В. В. КАШИРЦЕВ², канд. техн. наук,
А. С. ТРУШНИКОВА², канд. техн. наук, И. М. ГРЕБЕНЮК²

¹ ФГБОУ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
127055, Москва, Вадковский пер., 3А, стр. 1

² Акционерное общество «Композит», 141070, Московская обл., г. Королев, Пионерская ул., 4.
E-mail: vbutrim@kompozit-mv.ru

Поступила в редакцию 14.03.2025

После доработки 7.05.2025

Принята к публикации 12.05.2025

Обоснован и разработан режим термической обработки для снижения твердости сплава Х65НВФТ с целью улучшения обрабатываемости резанием. Установлено влияние состава сплава ХН50ВМТЮБ на холодную пластичность. Показано, что повышение пластичности достигается при уменьшении содержания элементов, образующих α -фазу с решеткой ОЦК и упрочняющие фазы Ni₃Ti и Ni₃Al.

Ключевые слова: сплавы системы Cr-Ni, твердость, обрабатываемость резанием, холодная пластичность, термическая обработка, пластичность

ЛИТЕРАТУРА

1. Масленков С. Б. Жаропрочные стали и сплавы. Справочник. – М.: Металлургия, 1988. – 191 с.
2. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1969. – 752 с.
3. Адашкин А. М., Бутрим В. Н., Сапронов И. Ю. Фазовые превращения, структура и свойства сплава Х65НВФТ на основе хрома // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – Т. 35, № 11. – С. 1001–1012.
4. Бутрим В. Н. Совершенствование хромоникелевых сплавов для космической техники // Конструкции из композиционных материалов. – 2017. – № 2. – С. 26–38.
5. Адашкин А. М., Бутрим В. Н., Верещака А. С., Каширцев В. В., Кириллов А. К. Обрабатываемость резанием жаропрочного сплава Х65НВФТ на основе хрома // СТИН. – 2013. – № 7. – С. 36–40.
6. Армарего И. Дж. А., Браун Р. Х. Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
7. Мак Линн Д. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1965. – 432 с.
8. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 2 / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 1023 с.
9. Hall E. O. Variation of hardness of metals with grain size / Nature. – 1954. – V. 173, N 11. – P. 948.
10. Хрущов М. М. Трение, износ и микротвердость материалов. Избранные работы. – М.: Крассанд, 2012. – 510 с.
11. Адашкин А. М., Бутрим В. Н., Кубаткин В. С., Сапронов И. Ю. Влияние режима термической обработки на жаростойкость сплава на основе хрома при высокотемпературном окислении на воздухе // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4 (88). – С. 18–28.
12. Адашкин А. М., Бутрим В. Н., Кубаткин В. С., Сапронов И. Ю. Кривые деформационного упрочнения и механические свойства жаропрочного сплава на основе хрома в зависимости от термической обработки и температуры испытаний // МиТОМ. – 2015. – № 10. – С. 50–56.
13. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов, В. И., Макарова, Г. Г. Мухин и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2011. – 646 с.
14. Справочник по машиностроительным материалам. Т. 1 / Под ред. В. Г. Воробьева, Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. – М.: Изд-во машиностроительной лит-ры, 1959. – 907 с.
15. Масленков С. Б. Жаропрочные стали и сплавы: Справочник. – М.: Металлургия, 1988. – 191 с.
16. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1974. – 399 с.

УДК 669.245.018.44:621.762.22

ЗОНАЛЬНАЯ МАКРОСТРУКТУРНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МЕТАЛЛУРГИИ ГРАНУЛ, И ПРИЧИНА ЕЕ ОБРАЗОВАНИЯ

Д. В. РЫНДЕНКОВ, канд. техн. наук, Д. А. КАРЯГИН, М. О. СМЕРНОВ, канд. техн. наук,
Е. Н. ВОЛКОВА

АО «Ступинская металлургическая компания», 142800, Московская обл., г. Ступино,
ул. Пристанционная, вл. 2. E-mail: info@cmk-group.ru

Поступила в редакцию 22.01.2025

После доработки 16.05.2025

Принята к публикации 20.05.2025

В макроструктуре изделий, изготовленных из гранул, полученных методом центробежного плазменного распыления PREP (Plasma Rotating Electrode Process), при проведении контроля макроструктуры иногда можно наблюдать зоны различной травимости. Микроструктурный анализ показывает, что более темные зоны обусловлены более выраженными и декорированными повышен-

ным содержанием карбидов границами зерен. Эта макронеоднородность имеет наследственный характер, связанный с постепенным увеличением количества возгонов смазочных материалов в атмосфере камеры распыления. Коксуясь при газостатировании, возгоны создают условия для образования дополнительных карбидов.

Ключевые слова: металлургия гранул, PREP, дефекты, неоднородность, макроструктура, жаропрочные никелевые сплавы

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-49-57

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов А. Ф., Аношкин Н. Ф., Фаткуллин О. Х. Структура и свойства гранулируемых никелевых сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 128 с.
2. Аношкин Н. Ф. Некоторые аспекты качества жаропрочных и высокопрочных материалов, изготавливаемых методом металлургии гранул // Металлургия гранул. Вып. 3. – М.: ВИЛС, 1986. – С. 3.
3. Кошелев В. Я., Гарибов Г. С., Сухов Д. И. Основные закономерности процесса получения гранул жаропрочных сплавов методом плазменного распыления вращающейся заготовки // Технология легких сплавов. – 2015. – № 3. – С. 97–103.
4. Волков А. М., Шестакова А. А., Бакрадзе М. М. Сравнение гранул, полученных методами газовой атомизации и центробежного распыления литых заготовок, с точки зрения применения их для изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // Труды ВИАМ. – 2018. – № 11. – С. 12–19.
5. Гарибов Г. С., Гринц Н. М. Эволюция характеристик гранулируемых сплавов для авиа-двигателей // Технология легких сплавов. – 2013. – № 44. – С. 106–112.
6. Рынденков Д. В., Рыбанцова Е. Н. О формировании гранул с остатками литой структуры в компактах из жаропрочных Ni-сплавов // Металлургия машиностроения. – 2016. – № 4. – С. 43–47.
7. Зенков Р. Л., Гриневич Г. П., Исаев В. С. Бункерные устройства. – М.: Машиностроение, 1977. – 225 с.
8. Ходкин В. И., Тарарышкина Т. Л. Влияние режимов заполнения капсул гранулами на сегрегацию по их крупности // Металлургия гранул. Вып. 1. – М.: ВИЛС, 1983. – С. 110.
9. Eshuis P., Van der Weele K., Van der Meer D., Lohse D. Granular Leidenfrost Effect: Experiment and Theory of Floating Particle Clusters // Phys. Rev. Lett. – 2005. – V. 95. – P. 258001. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.95.258001>

УДК 666.3.022.4

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПАСТ ДЛЯ СТЕРЕОЛИТОГРАФИЧЕСКОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. А. АНГЕЛУЦ², М. А. МАРКОВ¹, М. М. НОВИКОВ¹, А. П. ШКУРИНОВ^{1,2}, С. А. ЧЕРЕБЫЛО¹

¹ *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1. E-mail: novikov@rambler.ru*

² *ФГБОУВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова», 119234, Москва, Ленинские Горы, д. 1.*

Поступила в редакцию 9.10.2024

После доработки 14.04.2025

Принята к публикации 16.04.2025

Изучены свойства суспензии с порошками оксида алюминия в фотополимерной композиции, разработанной для лазерной стереолитографии. Показано, что модифицированный фотополимер ИПЛИТ 4 является оптимальным компонентом при изготовлении суспензий для аддитивного производства керамических деталей методом стереолитографии. Получены пасты с содержанием керамического наполнителя 72 мас. %. Продемонстрированы возможности терагерцевой диагностики полимер-керамических и керамических материалов на разных этапах процесса производства.

Ключевые слова: аддитивное производство, стереолитография, фотополимеризация, керамика, фотополимерная суспензия

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-58-68

ЛИТЕРАТУРА

1. Zakeri S., Vippola M., Levänen E. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography // *Additive Manufacturing*. – 2020. – October. – V. 35. – P. 101177. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101177>
2. Пат. RU 2685211. Жидкая фотополимеризующаяся композиция для лазерной стереолитографии / Я. М. Гуревич, М. А. Марков, А. Н. Никитин и др. Опубл. 16.04.2019.
3. Ходер В. Б., Кордикова Е. И., Дьякова Г. Н. Наполненные фотополимерные композиции для 3D-печати методом стереолитографии (обзор) // *Труды БГТУ: Сер. 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. – 2022. – № 1 (253). – С. 27–32.
4. Bove A., Calignano F., Galati M., Iuliano L. Photopolymerization of Ceramic Resins by Stereolithography Process: A Review // *Appl. Sci.* – 2022. – N 12 (7). – P. 3591. URL: <https://doi.org/10.3390/app12073591>
5. Liu G., Yan C., Zhang K., Jin H., He R. Effect of Solid Loading on the Property of Al₂O₃ Ceramics in Stereolithographic Additive Manufacturing // *Journal of Inorganic Materials*. – 2022. – V. 37, N 3. – P. 353–360. DOI: 10.15541/jim20210636
6. Azarmi F., Sevostianov I. Evolution of thermo-mechanical properties in the process of alumina manufacturing using laser stereolithography technique // *International Journal of Engineering Science*. – 2019. – V. 144. – P. 103125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2019.103125>
7. Lakhdar Y., Tuck C., Binner J., Terry A., Goodridge R. Additive manufacturing of advanced ceramic materials // *Progress in Materials Science*. – 2021. – V. 116. – P. 100736. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100736>
8. De Camargo I. L. et al. A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization // *Ceram. Int.* – 2021. – V. 47(80). – P. 11906–11921. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.031>
9. Влияние акрилатного мономера на характеристики фотополимеризуемых суспензий для получения керамики из стабилизированного ZrO₂ / Л. В. Ермакова и др. // *Стекло и керамика*. – 2022. – № 10. – С. 3–10.
10. Sokolov P. S. et al. Rheological properties of zirconium oxide suspensions in acrylate monomers for use in 3D printing // *Glass Ceram.* – 2018. – V. 75. – P. 55–59. URL: <https://doi.org/10.1007/s10717-018-0028-3>
11. Schmidleithner C., Kalaskar D. 3D printing. Ch. 1: Stereolithography / D. Cvetković (Ed.). – London: IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.78147
12. Камаев С. В., Марков М. А., Никитин А. Н., Новиков М. М. Лазерная стереолитография: состояние и перспективы // *Аддитивные технологии*. – 2018. – N 4. – С. 44–48.
13. Halloran J. W. Ceramic Stereolithography: Additive Manufacturing for Ceramics by Photopolymerization // *Annual Review of Materials Research*. – 2016. – V. 46. – P. 19–40. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-031841>
14. Lithography-based ceramic manufacturing: a novel technique for additive manufacturing of high-performance ceramics / M. Schwentenwein et al. // *Advances in Science and Technology*. – 2014. – V. 88. – P. 60–64. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.88.60

УДК 621.762.34:621.793.6

ОСАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ Ti–ZrB₂ НА ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ Ti–6Al–4V МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЛОКАЛИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОДА

А. А. БУРКОВ, канд. физ.-мат. наук, Л. А. КОНЕВЦОВ, канд. техн. наук, А. Ю. БЫЦУРА
ФГБУН «Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН», 680042, Хабаровск,
ул. Тихоокеанская, 153. E-mail: alex_btsr@mail.ru

© 2025

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

Поступила в редакцию 26.01.2025

После доработки 14.04.2025

Принята к публикации 16.04.2025

Исследованы свойства покрытий Ti–ZrB₂, нанесенных на титановый сплав Ti–6Al–4V методом электроискрового легирования нелокализованным электродом с использованием титановых гранул и порошка ZrB₂. Установлено, что структура покрытий соответствует металлокерамическому материалу, в котором αTi и βTi выполняют роль металлической матрицы, а ZrB₂ является армирующей фазой, концентрация которой в покрытиях составляет от 38 до 92%. Показано, что с повышением концентрации ZrB₂ в покрытиях их твердость монотонно возрастает от 10,79 до 15,86 ГПа, а средние значения износа покрытий монотонно снижаются, что свидетельствует о хорошей смачиваемости частиц ZrB₂ расплавом титана.

Ключевые слова: покрытие Ti–ZrB₂, электроискровое легирование, титановый сплав Ti–6Al–4V, износ, жаростойкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-69-79

ЛИТЕРАТУРА

1. Alloys-by-design: A low-modulus titanium alloy for additively manufactured biomedical implants / E. Alabort et al. // *Acta Materialia*. – 2022. – V. 229. – P. 117749. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117749>
2. Investigation on mechanical properties of tribofilm formed on Ti–6Al–4V surface sliding against a DLC coating by nano-indentation and micro-pillar compression techniques / H. H. Ding et al. // *Wear*. – 2019. – V. 432. – P. 202954. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202954>
3. Chikarakara E., Naher S., Brabazon D. High speed laser surface modification of Ti–6Al–4V // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – V. 206, N 14. – P. 3223–3229. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.01.010>
4. Hardness of zirconium diboride films deposited on titanium substrates / J. V. Rau et al. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2008. – V. 112, N 2. – P. 504–509. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.06.004>
5. Protection of Ti–6Al–4V surfaces by laser dispersion of diborides / A. Wank et al. // *Journal of thermal spray technology*. – 2005. – V. 14. – P. 134–140. URL: <https://doi.org/10.1361/10599630522684>
6. Зорин И. В., Соколов Г. Н., Артемьев А. А., Дубцов Ю. Н., Денисевич Д. С., Лысак В. И., Харламов В. О. Исследование влияния соотношения легирующих элементов в системе Ni–Al–Cr–W–Mo–Ta на стойкость наплавленного металла к термической усталости // *Вопросы материаловедения*. – 2020. – № 2 (102). – С. 74–86. URL: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-102-2-74-86>
7. Optimizing the Thermal Spray Parameters for Producing High-Performance Mo/ZrB₂ Metal Matrix Composites Using the Taguchi Method / M. M. Mihoob et al. // *Coatings*. – 2023. – V. 13, N 9. – P. 1620. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings13091620>
8. Some properties of atmospheric air and inert gas high-pressure plasma sprayed ZrB₂ coatings / M. Tului et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – V. 151–152. – P. 483–489. URL: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01572-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01572-9)
9. Bartuli C., Valente T., Tului M. Plasma spray deposition and high temperature characterization of ZrB₂–SiC protective coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – V. 155, N 2–3. – P. 260–273. URL: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00058-0)
10. Randich E., Allred D. D. Chemically vapor-deposited ZrB₂ as a selective solar absorber // *Thin Solid Films (Switzerland)*. – 1981. – V. 83, Is. 4. – P. 393–398. URL: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(81\)90646-5](https://doi.org/10.1016/0040-6090(81)90646-5)
11. Structure, corrosion resistance, mechanical and tribological properties of ZrB₂ and Zr–BN coatings / P. Kiryukhantsev-Korneev et al. // *Metals*. – 2021. – V. 11, N 8. – P. 1194. URL: <https://doi.org/10.3390/met11081194>
12. High-energy electrospark surface strengthening of steels with composite ceramics / I. A. Podchernyaeva et al. // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2014. – V. 52, Is. 11. – P. 656–662. URL: <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9573-7>

13. Марков М. А., Персинин С. А., Красиков А. В., Быкова А. Д., Беляков А. Н., Фадин Ю. А. Особенности формирования антифрикционных покрытий на титане методом электроискрового легирования с использованием металлокерамических анодов // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 4 (100). – С. 61–67. URL: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2019-100-4-61-67>
14. Electrospray deposition of multilayer coatings / V. B. Tarelnyk et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2020. – V. 59. – P. 76–88. URL: <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00140-x>
15. 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>
16. Бурков А. А., Кулик М. А. Коррозионная и триботехническая характеристика металломатричных Fe–Ti–Cr–B покрытий // Сварочное производство. – 2021. – № 12. – 43 с.
17. Burkov A. A., Chigrin P. G., Kulik M. A. Effect of TaC content on microstructure and wear behavior of PRMMC Fe–TaC coating manufactured by electrospray deposition on AISI304 stainless steel // Surface and Coatings Technology. – 2024. – V. 494. – P. 131446. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131446>
18. Burkov A. A. Improvement of Ti–6Al–4V-alloy wear resistance by electric-spark hafnium carbide coatings // Journal of Friction and Wear. – 2020. – V. 41. – P. 543–548. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068366620060045>
19. Электроискровое осаждение порошка диборида хрома на нержавеющую сталь AISI 304 / А. А. Бурков и др. // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 78–90. URL: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2022-24.2-78-90>
20. Бурков А. А. Получение аморфных покрытий электроискровой обработкой стали 35 в смеси железных гранул с CrMoWCBSi порошком // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 19–30.
21. Cassie A. B. D., Baxter S. Wettability of porous surfaces // Transactions of the Faraday society. – 1944. – V. 40. – P. 546–551.
22. Effect of ZrB₂ on microstructure and wear properties of TC4 alloy coatings by laser direct energy deposition / C. Chen et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2024. – P. 130208. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130208>
23. Bsenko L., Lundström T. The high-temperature hardness of ZrB₂ and HfB₂ // Journal of the Less Common Metals. – 1974. – V. 34, N 2. – P. 273–278. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(74\)90169-6](https://doi.org/10.1016/0022-5088(74)90169-6)
24. Microstructure and corrosion properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy coatings deposited on AISI 1045 steel by the electrospray process / Q. H. Li et al. // Metallurgical and materials transactions A. – 2013. – V. 44. – P. 1767–1778. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1535-4>
25. Effect of spray powder particle size on the bionic hydrophobic structures and corrosion performance of Fe-based amorphous metallic coatings / Y. C. Li et al. // Surface and Coatings Technology. – 2022. – V. 437. – P. 128377. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128377>
26. Microstructural characterization and surface properties of laser clad Ni–ZrB₂ coatings on Ti–6Al–4V alloy / G. A. Farotade et al. // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 38. – P. 1035–1039. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.780>
27. Archard J. F. Contact and rubbing of flat surfaces // Journal of applied physics. – 1953. – V. 24, N 8. – P. 981–988. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1721448>

УДК 621.357.74:621.785.3

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Ni–W, Co–W И Ni–P–W, УПРОЧНЕННЫХ ЗА СЧЕТ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

А. В. КРАСИКОВ, канд. техн. наук, М. В. МЕРКУЛОВА, М. Е. ГОШКОДЕРЯ

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

Поступила в редакцию 13.05.2025

После доработки 16.05.2025

Принята к публикации 27.05.2025

Представлены результаты комплексного исследования основных эксплуатационных свойств вольфрамсодержащих гальванических покрытий Ni–W, Co–W и Ni–P–W, упрочненных термической обработкой. Показано, что для бинарных сплавов оптимальной является термическая обработка при 600°C, которая обеспечивает максимальную износостойкость. Для тройной системы целесообразно использовать отжиг при 350°C, в результате которого повышается адгезионная прочность исследованных покрытий. Сделан вывод, что для обеспечения износостойкости деталей машин целесообразно использовать покрытия Co–W, а для защиты одновременно от износа и коррозионного воздействия в соленой воде наиболее приемлемым является покрытие Ni–P–W.

Ключевые слова: гальванические защитные покрытия, покрытия Ni–W, Co–W и Ni–P–W, термообработка, микротвердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-80-88

ЛИТЕРАТУРА

1. Brenner A., Burkhead P., Seegmiller E. Electrodeposition of tungsten alloys containing iron, nickel and cobalt // Journal of research of the national bureau of standards. – 1947. – V. 39. – P. 351–383.
2. Гольц Л. Н., Харламов В. Н. Электролитическое осаждение сплавов вольфрама, никеля и меди из водных растворов // Журнал прикладной химии. – 1936. – Т. 9. – С. 640–652.
3. Васько А. Т. Электрохимия вольфрама. – Киев: Техніка, 1969. – 164 с.
4. Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals / N. Tsyntsar et al. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2012. – V. 48, N 6. – P. 491–520.
5. Eliaz N., Gilead E. Induced Codeposition of Alloys of Tungsten, Molybdenum and Rhenium with Transition Metals // Modern Aspects of Electrochemistry. – 2008. – N 42. – P. 191–301.
6. Yamasaki T. High-strength nanocrystalline Ni–W Alloys produced by electrodeposition // Mater. Phys. Mech. L. – 2000. – V. 1. – P. 127–132.
7. Donten M. Bulk and surface composition, amorphous structure, and thermocrystallization of electrodeposited alloys of tungsten with iron, nickel, and cobalt // J. Solid State Electrochem. – 1999. – N 3. – P. 87–96.
8. Васько А. Т. Электрохимия молибдена и вольфрама. – Киев: Наукова думка, 1977. – 171 с.
9. He F., Yang J., Lei T., Gu Ch. Structure and Properties of Electrodeposited Fe–Ni–W Alloys with Different Levels of Tungsten Content: A Comparative Study // Appl. Surf. Sci. – 2007. – V. 253, Is. 18. – P. 7591–7598.
10. Tharamani C. N., Beera P., Jayaram V., Begum N. Sh. Studies on electrodeposition of Fe–W alloys for fuel cell applications // Applied Surface Science. – 2006. – V. 253, Is. 4. – P. 2031–2037.
11. Galikova Z., Chovancova M., Danielik V. Properties of Ni–W alloy coatings on steel substrate // Chemical Papers. – 2006. – N 60 (5). – P. 353–359.
12. Chen H, Ren X., Zhang X., Jinhui Li. Wear and Corrosion Properties of Crystalline Ni–W Alloy Coatings Prepared by Electrodeposition // Materials Science Forum. – 2016. – V. 849. – P. 671–676.
13. Hamid Z. A. Electrodeposition of cobalt–tungsten alloys from acidic bath containing cationic surfactants // Materials Letters. – 2003. – N 57 (16–17). – P. 2558–2564.
14. Formation of a composite coating by crystallization of supersaturated solid solution in the Ni–W system / A. V. Krasikov, M. V. Merkulova, M. S. Mikhailov et al. // Transactions of the Indian institute of Metals. – 2024. – V. 77, N 9. – P. 2901–2908.
15. Electrochemical Synthesis of Amorphous Layers from a Nonequilibrium Co–W Alloy as a Precursor for Nanocomposite Coating Formation / Krasikov A. V., Kastsova A. G., Markov M. A. et al. // Russian Metallurgy. – 2022. – V. 2022. – N 6. – P. 666–673.
16. Krasikov A. V. Synthesis of Nanocomposite Coatings Based on Electrodeposited Amorphous Ni–P–W Layers // Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – V. 11, N 6. – P. 1359–1363.
17. Bera P., Seenivasan H., Rajam K. S., Grips W. V. K. XRD, FESEM and XPS studies on heat treated Co–W electrodeposits // Materials Letters. – 2012. – V. 76. – P. 103–105.

18. Effects of compositional and structural features on corrosion behavior of nickel-tungsten alloys / A. Krolkowski, E. Plonska, A. Ostrowski et al. // J. Solid State Electrochem. – 2009. – V. 13. – P. 263–275.
19. Cesiulis, H., Sinkeviciute, J., Bersirova, O., Ponthiaux, P. Tribocorrosion Testing of Self-Passivating Molybdenum and Tungsten Alloys Containing Cobalt and Iron // Int. conf. BALTTTRIB' 2009, Proceedings. – 2009. – P. 253–258.
20. Hosseini M.G., Abdolmaleki M., Ebrahimzadesh H., Sadjadi S. S. A. Effect of 2-butyne-1,4-diol on the nanostructure and corrosion resistance properties of Electrodeposited Ni–W–B Coatings // Int. J. Electrochem. Sci. – 2011. – V. 6. – P. 1189–1205.
21. Chianpairot A., Lothongkum G., Schuh A. C., Boonyongmaneerat Y. Corrosion of nanocrystalline Ni–W alloys in alkaline and acidic 3.5 wt.% NaCl solutions // Corrosion Science. – 2011. – V. 53. – P. 1066–1071.
22. Гуляев А. П. Коррозионно-стойкие сплавы тугоплавких металлов. – М.: Наука, 1982. – 119 с.
23. Studies on electrodeposition of Fe–W alloys for fuel cell applications / C. N. Tharamani, P. Beera, V. Jayaram et al. // Applied Surface Science. – 2006. – V. 253, Is. 4. – P. 2031–2037.
24. Electroplating of Amorphous Thin Films of Tungsten/Nickel Alloys / O. Younes et al. // Langmuir. – 2001. – V. 17 (26). – P. 8270–8275.
25. Younes O., Gileadi E. Electroplating of Ni/W Alloys I. Ammoniacal Citrate Baths // J. Electrochem. Soc. – 2002. – V. 149 (2). – P. 100–111.
26. Younes-Metzler O., Zhu L., Gileadi E. The anomalous codeposition of tungsten in the presence of nickel // Electrochimica Acta. – 2003. – N 48 (18). – P. 2551–2562.

УДК 621.793.3:621.357.74

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЯ Ni–P ИЗ ПИРОФОСФАТНЫХ И ЦИТРАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

А. В. КРАСИКОВ, канд. техн. наук, М. В. МЕРКУЛОВА

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

Поступила в редакцию 29.04.2025

После доработки 16.05.2025

Принята к публикации 27.05.2025

Проведено сравнительное исследование влияния параметров электрохимического осаждения покрытий Ni–P на их состав и выход по току при нанесении из пирофосфатного и цитратного электролитов. Показано, что оба электролита пригодны для нанесения покрытий Ni–P на изделия сложной формы. Проведено сравнение свойств покрытий различного состава, полученных из этих электролитов. Для получения более твердых покрытий целесообразно использовать пирофосфатный электролит, однако для защиты от коррозии он непригоден из-за развития микротрещин в покрытиях с содержанием фосфора 12 мас. % и более. Для этого целесообразно использовать цитратный электролит, который обеспечивает беспористость покрытий даже при содержании фосфора 12 мас. %.

Ключевые слова: защитные покрытия, покрытие Ni–P, цитратный электролит, пирофосфатный электролит

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-89-96

ЛИТЕРАТУРА

1. Гальванотехника. Справ. изд. / Ф. Ф. Ажогин, М.А. Беленький, И.Е. Галль и др. / Под ред. А. М. Гинберга, А. Ф. Иванова, Л. Л. Кравченко. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.
2. Пурин Б. А. Электроосаждение металлов из пирофосфатных электролитов. – Рига: Зинатне, 1975. – 196 с.
3. Андрющенко Ф. К., Орехова В. В., Павловская К. К. Пирофосфатные электролиты. – Киев: Техника, 1965. – 86 с.
4. Орехова В. В., Байрачный Б. И. Теоретические основы гальваностегических процессов. – Киев: Выща школа, 1998. – 208 с.

5. Долгих О. В., Соцкая Н. В., Кравцова Ю. Г., Слепцова О. В. Каталитическая активность никелевых сплавов в реакции выделения водорода // Вестник ВГУ, серия «Химия, биология, фармация». – 2007. – № 1. – С. 33–38.
6. Zhao H. F. Electrodeposition of amorphous Ni–P alloy coatings // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 1997. – V. 7, N 3. – P. 148–151.
7. Yuan X., Sun D., Hua Z., Wang L. Initial electrodeposition behavior of amorphous Ni–P alloys // Advanced Materials Research. – 2011. – V. 154. – P. 535–539.
8. Красиков А. В., Быкова А. Д., Меркулова М. В., Марков М. А. Исследование технологии электрохимического нанесения нанокристаллических покрытий никель – вольфрам из цитратного электролита // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 1 (101). – С. 111–117.
9. Красиков А. В., Первухина М. С. Технологические особенности нанесения покрытий из коррозионно-стойких наноструктурированных сплавов никель – вольфрам методом электрохимического осаждения // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 3 (67). – С. 117–124.
10. Yamasaki T. High-strength nanocrystalline Ni–W Alloys produced by electrodeposition // Mater. Phys. Mech. L. – 2000. – V. 1. – P. 127–132.
11. Ahmad J., Asami K., Takeuchi A., Inoue A. Effect of Sodium Hypophosphite on the Structure and Properties of Electrodeposited Ni–W–P Alloys // Materials Transactions. – 2003. – V. 44, N 4. – P. 705–708.
12. Cesiulis H., Xie X., Podlaha-Murphy E. Electrodeposition of Co–W Alloys with P and Ni // Material science. – 2009. – V. 15, N. 2. – P. 115–122.

УДК 621.357.74:669.6'5:620.197

ИМПУЛЬСНЫЕ ГАЛЬВАНОСТАТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОЛИЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭКОЛОГИЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВА ОЛОВО – ЦИНК

С. Ю. КИРЕЕВ, д-р техн. наук, Г. В. КОЗЛОВ, д-р техн. наук, С. Н. КИРЕЕВА, канд. техн. наук,
А. З. ЯНГУРАЗОВА, Ю. Н. КИРИЛИНА, канд. техн. наук, А. С. БАЛЫБЕРДИН

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», 440026, Пенза, ул. Красная, д. 40.
E-mail: sergey58_79@mail.ru; Dean_fptet@pnzgu.ru

Поступила в редакцию 18.03.2025

После доработки 27.03.2025

Принята к публикации 31.03.2025

Исследовано влияние импульсных гальваностатических режимов электролиза (униполярного и реверсивного) на коррозионную стойкость и функциональные свойства экологичных покрытий из сплава олово – цинк (Sn–Zn). В качестве электролита использовали щелочной раствор с добавками цитрата и лаурилсульфата натрия. Униполярный режим (5 мс, 1,5 А/дм²) обеспечил высокий выход по току (72%) и микротвердость 950–1050 МПа, но привел к повышенной пористости (7–12%). Реверсивный режим (5 мс катодной/анодной фазы, 2,0/0,5 А/дм²) продемонстрировал минимальную пористость (2–4%), снижение внутренних напряжений (50–80 МПа) и максимальную коррозионную стойкость (>1200 ч в солевом тумане). Установлено, что анодные фазы реверсивного режима способствуют выравниванию поверхностей, снижают дефектность. Импульсные технологии превзошли стационарный электролиз по износостойкости получаемых покрытий в 2–3 раза, по микротвердости – на 15–25%, а также по паяемости (угол смачивания 12–18°). Реверсивный режим электролиза рекомендован для изделий морской электроники и авиации, униполярный – для задач с приоритетом микротвердости. Результаты способствуют разработке экологичных альтернатив токсичным покрытиям в соответствии с требованиями RoHS/REACH.

Ключевые слова: импульсный электролиз, коррозионная стойкость, олово-цинковые покрытия, пористость, анодное выравнивание

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-97-107

ЛИТЕРАТУРА

1. Joscha B., Annkatrin K., Michael R. Beyond RoHS and REACH: Relevant CMR Substances in Electronic Products // *Electronics Goes Green 2024 + (EGG)*. – IEEE. – 2024. – P. 1–5.
2. Dubent S., Mertens M. L. A. D., Saurat M. Electrodeposition, characterization and corrosion behaviour of tin – 20 wt.% zinc coatings electroplated from a non-cyanide alkaline bath // *Materials Chemistry and Physics*. – 2010. – V. 120, N 2–3. – P. 371–380.
3. Maniam K. K., Paul S. Corrosion performance of electrodeposited zinc and zinc-alloy coatings in marine environment // *Corrosion and Materials Degradation*. – 2021. – V. 2, N 2. – P. 163–189.
4. Wang K., Pickering H. W., Weil K. G. Tin-zinc alloy electroplating and its corrosion behavior // *Prod Finish*. – 2023. – V. 867. – P. 6–11.
5. Киреев С. Ю. Формирование и исследование свойств финишных покрытий печатных плат сплавом олово–цинк взамен покрытий сплавом олово–свинец // *Коррозия: материалы, защита*. – 2015. – № 8. – С. 7–12.
6. Янгуразова А. З., Киреев С. Ю. К вопросу о поиске альтернативы кадмиевому покрытию // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2021. – Т. 35, № 5 (240). – С. 34–35.
7. Liu P. et al. Study on microstructure and properties of mechanically deposited Zn–Sn coating // *Coatings*. – 2022. – V. 12, N 12. – P. 1919.
8. Benidir S., Madani A., Baka O., Kherfi A., Delhalle J., Mekhalif Z. Influence of applied potential on tin content in electrodeposition of Zn–Sn alloy coatings and its effect on corrosion protection // *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*. – 2022. – V. 52, N 7. – P. 899–909.
9. Shepelevich V. G., Zernitsa D. A. The formation of the structure of the alloys of the tin–zinc system upon high-speed solidification // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2021. – V. 12, Is. 4. – P. 1094–1099.
10. Zernitsa D. A., Shepelevich V. G. Structure formation and peculiarities of crystallization of lead-free tin–zinc alloys obtained by rapid solidification // *Journal of the Belarusian State University. Physics*. – 2022. – N 3. – P. 48–55.
11. Tamhane D., Thalapil J., Banerjee S., Tallur S. Smart cathodic protection system for real-time quantitative assessment of corrosion of sacrificial anode based on electro-mechanical impedance (EMI) // *IEEE Access*. – 2021. – V. 9. – P. 12230–12240.
12. Grachev V. A., Rozen A. E., Perelygin Y. P., Kireev S. Y., Los I. S. Multilayer corrosion-resistant material based on iron–carbon alloys // *Heliyon*. – 2020. – V. 6, N 5.
13. Rozen A. E., Loginov O. N., Rosen A. A., Kireev S. Y., Sevostyanov N. V. Structure of the inter-layer boundary of layered metal materials with an internal protector obtained via explosion welding // *Metallurgist*. – 2022. – V. 66, N 5. – P. 586–592.
14. Кирикова Д. И., Киреева С. Н., Киреев С. Ю., Перелыгин Ю. П. ние цинка -Электроосаждение из кислого лактатного электролита с использованием униполярного гальваностатического режима. № ,Т. 24 – .2016 –импульсного электролиза // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 3. – С. 32–38. DOI: 10.47188/0869-5326_2016_24_3_32
15. Kireev S. Y., Perelygin Y. 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.
16. Kireev S. Y., 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.
17. Zhang Z., Gao Q., Ao J., Yao L., Bi J., Gao S., Jeng M-J., Sun G., Zhou Z., Liu F., Zhang Y., Sun Y. Morphology Modification of Sn and Zn Metal Thin Films Applied for CZTSe Solar Cell: The Effect of Pulse Current Electrodeposition // *7th IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, WCPEC 2018*. – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. – P. 881–886.
18. Burton N. A., Grant J. C. Increasing the efficiency of water electrolysis with the application of pulsing electric fields // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2025. – V. 215. – P. 115584.
19. Lu H., Zhang L., Xi X., Nie Z. Optimization of pulse bi-directional electrolysis in-situ synthesis of tungsten carbide by response surface methodology // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2023. – V. 111. – P. 106063.

20. Du W., Yan J., Cao C., Li C. C. Electrocrystallization orientation regulation of zinc metal anodes: strategies and challenges // *Energy Storage Materials*. – 2022. – V. 52. – P. 329–354.
21. Cao F., Wang J., Lian Y. et al. A study on the influence of the electroplating process on the corrosion resistance of zinc-based alloy coatings // *Coatings*. – 2023. – V. 13, N 10. – P. 1774.
22. Liang J., Li J., Dong H. et al. Aqueous alternating electrolysis prolongs electrode lifespans under harsh operation conditions // *Nature Communications*. – 2024. – V. 15, N 1. – P. 6208.
23. Kazimierzak H., Ozga P., Jałowicz A., Kowalik R. Tin–zinc alloy electrodeposition from aqueous citrate baths // *Surface and coatings technology*. – 2014. – V. 240. – P. 311–319.
24. Перелыгин Ю. П., Киреев С. Ю., Виноградов С. Н. Износостойкость и антифрикционные свойства гальванических покрытий палладием, оловом, цинком и сплавами на их основе // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. – 2012. – № 10. – С. 13–16.
25. Киреев С. Ю., Перелыгин Ю. П. Методы определения паяемости покрытий // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 2011. – Т. 19. – № 2. – С. 52–57.
26. Zhang Y., Zhang T., Wan H., Li G., Liu H. Mechanism of microbiologically induced anaerobic water-line corrosion of 980 high strength steel in nutrient-rich artificial seawater // *Corrosion Science*. – 2023. – V. 220. – P. 111268.
27. Chung Y., Lee C. W. Electrochemically fabricated alloys and semiconductors containing indium // *Journal of Electrochemical Science and Technology*. – 2012. – V. 3, N 3. – P. 95–115.

УДК 678.743.41:621.891

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ГАЛЛУАЗИТА РАЗНЫХ МАРОК

П. Н. ТАРАСОВА, Ю. В. КАПИТОНОВА, канд. хим. наук, Н. П. СИВЦЕВА-ГЛАДКИНА,
Н. Н. ЛАЗАРЕВА, канд. техн. наук, А. А. ОХЛОПКОВА, д-р техн. наук, Ю. В. КЫЧКИНА,
А. А. КАНАЕВА

*ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова»,
677000, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), ул. Белинского, 58. E-mail: pn.tarasova@mail.ru*

Поступила в редакцию 4.04.2025

После доработки 29.04.2025

Принята к публикации 6.05.2025

Исследовано влияние галлуазитовых нанотрубок трех марок на изменение физико-механических, триботехнических свойств и структуры политетрафторэтилена. По своей природе галлуазит с общей химической формулой $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$ представляет собой завернутый в трубку каолинит. Исследуемые марки галлуазита отличаются по текстурным характеристикам и фазовому составу. Показано, что композиты, армированные галлуазитом, демонстрируют значительное (в 400 раз) снижение интенсивности износа политетрафторэтилена при сохранении низкого значения коэффициента трения (~0,20). При увеличении содержания галлуазита до 5 мас. % значительно повышается модуль упругости материала. При введении галлуазита марки АНТ 811 относительное удлинение в 9 раз, а износостойкость в 6 раз выше, чем при введении галлуазита марки АНТ 3810. Изменения показателей износостойкости и коэффициента трения имеют корреляцию. Наибольшей износостойкостью обладает композит ПТФЭ/галлуазит АНТ 811 благодаря формированию износостойкого слоя вторичных структур на поверхности трения композиционного материала. Трибологические испытания показали, что частицы галлуазитовых нанотрубок на начальных этапах трения выступают в качестве твердой смазки.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, политетрафторэтилен, слоистые силикаты, нанотрубки, галлуазит

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-108-121

ЛИТЕРАТУРА

1. Xiao W., Ji X. Effect of nano fillers on the properties of polytetrafluoroethylene composites: Experimental and theoretical simulations // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2021. – V 138, N 45. – P. 51340. DOI: 10.1002/app.51340

2. Chan J. X., Wong J. F., Petru M., Hassan A., Nirmal U., Othman N., Ilyas R. A. Effect of nanofillers on tribological properties of polymer nanocomposites: A review on recent development // *Polymers*. – 2021. – V. 13, N 17. – P. 2867. DOI: 10.3390/polym13172867
3. Liu M., Jia Z., Jia D., Zhou C. Recent advance in research on halloysite nanotubes-polymer nanocomposite // *Progress in polymer science*. – 2014. – V. 39, N 8. – P. 1498–1525. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2014.04.004
4. Cheng C., Song W., Zhao Q., Zhang H. Halloysite nanotubes in polymer science: Purification, characterization, modification and applications // *Nanotechnology Reviews*. – 2020. – V. 9, N 1. – P. 323–344. DOI: 10.1515/ntrev-2020-0024
5. Kausar A. Review on polymer/halloysite nanotube nanocomposite // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2018. – V. 57, N 6. – P. 548–564. DOI: 10.1080/03602559.2017.1329436
6. Idumah C. I., Hassan A., Ogbu J., Ndem J. U., Nwuzor I. C. Recently emerging advancements in halloysite nanotubes polymer nanocomposites // *Composite Interfaces*. – 2019. – V. 26, N 9. – P. 751–824. DOI: 10.1080/09276440.2018.1534475
7. Amirkiai A., Panahi-Sarmad M., Sadeghi G. M. M., Arjmand M., Abrisham M., Dehghan P., Nazockdast H. Microstructural design for enhanced mechanical and shape memory performance of polyurethane nanocomposites: Role of hybrid nanofillers of montmorillonite and halloysite nanotube // *Applied Clay Science*. – 2020. – V. 198. – P. 105816. DOI: 10.1016/j.clay.2020.105816
8. Bulbul Y. E., Okur M., Demirtas-Korkmaz F., Dilsiz N. Development of PCL/PEO electrospun fibrous membranes blended with silane-modified halloysite nanotube as a curcumin release system // *Applied Clay Science*. – 2020. – V. 186. – P. 105430. DOI: 10.1016/j.clay.2019.105430
9. Eryildiz M., Altan M. Fabrication of polylactic acid/halloysite nanotube scaffolds by foam injection molding for tissue engineering // *Polymer Composites*. – 2020. – V. 41, N 2. – P. 757–767. DOI: 10.1002/pc.25406
10. Hamedi S., Koosha M. Designing a pH-responsive drug delivery system for the release of black-carrot anthocyanins loaded in halloysite nanotubes for cancer treatment // *Applied Clay Science*. – 2020. – V. 197. – P. 105770. DOI: 10.1016/j.clay.2020.105770
11. Prashantha K., Lacrampe M. F., Krawczak P. Processing and characterization of halloysite nanotubes filled polypropylene nanocomposites based on a masterbatch route: effect of halloysites treatment on structural and mechanical properties // *Express Polymer Letters*. – 2011. – V. 5, N 4. – P. 295–307. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2011.30
12. Du M., Guo B., Lei Y., Liu M., Jia D. Carboxylated butadiene–styrene rubber/halloysite nanotube nanocomposites: Interfacial interaction and performance // *Polymer*. – 2008. – V. 49, N 22. – P. 4871–4876. DOI: 10.1016/j.polymer.2008.08.042
13. Prashantha K., Lacrampe M. F., Krawczak P. Highly dispersed polyamide-11/halloysite nanocomposites: Thermal, rheological, optical, dielectric, and mechanical properties // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2013. – V. 130, N 1. – P. 313–321. DOI: 10.1002/app.39160
14. Krishnaiah P., Manickam S., Ratnam C. T., Raghu M. S., Parashuram L., Prasanna Kumar S., Jeon B. H. Mechanical, thermal and dynamic-mechanical studies of functionalized halloysite nanotubes reinforced polypropylene composites // *Polymers and Polymer Composites*. – 2021. – V. 29, N 8. – P. 1212–1221. DOI: 10.1177/0967391120965115
15. Krishnaiah P., Ratnam C. T., Manickam S. Development of silane grafted halloysite nanotube reinforced polylactide nanocomposites for the enhancement of mechanical, thermal and dynamic-mechanical properties // *Applied Clay Science*. – 2017. – V. 135. – P. 583–595. DOI: 10.1016/j.clay.2016.10.046
16. Pasbakhsh P., Churchman G. J., Keeling J. L. Characterisation of properties of various halloysites relevant to their use as nanotubes and microfibre fillers // *Applied Clay Science*. – 2013. – V. 74. – P. 47–57. DOI: 10.1016/j.clay.2012.06.014
17. Aytekin M. T., Hoşgün H. L. Characterization studies of heat-treated halloysite nanotubes // *Chemical Papers*. – 2020. – V. 74, N 12. – P. 4547–4557. DOI: 10.1007/s11696-020-01263-6
18. Le Ba T., Alkurdi A. Q., Lukács I. E., Molnár J., Wongwises S., Gróf G., Szilágyi I. M. A novel experimental study on the rheological properties and thermal conductivity of halloysite nanofluids // *Nanomaterials*. – 2020. – V. 10, N 9. – P. 1834. DOI: 10.3390/nano10091834
19. Атякшева Л. Ф., Касьянов И. А. Галлуазит – природные алюмосиликатные нанотрубки: структурные особенности и адсорбционные свойства // *Современные молекулярные сита*. – 2021. – Т. 3, № 2. – С. 124–143. DOI: 10.53392/27130304_2021_3_2_124

20. Nambiar A. P., Pillai R., Sanyal M., Vadikkeetil Y., Shrivastav P. S. A starch based sustainable bio-hybrid composite for surface assimilation of methylene blue: preparation, characterization, and adsorption study // *Environmental Science: Advances*. – 2023. – V. 2, N 6. – P. 861–876. DOI: 10.1039/D2VA00274D

21. Дятлова Е. М., Бобкова Н. М., Сергиевич О. А. ИК-спектроскопическое исследование каолинового сырья белорусских месторождений // *Проблемы недропользования*. – 2019. – Т. 21. – №2. – С. 143–149. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.143

22. Xu J., Reiter G., Alamo R. G. Concepts of nucleation in polymer crystallization // *Crystals*. – 2021. – V. 11, N 3. – P. 304. DOI: 10.3390/cryst11030304

23. Kapitonova Iu. V., Lazareva N. N., Tarasova P. N., Okhlopko A. A., Laukkanen S., Mukhin V. V. Morphology analysis of friction surfaces of composites based on PTFE and layered silicates // *Polymers*. – 2022. – V. 14, N 21. – P. 4658. DOI: 10.3390/polym14214658

24. Капитонова Ю. В., Тарасова П. Н., Охлопкова А. А., Лазарева Н. Н. Трибохимические реакции, протекающие на поверхности трения композитов на основе ПТФЭ, наполненного слоистыми силикатами // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2024. – №2. – С. 98–106. DOI: 10.25699/SSSB.2024.54.2.012

25. Слепцова С. А., Охлопкова А. А., Капитонова Ю. В., Лазарева Н. Н., Макаров М. М., Никифоров Л. А. Спектроскопические исследования трибоокислительных процессов модифицированного ПТФЭ // *Трение и износ*. – 2016. – Т. 37, № 2. – С. 168–176.

УДК 678.743.41:621.891:534.29

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

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. Мура, 11.

E-mail: den.veber.18@bk.ru

Поступила в редакцию 8.04.2025

После доработки 15.04.2025

Принята к публикации 7.07.2025

Представлен новый способ прессования композитов, модифицированных углеродными наполнителями, с дополнительным комплексным воздействием ультразвуковых колебаний частотой 17 кГц и наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией 100 Гц. Данный способ энергетического воздействия позволил снизить в 1000 раз интенсивность массового износа образцов композита в условиях сухого трения по сравнению с образцами из политетрафторэтилена и при этом сохранить коэффициент трения исходного полимера. Показано, что применение ультразвукового воздействия способствует дезагрегации наноразмерных частиц, а использование одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляции приводит к упорядоченному распределению наполнителя в полимерной матрице. Такой режим обеспечивает получение бездефектной структуры за счет уплотнения композиционной смеси и способствует устранению пор и трещин в объеме материала.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, многостенные углеродные нанотрубки, износостойкость, низкочастотная модуляция, ультразвук

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-122-135

ЛИТЕРАТУРА

1. 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>

2. Alam K. I., Dorazio A., Burris D. L. Polymers tribology exposed: eliminating transfer film effects to clarify ultralow wear of PTFE // *Tribology Letters*. – 2020. – V. 68, Art. 67. URL: <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01306-9>

3. 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>

4. Amenta F., Bolelli G., Pedrazzi S., Allesina G., Santeramo F., Bertarini A., Sassatelli P., Lusvarghi L. Sliding Wear Behaviour of Fibre-Reinforced PTFE Composites against Coated and Uncoated Steel // *Wear*. – 2021. – V. 486. – P. 204097. URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2021.204097>
5. Li J., Ran Y. Evaluation of the Friction and Wear Properties of PTFE Composites Filled with Glass and Carbon Fiber // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. – 2010. – V. 41, N 2. – P 115–118. URL: <https://doi.org/10.1002/mawe.200900545>
6. 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>
7. Chen W. X., Li F., Han G., Xia J. B., Wang L. Y., Tu J. P., Xu Z. D. Tribological Behavior of Carbon-Nanotube-Filled PTFE Composites // *Tribology Letters*. – 2003. – V. 15, N 3. – P. 275–278. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1024869305259>
8. Машков Ю. К., Кургузова О. А., Рубан А. С. Разработка и исследование износостойких полимерных композитов // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 36–45.
9. Никитина А. В., Охлопкова А. А., Васильев А. П. Исследование влияния наноразмерного нитрида бора на свойства политетрафторэтилена // *Материалы международной научно-практической конференции «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 7–11 февраля 2022 г.* – С. 329–333. URL: <https://doi.org/10.17084/978-5-7765-1502-6-2022-329>
10. Охлопкова А. А., Адрианова О. А., Попов С. Н. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями. – Якутск: Изд-во СО РАН, 2003. – 224 с.
11. Ronghao L., Keqiang L., Haiyong T., Jianmin X., Shaoquan L. Mechanical Properties of Plasma-Treated Carbon Fiber Reinforced PTFE Composites with CNT // *Surface and Interface Analysis*. – 2017. – V. 49, N 11. – P. 1064–1068. URL: <https://doi.org/10.1002/sia.6278>
12. Vasilev A. P., Lazareva N. N., Struchkova T. S., Okhlopova A. A., Danilova S. N. Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Modified with Combined Fillers: Carbon Fibers, Zirconium Dioxide, Silicon Dioxide and Boron Nitride // *Polymers*. – 2023. – V. 15, N 2. – P. 313–326. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15020313>
13. Rennhofer H., Zanghellini B. Dispersion State and Damage of Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers by Ultrasonic Dispersion: A Review // *Nanomaterials*. – 2021. – V. 11, N 6. – P. 1469–1496. URL: <https://doi.org/10.3390/nano11061469>
14. Негров Д. А., Путинцев В. Ю. Влияние низкочастотной модуляции на механические свойства и триботехнические характеристики полимерных композиционных материалов // *Ползуновский вестник*. – 2021. – № 4. – С. 140–145. URL: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018>
15. Негров Д. А., Еремин Е. Н. Повышение коэффициента усиления и частотной устойчивости ультразвуковой волноводной системы // *Омский научный вестник*. – 2012. – Т. 110, № 2. – С. 94–97.
16. Негров Д. А., Еремин Е. Н., Путинцев В. Ю., Передельская О. А. Расчет ультразвуковых волноводных систем для различных технологических процессов // *Россия молодая: передовые технологии – в промышленность*. – 2013. – № 1. – С. 99–102.
17. Негров Д. А., Путинцев В. Ю. Усовершенствование технологии прессования изделий из политетрафторэтилена // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. – 2021. – Т. 14, № 5. – С. 564–571. URL: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0333>
18. 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>
19. Негров Д. А., Путинцев В. Ю. Влияние низкочастотной модуляции на механические свойства и триботехнические характеристики полимерных композиционных материалов // *Ползуновский вестник*. – 2021. – № 4. – С. 140–145. URL: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018>

20. Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Васильев А. П., Алексеев А. Г., Дьяконов А. А. Влияние термической обработки на надмолекулярную структуру порошка политетрафторэтилена // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. – 2016. – Т. 54, № 4. – С. 48–57.
21. Klaas N. V., Marcus K., Kellock C. The Tribological Behaviour of Glass Filled Polytetrafluoroethylene // Tribology International. – 2005. – V. 38, Is. 9. – P. 824–833. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.02.010>
22. Alam K. I., Burris D. L. Ultralow Wear Poly (Tetrafluoroethylene): A Virtuous Cycle of Wear Reduction and Tribochemical Accumulation // Journal of Physical Chemistry C. – 2021. – V. 125, N 35. – P. 19417–19427. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c03885>
23. Samad M. A. Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/UHMWPE Hybrid Nanocomposite Polymer Coatings for Tribological Applications: A Comprehensive Review // Polymers. – 2021. – V. 13, N 4. – P. 608–647. URL: <https://doi.org/10.3390/polym13040608>
24. Zhang F., Zhang J., Zhy. Y., Wang X. Microstructure and Properties of Polytetrafluoroethylene Composites Modified by Carbon Materials and Aramid Fibers // Coatings. – 2020. – V. 10, N 11. – P. 1103–1123. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings10111103>
25. Shi Y., Feng X., Wang. H. Tribological and Mechanical Properties of PTFE Composites Filled with the Combination of Short Carbon Fiber and Carbon Nanofiber // Key Engineering Materials. – 2007. – V. 334–335. – P. 689–692. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.334-335.689>
26. Xiao W., Ji X. Effect of nano fillers on the properties of polytetrafluoroethylene composites: Experimental and theoretical simulations // Journal of Applied Polymer Science. – 2021. – V. 138, N 45. – P. 51340. URL: <https://doi.org/10.1002/app.51340>
27. Negrov D. A., Putintsev V. Y., 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 4. – P. 1141–1149. URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-025-0210-9>

УДК 678.743.41:677.172

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ И ВОЛЛАСТОНИТА ИЗ РИСОВОЙ СОЛОМЫ

Е. В. АБАКУНОВА¹, Т. С. СТРУЧКОВА¹, канд. техн. наук, С. Б. ЯРУСОВА², канд. хим. наук,
С. Н. ДАНИЛОВА^{1,3}, канд. техн. наук, А. Е. ПАНАСЕНКО², канд. хим. наук,
А. А. ОХЛОПКОВА¹, д-р техн. наук, П. С. ГОРДИЕНКО², д-р техн. наук

¹ ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова»,
677000, Якутск, ул. Кулаковского, 48. E-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

² ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения РАН», 690022, Владивосток,
пр. 100-летия Владивостока, 159

³ Харбинский политехнический университет, 150090, Харбин, ул. Сидачжи, 92,
Китайская Народная Республика

Поступила в редакцию 23.04.2025

После доработки 23.05.2025

Принята к публикации 27.05.2025

Исследовано влияние волластонитсодержащего материала на свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ). Разработаны новые рецептуры композиционных материалов, в которых содержание волластонита варьировали от 0,1 до 2 мас. %. Установлено, что введение волластонита приводит к повышению уровня механических свойств: прочности при растяжении на 35% и относительного удлинения при разрыве на 47%. Кроме того, зафиксировано повышение износостойкости ПКМ в 67 раз по сравнению с износостойкостью исходного ПТФЭ. Полученные результаты коррелируют с результатами термодинамических и структурных методов исследования. Показано, что надмолекулярная структура ПТФЭ при введении волластонита изменяется от ленточной до сферолитоподобной. Методом ИК-спектроскопии зафиксировано формирование вторичных структур из окисленных функциональных групп. Результаты термодинамических исследований свидетельствуют о том, что увеличение концентрации волластонита в ПКМ сопровождается повышением степени кристалличности и энтальпии плавления.

© 2025

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, политетрафторэтилен, волластонит, рисовая солома

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-136-144

ЛИТЕРАТУРА

1. Раскутин А. Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 5. – С. 344–348.
2. Chen H., Li C., Yao Q., Chen F., Fu Q. Enhanced thermal conductivity and wear resistance of polytetrafluoroethylene via incorporating hexagonal boron nitride and alumina particles // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2022. – V. 139, N 3. – P. 51497.
3. Wang H., Sun A., Qi X., Dong Y., Fan B. Experimental and analytical investigations on tribological properties of PTFE/AP composites // *Polymers*. – 2021. – V. 13, N 24. – P. 4295.
4. Sathish M., Radhika N., Venuvanka N., Rajeshkumar L. A review on sustainable properties of plant fiber-reinforced polymer composites: characteristics and properties // *Polymer International*. – 2024. – V. 73, N 11. – P. 887–943.
5. Ахметханов Р. М., Садритдинов А. Р., Захаров В. П., Шуршина А. С., Кулиш Е. И. Изучение вязкоупругих характеристик вторичного полимерного сырья в присутствии природных наполнителей растительного происхождения // *Конденсированные среды и межфазные границы*. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 11–17.
6. Подденежный Е. Н., Дробышевская Н. Е., Бойко А. А., Шаповалов В. М., Дробышевский Н. С. Особенности формирования биоразлагаемых композитов, наполненных рисовой лузгой // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого*. – 2021. – № 4 (87). – С. 50–57.
7. Danilova S. N., Yarusova S. B., Kulchin Y. N., Zhevtun I. G., Buravlev I. Y., Okhlopko A. A., Gordienko P. S., Subbotin E. P. UHMWPE/CaSiO₃ nanocomposite: mechanical and tribological properties // *Polymers*. – 2021. – V. 13, N 4. – P. 570.
8. Пат. НА 2770075. Способ получения волластонита из кремнийсодержащего растительного сырья / Ярусова С. Б., Панасенко А. Е., Гордиенко П. С., Земнухова Л. А. – Опубл. 14.04.2022.
9. Готлиб Е. М., Садыкова Д. Ф., Кожевников Р. В., Твердов И. Д., Мишагин К. А. Поливинилхлоридные композиции для линолеума с добавками наполнителей на основе рисовой шелухи // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 114–119.
10. Горбачев А. В., Файзуллин И. З., Вольфсон С. И., Канарский А. В., Захаров И. В., Казаков Ю. М. Композиционный материал на основе полиолефинов и модифицированных растительных наполнителей // *Пластические массы*. – 2023. – Т. 1, № 1–2. – С. 48–52.
11. Никитина А. В., Васильев А. П., Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Алексеев А. Г. Влияние способов активации оксида титана на свойства и структуру политетрафторэтилена // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2022. – № 2. – С. 42.
12. Стручкова Т. С., Амвросьев Я. А. Исследование влияния нанопластики магния на структуру и свойства политетрафторэтилена // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 47–50.
13. Игнатьева Л. Н., Бузник В. М. ИК-спектроскопические исследования политетрафторэтилена и его модифицированных форм // *Российский химический журнал*. – 2008. – Т. 52, № 3. – С. 139–142.
14. Капитонова Ю. В., Тарасова П. Н., Охлопкова А. А., Лазарева Н. Н. Трибохимические реакции, протекающие на поверхности трения композитов на основе ПТФЭ, наполненного слоистыми силикатами // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2024. – № 2 (54). – С. 98–106.

УДК 620.197.3:621.182.44

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ИНЕРТНОГО НОСИТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИКРОКАПСУЛИРОВАНИЯ ИНГИБИТОРА КОРРОЗИИ И НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ

С. А. СИДОРОВА¹, С. А. ТЮРИНА^{1,3}, канд. техн. наук, Н. А. РАШУТИН¹,
В. Л. ДЕМИН^{1,2}, канд. техн. наук, В. А. ЩЕЛКОВ^{2,3}, канд. техн. наук

© 2025

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78.
E-mail: tyurina_s@mirea.ru

² ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН»,
119071, Москва, Ленинский пр., 31, корп. 4

³ ООО «НПО РОКОР», 129110, Москва, пр. Мира, 68, стр. 3

Поступила в редакцию 28.01.2025

После доработки 24.04.2025

Принята к публикации 15.09.2025

Микрокапсулирование ингибиторов коррозии позволяет повысить эффективность модифицирования полимерных композиционных покрытий и тем самым обеспечить высокую коррозионную стойкость их в течение длительного времени. Актуальной задачей остается подбор инертного носителя, составляющего твердую основу функциональной частицы. В работе рассмотрены особенности твердых носителей функциональных добавок, применяющихся для получения микрокапсул. Проведено исследование кинетики высвобождения ингибирующего агента из микрокапсул спектрофотометрическим методом с построением градуировочного графика. Установлено, что наибольшую загрузку ингибирующего агента и более длительное время высвобождения среди рассмотренных носителей показал активированный оксид алюминия.

Ключевые слова: технология микрокапсулирования, модификация полимерных покрытий, коррозия, ингибирование коррозии, накипеобразование, лакокрасочные материалы

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-145-155

ЛИТЕРАТУРА

1. Рашутин Н. А., Тюрина С. А., Демин В. Л. Установки для ускоренного накипеобразования // Сб. докл. Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА «Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024)». – М.: МИРЭА, 2024. – С. 235–236. EDN STEBPP
2. Global needs for knowledge dissemination, research, and development in materials deterioration and corrosion control / G. Schmitt et al. // World Corrosion Organization, 2009. – 44 p. URL: <http://www.corrosion.org.cn/fszy/202304/P020230501743614591484.pdf> (дата обращения 31.08.2025)
3. Татаринцев В. А. Особенности накипеобразования в трубах теплообменных аппаратов // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2022. – № 1. – С. 97–105. DOI: 10.14529/power220111
4. Obot I. B. Under-Deposit Corrosion on Steel Pipeline Surfaces: Mechanism, Mitigation and Current Challenges // J. Bio Tribo. Corros. – 2021. – V. 7, Is. 2. – Art. 49. URL: <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00485-9>
5. Банных О.П. Основные конструкции и тепловой расчет теплообменников: Учебное пособие. – СПб: СПбНИУ ИТМО. – 2012. – 42 с.
6. Галковский В. А., Чупова М. В. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности // Наукovedenie. – 2017. – Т. 9, № 2 (март – апрель). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN217.pdf> (дата обращения 31.08.2025)
7. Гнеденков С. В., Синебрюхов С. Л., Минаев А. Н., Машталяр Д. В., Гор-диенко П. С. Влияние покрытий на интенсивность процессов солеотложения // Исследовано в России. Т. 6. – М.: МФТИ, 2003. – С. 1780–1790.
8. Ramezanzadeh B., Moghadam M. H. M., Shohani N., Mahdavian M. Effects of highly crystalline and conductive polyaniline/graphene oxide composites on the corrosion protection performance of a zinc-rich epoxy coating // Chemical Engineering Journal. – 2017. – V. 320. – P. 363–375. DOI: 10.1016/j.cej.2017.03.061. EDN: YXJCLP
9. Sharifi E., Ranjbar Kh. Dezincification assisted cracking of yellow brass tubes in a heat exchanger // Engineering Failure Analysis. – 2022. – V. 136, Is. 1. – P. 106200. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106200
10. Li H., Liu H., Wang G., Zhang X., Chen T., Yu Y., Yao H. Review on Erosion-wear and Protection of Heat Exchange Surface in Power Station Boilers // Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection. – 2023. – V. 43, N 5. – P. 957–970.
11. Sander J., Kirmaler L., Manea M., Shchulkin D., Skorb E. Korrosionsschutz durch Beschichtungen. – Hannover: Vincentz Network, 2011. – 240 p. DOI: 10.1515/9783748602125

12. Asadi N., Naderi R., Mahdavian M. Doping of zinc cations in chemically modified halloysite nanotubes to improve protection function of an epoxy ester coating // Corros. Sci. – 2019. – N 151. – P. 69–80. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.02.022

13. Степин С. Н., Толстошеева С. И., Светлаков А. П. Протекторные цинкнаполненные грунтовки. Влияние компонентов на противокоррозионную эффективность. Ч. 1 // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 9. – С. 122–128.

14. Дринберг А. С., Ицко Э. Ф., Калинин Т. В. Антиккоррозионные грунтовки. – СПб.: НИПРОИНС ЛКМП СОП, 2006. – 168 с.

15. Павлович А. В., Владенков В. В., Изюмский В. Н. Цинкнаполненные антикоррозионные грунтовки // Лакокрасочная промышленность. – 2010. – № 3. – С. 38–46.

16. Андреева С. А., Тюрина С. А., Дальская Г. Ю. Изучение кинетики высвобождения функциональных добавок из микрокапсул // Сб. докл. Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА «Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2023)». – Т. 1 / Под ред. А. Н. Юрасова. – Москва: МИРЭА, 2024. – С. 319–325. EDN OHIDZS

17. Рашутин Н. А., Тюрина С. А., Демин В. Л., Сидорова С. А. Подходы к изменению защитных свойств полимерных покрытий при использовании модифицирующих добавок // Бутлеровские сообщения. – 2023. – Т. 76, № 12. – С. 42–50. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/23-76-12-42. EDN QUNLAS

18. Рашутин Н. А., Тюрина С. А. Влияние функциональных добавок на процесс наклепобразования защитных полимерных покрытий // Сб. докл. конф. «Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех 2022)». – Москва: МИРЭА, 2022. – С. 311–314. EDN BPKSZX

19. Гнеденков С. В., Минаев А. Н., Лысенко Л. В., Шаталов В. К., Шапкина Е. И., Лысенко С. Л., Исследование наклепобразования в перспективных форсированных теплообменных системах // Наукоемкие технологии. – 2013. – Т. 7. – С. 26–34.

20. Головин В. А., Щелков В. А., Рашутин Н. А., Тюрина С. А., Демин В. Л. Микрокапсулированные и активные добавки для повышения антинакипных свойств полимерных противокоррозионных покрытий // Коррозия: защита материалов и методы исследований. – 2023. – № 4. – С. 131–141. URL: <https://doi.org/10.61852/2949-3412-2023-1-4-131-141>

21. Головин В. А., Тюрина С. А. Микрокапсулирование ингибиторов коррозии и активных добавок для противокоррозионных защитных полимерных покрытий // Коррозия: материалы, защита. – 2019. – № 7. – С. 1–11. DOI: 10.31044/1813-7016-2019-0-7-1-11. EDN AHGTAK

22. Бахвалов А. В. Определение содержания фосфонатов в технологической воде косвенным колориметрическим методом с применением двух градуировочных зависимостей // Проблемы современной науки и образования. – 2021. – № 11 (168). – С. 7–16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-soderzhaniya-fosfonatov-v-tehnologicheskoy-vode-kosvennym-kolorimetricheskim-metodom-s-primeneniem-dvuh-graduirovochnyh> (дата обращения: 18.12.2024)

23. Сидорова С. А., Дальская Г. Ю., Тюрина С. А., Деменков А. С., Сахаров М. В. Исследование морфологии микрокапсул, применяемых для модификации антикоррозионных полимерных покрытий // Сб. докл. Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА «Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024)». – Москва: МИРЭА, 2024. – С. 237–245.

УДК 678.674:621.921.26

ВЛИЯНИЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ГАЗОФАЗНЫМ СПОСОБОМ И МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ, НА СВОЙСТВА НЕНАСЫЩЕННОЙ ПОЛИЭФИРНОЙ СМОЛЫ

Е. А. АРТАМОНОВ, канд. техн. наук, К. Н. РЯБУХА, Л. А. СМЫСЛОВА

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

Поступила в редакцию 10.03.2025

После доработки 4.04.2025

Принята к публикации 11.04.2025

Исследованы прочностные показатели ненасыщенной полиэфирной смолы марки ПН-609-21М в зависимости от концентрации диоксида кремния, полученного разными способами. Рассмотрено также его влияние на технологические свойства смолы.

Ключевые слова: ненасыщенная полиэфирная смола, синтетический кремнезем, прочность при сжатии, вязкость, рецептура

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-156-163

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27952–88. Смолы полиэфирные ненасыщенные. Технические условия. – М.: ИПК «Изд-во стандартов», 1989.
2. Меркулов Д. А. Композиционные строительные материалы на основе полиэфирной смолы ПН-609–21М // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский гос. ун-т им. Н. П. Огарева, 2017. – С. 7–9, 13.
3. Кутищева Е. С., Усольцева И. О., Передерин Ю. В. Способы получения высокодисперсного диоксида кремния // Ползуновский вестник. – 2021. – № 2. – С. 188–193.
4. ГОСТ 14922–77. Аэросил. Технические условия [Переиздание с изменениями: № 2 (1986), № 3 (1987) и № 4 (1990)].
5. Тимощик О. А., Щелокова Е. А., Касиков А. Г. Влияние условий получения аморфного кремнезема золь-гель методом на его свойства // Химия и материаловедение. – 2019. – № 3. – С. 368–374.
6. ТУ 2168-002-14344269–09. Ковелос (диоксид кремния осажденный). Технические условия.
7. ГОСТ 25271–93. Пластмассы. Смолы жидкие, эмульсии или дисперсии. Определение кажущейся вязкости по Брукфильду.
8. Васялина А. А., Ожиганов В. В., Бакунин Д. О., Ильин А. А. Улучшение диспергируемости воднодисперсионной грунтовки // От химии к технологии шаг за шагом. – 2022. – Т. 3, № 4. – С. 15–18.
9. ОСТ 5.9616–85. Стеклопластики полиэфирные для судостроения. Типовые технологические процессы формования.
10. ГОСТ 4651–2014. Пластмассы. Методы испытания на сжатие.
11. Старокадомский Д. Л. Влияние усиления термостойкости эпоксикомпозитов, а также адгезии к стали и других прочностных свойств в зависимости от удельной поверхности нанокремнеземов в ряду 60–450 м²/г при 1 мас. % наполнения // Пластические массы. – 2018. – № 11–12. – С. 53–55.
12. Старокадомский Д. Л. Влияние аэросилов различной удельной поверхности на химическую стойкость эпоксиполимера в концентрированной азотной кислоте // Пластические массы. – 2010. – № 6. – С. 27–33.
13. Мокина Е. С., Шеин А. Б. Исследование влияния удельной поверхности технического углерода на технологические и физико-механические свойства резин // Вестник Пермского университета. – 2013. – Вып. 3, № 11. – С. 75–80.

УДК 678.686:539.421.5

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ПОЛИСУЛЬФОНА НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНУЮ УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

Ю. Ю. ФЕДОРОВ, канд. техн. наук, Н. В. ШАДРИНОВ, канд. техн. наук

ИПНГ СО РАН, 677891, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1.

E-mail: yuristan@yandex.ru

Поступила в редакцию 5.03.2025

После доработки 27.03.2025

Принята к публикации 11.04.2025

Исследовано влияние полисульфонов марок ПСФ-150 и ПСФ-180 в качестве термопластичного модификатора на ударную вязкость эпоксидной смолы ЭД-20 в температурном диапазоне от –60 до

20°C. С помощью растровой электронной микроскопии изучена эволюция структурно-морфологической организации эпоксидной композиции при увеличении концентрации полисульфона. Показано, что при его концентрации 20 мас. ч. формируется фазовая структура, в которой термопластичный полисульфон становится непрерывной матрицей. Это обеспечивает значительное повышение ударной вязкости в широком диапазоне температур, включая крайне низкие – до –60°C.

Ключевые слова: эпоксидная смола, полисульфон, термопластичный модификатор, фазовая структура, ударная вязкость, низкая температура

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-164-172

ЛИТЕРАТУРА

1. Кербер М. Л., Виноградов В. М. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. – СПб.: Профессия, 2009. – 560 с.;
2. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – СПб.: НОТ, 2008. – 822 с.
3. Загора А. Г., Ткачук А. И., Терехов И. В., Мухаметов Р. Р. Методы химической модификации эпоксидных олигомеров (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021. – № 7 (101). – С. 73–85.
4. Бабаевский П. Г., Кулик С. Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций. – М.: Химия, 1991. – 336 с.
5. Иржак В. И. Эпоксидные полимеры и композиты с эпоксидной матрицей. – М.: РАН, 2022. – 288 с.
6. Осипов П. В., Осипчик В. С., Смотрова С. А., Савельев Д. Н. Регулирование свойств наполненных эпоксидных олигомеров // Пластические массы. – 2011. – № 4. – С. 3–5.
7. Чурсова Л. В., Панина Н. Н., Гребенева Т. А., Кутергина И. Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2020. – 576 с.
8. Ширшова Е. С., Татаринцева Е. А., Плакунова Е. В., Панова Л. Г. Изучение влияния модификаторов на свойства эпоксидных композиций // Пластические массы. – 2006. – № 12. – С. 34–36.
9. Kumar R., Kumar K., Sahoos P., Bhowmik S. Study of mechanical properties of wood dust reinforced epoxy composite // Procedia Materials Science. – 2014. – N 6. – P. 551–556.
10. Плакунова Е. В., Татаринцева Е. А., Мостовой А. С., Панова Л. Г. Структура и свойства эпоксидных термореактопластов // Перспективные материалы. – 2013. – № 3. – С. 57–62.
11. Садыгов Ш. Ф., Ищенко Н. Я., Агаева С. А. Модификация ЭД-20 глицидными эфирами некоторых бензойных кислот // Пластические массы. – 2008. – № 3. – С. 24–26.
12. Development of bicontinuous morphologies in polysulfone-epoxy blends / P. A. Oyanguren, M. J. Galante, K. Andromaque et al. // Polymer. – 1999. – V. 40. – P. 5249–5255.
13. Солодилов В. И., Корохин Р. А., Горбаткина Ю. А., Куперман А. М. Органопластики на основе сложных гибридных матриц, включающих в качестве модификаторов эпоксидных смол полисульфон и углеродные нанотрубки // Химическая физика. – 2012. – Т. 31, № 6. – С. 63–71.
14. Копицына М. Н., Бессонов И. В., Котомин С. В. Трещиностойкость эпоксидных связующих, модифицированных термопластичным полисульфоном и фурфуролацетонной смолой // Инж. журнал: наука и инновации. – 2016. – № 12 (60). – С. 9.
15. Бузник В. М., Василевич Н. И. Материалы для освоения арктических территорий – вызовы и решения // Лаб. и произв. – 2020. – № 1 (11). – С. 98–107.
16. Fedorov Yu. Yu., Shadrinov N. V., Vasiliev S. V., Savvina A. V. Influence of Thermoplastic Elastomer Filler on Impact Viscosity of Epoxy Resin at Low Temperatures // Inorganic Materials: Applied Research. – 2023. – V. 14, N 4. – P. 1007–1012.
17. Третьяков И. В., Вяткина М. А., Черевинский А. П., Солодилов В. И., Шапагин А. В., Корохин Р. А., Будылин Н. Ю., Кирейнов А. В., Горбаткина Ю. А. Влияние полиэфирсульфона на свойства эпоксидного связующего и намоточных стеклопластиков на его основе // Известия РАН. Серия физическая. – 2021. – Т. 85, № 8. – С. 1132–1136.

18. Лобанов М. В., Гуляев А. И., Бабин А. Н. Повышение ударо- и трещиностойкости эпоксидных реактопластов и композиций на их основе с помощью добавок термопластов как модификаторов // *Высокомолекулярные соединения. Сер. Б.* – 2016. – Т. 58, № 1. – С. 3–15.
19. Petrova T. V., Tretyakov I. V., Kireynov A. V., Shapagin A. V., Budylin N. Y., Alexeeva O. V., Beshtoev B. Z., Solodilov V. I., Yurkov G. Y., Berlin A. A. Structure and Properties of Epoxy Polysulfone Systems Modified with an Active Diluent // *Polymers (Basel)*. – 2022. – N 14 (23). – P. 5320.
20. Yoon T., Kim B. S., Lee D. S. Structure development via reaction-induced phase separation in tetrafunctional epoxy/polysulfone blends // *Journal Applied Polymer Science*. – 1997. – V. 66. – P. 2233–2242.
21. Солодилов В. И., Шапагин А. В., Корохин Р. А., Горбаткина Ю. А. Влияние температуры отверждения на фазовые равновесия, морфологию, трещино- и ударостойкость эпоксиполисульфоновых смесей и армированных пластиков на их основе // *Сб. материалов Международной научно-практической конференции «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии»*. – 2019. – С. 691–702.
22. Shapagin A. V., Budylin N. Y., Chalykh A. E. Regulation of a phase structure at the interface in epoxy-polysulfone systems // *Russ. Chem. Bull.* – 2018. – V. 67. – P. 2172–2177.
23. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. – СПб.: НОТ, 2011. – 415 с.
24. Тарасевич Б. Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. – М.: Химический факультет МГУ, 2012. – 54 с.
25. Купцов А. Х., Жижин Г. Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. – М.: Техно-сфера, 2013. – 695 с.
26. Bellamy M. Using FTIR-ATR Spectroscopy to Teach the Internal Standard Method // *Journal of Chemical Education*. – 2010. – N 87. – P. 1399–1401.

УДК 621.791.92:621.78.08:621.039.534

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ТИПА 09X31H8AM2 НА ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

И. С. ГРИГОРЬЕВ¹, С. Н. ГАЛЯТКИН¹, канд. техн. наук, Е. А. ВАСИЛЬЕВА¹, В. М. КАРПОВ²

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 49. E-mail: npk6@crism.ru

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,
г. Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3

Поступила в редакцию 21.04.2025

После доработки 23.04.2025

Принята к публикации 30.04.2025

Приведены результаты исследования методом EBSD-анализа структуры металла износостойкой наплавки электродами типа 09X31H8AM2 в исходном состоянии после наплавки при различной скорости охлаждения. Рассмотрено влияние термической обработки на получаемое процентное соотношение γ/σ -фаз в наплавленном металле в зависимости от процентного соотношения α/γ -фаз в состоянии до термической обработки. Предложены пути повышения работоспособности металла, наплавленного материалами типа 09X31H8AM2, до температуры 350–400°C.

Ключевые слова: узлы пар трения, трубопроводная арматура, 09X31H8AM2, дуплексные стали, твердость, дилатометрические исследования, EBSD-анализ

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-173-183

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 59023.4–2020. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Требования к подогреву при сварке (наплавке).
2. Белов Ю. М., Красавчиков В. А. Новый материал для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры, работающей в агрессивных средах. – ЛДНТП, 1972. – 32 с.

3. ГОСТ Р 59023.1–2020. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Материалы, применяемые для выполнения сварных соединений и наплавов.

4. СТ ЦКБА 053–2008. Арматура трубопроводная. Наплавка и контроль качества наплавленных поверхностей. Технические требования.

5. НП-068–05. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования.

6. Кожин М. В., Кусков В. Н., Галинский А. А., Копысов Г. А. Применение спеченной ленты ЛС-09Х31Н8АМ2 в качестве антифрикционного материала подшипников насосов атомных реакторов и судовых установок Тюменский государственный нефтегазовый университет // Нефтегазовый терминал: сб. ст. Международной научно-технической конференции «Транспорт и хранение углеводородного сырья», Тюмень, 2015. Вып. 8. – С. 110–113.

7. Effect of Relative Plate Thickness in the Heat Flow and Cooling Rate during Welding of Super Duplex Stainless Steel / A. Vicente, A. B. Botelho Junior, D. E. R. Croce et al. // Saudi Journal of Engineering and Technology. – 2020. – V. 5 (5). – P. 244–250.

8. ГОСТ Р 59023.6–2020. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Наплавка уплотнительных и направляющих поверхностей.

9. Мусиенко А. Ю., Леонов В. П., Козлова И. Р., Петров С. Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в титановых сплавах с учетом микроструктуры и результатов измерений кристаллографических ориентировок методом EBSD-анализа // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 4 (92). – С. 219–234.

10. Karlsson L. Intermetallic phase precipitation in duplex stainless steels and weld metals metal-lurgy, influence on properties and welding aspects // Welding in the World. – 1999. – V. 43/5. – P. 20–40.

11. Charles J. The duplex stainless steels: materials to meet your needs // Proceedings of the Conference “Duplex stainless steels ‘91”, Beaune, 1991.

12. De Albuquerque Vicente A., Dos Santos I. L., Botelho Junior B., Croce D., Espinosa R., Tenório J. A. S. Study of the Distribution of Cr, Mo, Ni and N in δ Ferrite and Austenite in Duplex Stainless Steels // Saudi Journal of Engineering and Technology. – 2020. – V. 5 (4). – P. 156–162.

13. Topolska S., Łabanowski J. Effect of microstructure on impact toughness of duplex and superduplex stainless steels // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2009. – V. 36/2. – P. 142–149.

УДК 621.791.927.5:621.039.536.2

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗОНЫ СПЛАВЛЕНИЯ АНТИКОРРОЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО ИМПУЛЬСНОЙ АРГОНОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ, И СТАЛИ Cr–Mo–V

Г. Б. ФОМИН, Ю. М. МАРКОВА, И. А. МОРОЗОВСКАЯ, канд. техн. наук,
М. Н. ТИМОФЕЕВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 15.08.2025

После доработки 3.09.2025

Принята к публикации 11.09.2025

Приведены результаты металлографических исследований, измерений микротвердости и анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD-анализ) металла зоны сплавления антикоррозионного покрытия, выполненного импульсным аргонодуговым способом плавящимся электродом в смеси защитных газов, и теплоустойчивой Cr–Mo–V стали. Установлена взаимосвязь структуры металла поднаплавочной зоны и значений микротвердости с режимом термической обработки.

Ключевые слова: антикоррозионное покрытие, импульсная аргонодуговая наплавка, зона сплавления, теплоустойчивая сталь Cr–Mo–V, микроструктура, микротвердость, EBSD-анализ

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-184-195

© 2025

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструкционные материалы АЭС / Ю. Ф. Баландин, И. В. Горынин и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 280 с.
2. Цуканов В. В. Современные стали и технологии в энергомашиностроении. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2014. – 464 с.
3. Теплухина И. В., Богданов В. И., Зайцева О. Ю., Шамрай Е. Л., Цветков А. С. Исследование механических свойств и структуры металла крупногабаритной обечайки из стали типа 15Х2МФА // Металлург. – 2017. – № 9. – С. 71–77.
4. Ардентов В. В., Иванов К. М., Шаманин М. В. Исследование свойств зоны сплавления теплоустойчивой перлитной стали с аустенитным металлом шва различного состава. – Сварка: Сб. ст. Вып. 5. – Л.: Судпромгиз, 1962. – С. 60–72.
5. Каширский Ю. В., Дегтярев А. Ф., Меньшова Н. Ф. Свойства конструкционных материалов атомной промышленности. Справочник. Т. 1: Корпусные материалы для АЭС. – М.: ООО ИЦ «Филин», 2006. – 280 с.
6. Горынин И. В., Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Морозовская И. А. Антикоррозионная наплавка. Опыт применения и пути совершенствования // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2 (42). – С. 129–143.
7. Александров М. А., Бордученко Ю. Л. Перспективы атомного ледокольного флота по освоению Северного морского пути // Морской вестник. – 2021. – № 2 (78). – С. 17–23.
8. Каштанов А. Д., Теплухина И. В., Цветков А. С. Комплекс конструкционных материалов и технологий для корпусов реакторов перспективных АЭУ // Докл. международной конференции «Материалы и технологии для Арктики». Санкт-Петербург, 13–14 декабря 2017 г. – СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 2017. – С. 102–105.
9. Лебедев В. А., Жук Г. В., Лой С. А. Основные эксплуатационные характеристики сварного соединения и наплавленного слоя при электродуговой сварке-наплавке с импульсной подачей электродной проволоки // Тяжелое машиностроение. – 2021. – № 4. – С. 35–43.
10. Карасев М. В., Колодяжный Д. Ю., Федюкин С. В. Проблемы и перспективы импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе // Сварка и диагностика. – 2018. – № 5. – С. 60–62.
11. Морозовская И. А., Тимофеев М. Н., Фомин Г. Б., Котилло М. С. Исследование структуры и свойств наплавленного антикоррозионного покрытия оборудования судовых реакторных установок из Cr–Mo–V стали, выполненного импульсным аргонодуговым способом // Тяжелое машиностроение. – 2025. – № 3. – С. 2–10.

УДК 621.039.54:620.17

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ИСТИННОЙ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ПОСРЕДСТВОМ ИСПЫТАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ.

Часть 1. Анализ существующих и разработка нового метода

В. Н. ФОМЕНКО, канд. техн. наук, Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Ф. Л. ШИШКОВ
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 49. E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 25.02.2025

После доработки 10.04.2025

Принята к публикации 15.05.2025

В части первой настоящей работы выполнен анализ существующих методов определения механических свойств тонкостенных труб применительно к оболочкам ТВЭлов. Разработаны оптимальная геометрия кольцевого образца и схема испытаний, а также метод определения механических свойств и истинной диаграммы деформирования материала. Разработанный метод позволяет избежать характерного для стандартных испытаний влияния изгиба кольцевых образцов на определяемые свойства и учесть влияние трения между нагружающим устройством и образцом. Предложена экспериментальная процедура определения коэффициента трения.

© 2025

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

Ключевые слова: оболочки твэлов, механические свойства, схема испытаний, истинная диаграмма деформирования, метод исследования

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-196-209

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 10006–80. Трубы металлические. Метод испытаний на растяжение.
2. ГОСТ 19040–81. Трубы металлические. Метод испытания на растяжение при повышенных температурах.
3. ASTM E 8/E8M–09. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
4. ASTM E 21–09. Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials.
5. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
6. A model to describe the anisotropic viscoplastic mechanical behavior of fresh and irradiated Zircaloy-4 fuel claddings under RIA loading conditions / M. Le Saux, J. Besson, S. Carassou et al. // *Journal of nuclear materials*. – 2008. – V. 378. – P. 60–69.
7. Оборудование и методики послереакторных исследований материалов в комплексе защитных камер АО «ИРМ» / Л. П. Синельников, С. А. Аверин, А. В. Козлов и др. // *Атомная энергия*. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 187–194.
8. Josefsson B., Grigoriev V. Modified ring tensile testing and a new method for fracture toughness testing of irradiated cladding // *Studsvik material AB*. – 1996. – S-61182. – P. 10.
9. Arsene S., Bai J. A new approach to measuring transverse properties of structural tubing by a ring test // *Journal of testing and evaluation*. – 1996. – V. 24, N 6. – P. 386–391.
10. Cohen A. B., Majumdar S., Ruther W. E. Modified ring stretch tensile testing of Zr–1Nb cladding // Summary of paper for 25th Water Reactor Safety Information Meeting, NRC office of Nuclear Regulatory Research, Bethesda, Maryland, October 20–22, 1997.
11. Nagase F., Sugiyama T., Fuketa T. Optimized ring tensile test method and hydrogen effect on mechanical properties of Zircaloy cladding in hoop direction // *Journal of nuclear science and technology*. – 2009. – V. 46, N 6. – P. 545–552.
12. Samal M. K., Balakrishnan K. S., Parashar J., Tiwar G. P. Investigation of Deformation Behavior of Ring-Tensile Specimens Machined from Pressure Tubes of Indian PHWR // *Indian Institute of Metals*. – 2014. – V. 67, N 2. – P. 167–176.
13. Kazakeviciute J., Rouse J. P., De Focatiis D. S. A., Hyde C. J. The development of a novel technique for small ring specimen tensile testing // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2019. – V. 99, February. – P. 131–139.
14. Kiraly M., Antok D. M., Horvath L. Evaluation of axial and tangential ultimate tensile strength of zirconium cladding tubes // *Nuclear engineering and technology*. – 2018. – V. 50. – P. 425–431.
15. Nindiyasari F., Ter Pierick P., Boomstra D., Pandit A. Ring tensile test of reference Zircaloy cladding tube as a proof of principle for hotcell setup // *TopFuel-2018 Conf.*, Prague, September 30 – October 4, 2018. URL: <https://old.euronuclear.org/events/topfuel/topfuel2018/fullpapers/TopFuel2018-A0254-full-paper.pdf> (дата обращения 04.09.2025)
16. Kamerman D., Cappia F., Wheeler K. Development of axial and ring hoop tension testing methods for nuclear fuel cladding tubes // *Nuclear Materials and Energy*. – 2022. – V. 31. – P. 101175.
17. Определение предела текучести стали ЭК-181 при испытаниях на растяжение кольцевых образцов / М. В. Леонтьева-Смирнова, И. Н. Измалков, А. В. Костюхина и др. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2016. – Т. 82. – № 10. – С. 56–61.
18. СТО 086-288-2023. Оболочки облученных и необлученных твэлов. Выполнение измерений характеристик механических свойств при растяжении кольцевых образцов из тонкостенных труб из стали и сплавов, АО «ГНЦ НИИАР», Димитровград, 2023. – 13 с.
19. Improved evaluation of ring tensile test ductility applied to neutron irradiated 42XNM tubes in the temperature range of 500–1100°C / B. A. Gurovich et al. // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2020. – N 52(6). – P. 1213–1221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.11.019>

20. Frolov A. S., Fedotov I. V., Gurovich B. A. Evaluation of the true-strength characteristics for isotropic materials using ring tensile test // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – V. 53 (7). – P. 2323–2333. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.01.033>

21. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. Изд. 2-е / Пер с англ. / Под ред. Г. С. Шапиро. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

УДК 621.039.54:620.17

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ИСТИННОЙ ДИАГРАММЫ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ПОСРЕДСТВОМ ИСПЫТАНИЯ
КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ.**

Часть 2. Расчетная и экспериментальная верификация

В. Н. ФОМЕНКО, канд. техн. наук, Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Ф. Л. ШИШКОВ

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

Поступила в редакцию 25.02.2025

После доработки 10.04.2025

Принята к публикации 15.05.2025

Выполнена расчетно-экспериментальная верификация предложенного в первой части настоящей работы метода определения механических свойств и построения истинной диаграммы деформирования материалов оболочек твэлов на базе результатов испытаний кольцевых образцов и моделирования их деформирования методом конечных элементов. Представлены результаты испытаний разработанных кольцевых образцов из стали ЭП-823 (16X12МВСФБР) в исходном и облученном состояниях с использованием различных смазок и без смазки в широком диапазоне температур. На базе результатов этих испытаний определены механические свойства и истинные диаграммы деформирования стали ЭП-823.

Ключевые слова: оболочки твэлов, кольцевые образцы, механические свойства, истинная диаграмма деформирования, расчетно-экспериментальная верификация

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-210-226

ЛИТЕРАТУРА

1. Енохович А. С. Справочник по физике. – М.: Просвещение, 1978. – С. 85.
2. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Фоменко В. Н., Костылев В. И. Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 2. Развитие метода Unified Curve // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4 (88). – С. 151–178.

CONTENTS

METALS SCIENCE. METALLURGY

- Olenin M.I., Romanov O.N., Margolin B.Z., Sorokin A.A., Zernov E.A., Bushuev S.V., Berezhko B.I.[†], Shakhkhan S.A., Apinov Zh. E.* Influence of homogenization annealing on the processes of carbide formation in cast metal and forging from 10Kh16N20M2T steel..... 7
- Bobylyov E.E., Storozhenko I.D., Popov R.A.* Kinetics of formation of carbide-chromium coatings on structural steels obtained by complex chemical thermal treatment 21
- Sennikova L.F., Gangalo A. N., Tkachenko V.M., Volkova G. K., Glazunova V. A., Klimova E.Kh.* Effect of hydroextrusion on the structure and mechanical properties of copper M0b, pre-treated by equal-channel angular pressing 31
- Adaskin A. M., Butrim V. N., Kashirtsev V. V., Trushnikova A.S., Grebenyuk I. M.* Improving technological properties of alloys of the Ni–Cr system 38
- Ryndenkov D.V., Karyagin D.A., Smirnov M.O., Volkova E.N.* Zonal macrostructural heterogeneity of products of nickel-based superalloys manufactured by powder metallurgy and causes of its formation 49

FUNCTIONAL MATERIALS

- Angeluts A.A., Markov M.A., Novikov M.M., Shkurinov A.P., Cherebylo S.A.* Development and research of photopolymer ceramic pastes for stereolithographic additive manufacturing 58
- Burkov A.A., Konevtsov L.A., Bytsura A. Yu.* Deposition of metal-ceramic Ti–ZrB₂ coating on titanium alloy Ti–6Al–4V by electrospark alloying method using a non-localized electrode. 69
- Krasikov A.V., Merkulova M.V., Goshkoderya M.E.* Performance properties of Ni–W, Co–W and Ni–P–W coatings hardened by heat treatment..... 80
- Krasikov A.V., Merkulova M.V.* Technological features of electrodeposition of Ni–P coating from pyrophosphate and citrate electrolytes 89
- Kireev S.Yu., Kozlov G.V., Kireeva S.N., Yangurazova A.Z., Kirilina Yu.N., Balyberdin A.S.* Pulsed galvanostatic electrolysis modes for enhancing corrosion resistance of eco-friendly tin-zinc alloy coatings 97

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

- Tarasova P.N., Kapitonova Yu.V., Sivtseva-Gladkina N.P., Lazareva N.N., Okhlopko A.A., Kychkina Yu.V., Kanaeva A.A.* Structure and properties of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene and halloysite of different grades 108
- Negrov D.A., Putintsev V.Yu., Knyazev E.V., Glotov A.I., Weber D.A.* Influence of oscillatory process energy on the structure and properties of composite material 122
- Abakunova E.V., Struchkova T.S., Yarusova S.B., Danilova S.N., Panasenko A.E., Okhlopko A.A., Gordienko P.S.* Characteristics of composite materials based on PTFE and wollastonite from rice straw 136
- Sidorova S.A., Tyurina S.A., Rashutin N.A., Demin V. L., Shchelkov V.A.* Influence of the nature of the inert carrier on the efficiency of microencapsulation of a corrosion and scale inhibitor 145
- Artamonov E.A., Ryabukha K.N., Smyslova L.A.* Effect of silicon dioxide obtained by gas-phase and precipitation methods on the properties of unsaturated polyester resin 156
- Fedorov Yu.Yu., Shadrinov N.V.* Features of the influence of polysulfone on low-temperature impact viscosity of epoxy resin 164

WELDING, WELDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES

- Grigoriev I.S., Galiatkin S.N., Vasilieva E.A., Karpov V.M.* Study of the influence of heat treatment and thermokinetic cooling conditions of deposited metal Fe0.09C31Cr8Ni2Mo on the formation of its phase composition 173

Fomin G.B., Markova Yu.M., Morozovskaya I.A., Timofeev M.N. Influence of heat treatment on the structure and properties of the fusion zone of anti-corrosion coating made by pulse argon arc surfacing and Cr–Mo–V steel..... 184

STRUCTURAL INTEGRITY AND SERVICEABILITY OF MATERIALS

Fomenko V.N., Margolin B.Z., Shishkov F.L. A method of determination of mechanical properties and true stress-strain curve for fuel cladding material by ring specimens testing. Part 1. Analysis of existing methods and development of new ones..... 196

Fomenko V.N., Margolin B.Z., Shishkov F.L. A method of determination of mechanical properties and true stress-strain curve for fuel cladding material by ring specimens testing. Part 2. Numerical and experimental verification 210

Guidelines for authors of the scientific and technical journal “Voprosy Materialovedeniya”. Manuscript requirements 227

UDC 669.15–194.56:621.785.3

INFLUENCE OF HOMOGENIZATION ANNEALING ON THE PROCESSES OF CARBIDE FORMATION IN CAST METAL AND FORGING FROM 10Kh16N20M2T STEEL

M.I. OLENIN, Dr Sc. (Eng), O.N. ROMANOV, Cand Sc. (Eng), B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), A.A. SOROKIN, Cand Sc. (Eng), E.A. ZERNOV, S.V. BUSHUEV, B.I. BEREZHKO[†], Cand Sc. (Eng), S.A. SHAKHKYAN, Zh. E. APINOV

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

Received April 11, 2025

Revised September 11, 2025

Accepted September 17, 2025

Abstract—Experimental data on increase of plastic properties in forging from austenitic class steel of 10Kh16N20M2T grade are given. It is established that the increase of plastic properties practically without change of strength properties is influenced by homogenization annealing carried out at the temperature of 1250°C with 40 hours exposure time, providing dissolution of carbides, carbonitrides and titanium nitrides.

Keywords: homogenization annealing, austenitic class steels, carbide dissolution, metal pressure treatment, deformation, steel casting, metal of large-size forgings, mechanical properties of steel, carbides and carbonitrides

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-7-20

REFERENCES

1. *Stali i splavy energeticheskogo oborudovaniya* [Steels and alloys of power equipment]: reference book, Ryzhov S. B. (Ed.), Moscow: Mashinostroenie, 2008.
2. Beskorovainy, N.M., Kalin, B.A., Platonov, P.A., Chernov, I.I., *Konstruktsionnye materialy yadernykh reaktorov* [Structural materials of nuclear reactors]: study guide for universities, Moscow: Energoatomizdat, 1995.
3. Dobrynina, M.V., Filimonov, G.N., Pavlov, V.N., Vliyanie rezhima okonchatelnoi obrabotki na strukturu goryachedeformirovannoy austenitnoy stali marki 08Kh18N10T [The influence of the final processing mode on the structure of hot-deformed austenitic steel grade 08Kh18N10T], *Voprosy materialovedeniya*, 2012, No 2 (70), pp. 25–32.
4. Dzugutov, M.Ya., *Plasticheskaya deformatsiya vysokolegirovannykh staley i spлавov* [Plastic deformation of high-alloy steels and alloys], 2nd ed., Moscow: Metallurgiya, 1977.
5. Onishchenko, A.K., Beklemishchev, N.N., *Teoriya promyshlennoi kovki stali i spлавov* [Theory of industrial forging of steel and alloys], Moscow: Sputnik, 2011.
6. Onishchenko, A.K., Megaplasticheskaya deformatsiya i optimalnaya velichina ukova slitkov [Megaplastic deformation and the optimal value of the ingot binding], *Tekhnologiya metallov*, 2006, No 10, pp. 12–15.

7. Okhrimenko, Ya.M., Tyurin, V.A., *Teoriya protsessov kovki slitkov na pressakh* [Theory of ingot forging processes on presses], Moscow: Mashinostroyeniye, 1979.
8. Volkov, S.E., Volkov, A.E., Zabaluev, Yu.I., Buryakovskiy, G.A., *Nemetallicheskie vklyucheniya i defekty v elektroshlakovom slitke* [Non-metallic inclusions and defects in electroslag ingot], Moscow: Metallurgiya, 1979.
9. Lebedev, A.G., Dub, V.S., Gudenko, A.S., Zmienko, D.S., Kor-neev, A.E., *Vozmozhnost upravleniya kharakteristikami vklucheniya nitridov i karbonitridov v nizkouglerodistoi austenitnoi stali* [The ability to control the characteristics of nitride and carbonitride inclusions in low carbon austenitic steel], *Elektrometallurgiya*, 2012, No 1, pp. 24–29.
10. Novikov, I.I., *Teoriya termicheskoi obrabotki metallov* [Theory of heat treatment of metals]: study guide for universities, 4th ed., Moscow: Metallurgiya, 1986.
11. Parshin, A.M., *Struktura, prochnost i plastichnost nerzhavayushchikh i zharoprochnykh staley i spлавov, primenyaemykh v sudostroyenii* [Structure, strength and ductility of stainless and heat-resistant steels and alloys used in shipbuilding], Leningrad: Sudostroyeniye, 1972.
12. Gorelik, S.S., Rastorguev, L.N., Skakov, Yu.N., *Rentgenostrukturnyy analiz* [X-ray diffraction analysis], Moscow: Metallurgiya, 1970.
13. Gorynin, V.I., Olenin, M.I., *Puti povysheniya khladostoikosti staley i svarnykh soedineniy* [Ways to improve the cold resistance of steels and welded joints], St Petersburg: TsNII KM "Prometey", 2017.
14. Semenov, E.I., *Kovka i obimnaya shtampovka* [Forging and volumetric stamping]: study guide for universities, Moscow: Vysshaya shkola, 1972.

UDC 621.785.5:621.793.6

KINETICS OF FORMATION OF CARBIDE-CHROMIUM COATINGS ON STRUCTURAL STEELS OBTAINED BY COMPLEX CHEMICAL THERMAL TREATMENT

E.E. BOBYLYOV, Cand Sc. (Eng), I.D. STOROZHENKO, R.A. POPOV

Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya St, 350072 Krasnodar Region, Krasnodar, Russian Federation. E-mail: ebobylev@mail.ru

Received March 5, 2025

Revised April 3, 2025

Accepted April 11, 2025

Abstract—The paper considers the kinetics of formation of coatings based on chromium carbides obtained by the technology of complex chemical thermal treatment (CTT) on steels St3, 40Kh, 40Kh13, 12Kh18N10T. CTT consisted in preliminary cementation in vacuum and subsequent diffusion alloying with chromium in the medium of fusible liquid metal solutions (DALMS). As a result of the research, it was found that the concentration of chromium on the surface of the coated samples, the coating thickness and chromium distribution, the phase composition of the coatings were influenced by the material grade, temperature and duration of DALMS. The coatings consisted of Cr_7C_3 carbides or $\text{Cr}_7\text{C}_3 + \text{Cr}_{23}\text{C}_6$. The release of Cr_{23}C_6 chromium carbides was observed at DALMS temperatures of 1050°C and 1070°C in the range of 180 to 480 minutes.

Keywords: steel, chemical-thermal treatment, coating, diffusion, kinetics, carbide, chromium

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-21-30

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their gratitude to Professor M.I. Olenin, Dr of Sc (Eng), for assistance in preparing the article.

REFERENCES

1. Sokolova, I.S., Oborin, A.V., Porozova, S.E., *Modifitsirovanie poverkhnosti staley, primenyaemykh v armaturostroyenii* [Modification of the surface of steels used in reinforcement engineering], *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya*, 2024, No 18 (4), pp. 83–90. URL: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-4-83-90>
2. Krasikov, A.V., Merkulova, M.V., Mikhailov, M.S., Petrov, S.N., *Nanostruktura galvanicheskikh pokrytiy Ni–W, otozhzhennykh pri razlichnykh temperaturakh* [Nanostructure of Ni–W electroplated coatings, deposited at different temperatures], *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya*, 2024, No 18 (4), pp. 91–96. URL: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-4-91-96>

coatings annealed at various temperatures], *Voprosy Materialovedeniya*, 2024, No 2 (118), pp. 46–54. URL: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2024-118-2-46-54>

3. Kolubaev, A.V., Sizova, O.V., Struktura i svoystva pokrytiy, poluchennykh sposobom gazotermicheskogo napyleniya [Structure and properties of coatings obtained by gas thermal spraying], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2024, No 67 (6), pp. 710–715. URL: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-710-715>

4. Yang, K., Chen, C., Xu, G., Jiang, Z., Zhang, S., Liu, X., HVOF sprayed Ni–Mo coatings improved by annealing treatment: Microstructure characterization, corrosion resistance to HCl and corrosion mechanisms, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, V. 19, pp. 1906–1921. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.181

5. Liang, J., Liu, Y., Yang, Sh., Yin, X., Chen, S., Liu, Ch., Microstructure and wear resistance of laser cladding Ti–Al–Ni–Si composite coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2022, V. 445, p. 128727. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128727

6. Dervishi, E., McBride, M., Edwards, R., Gutierrez, M., Li, N., Buntyn, R., Hooks, D.E., Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions, *Surface and Coatings Technology*, 2022, V. 444, p. 128652. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128652

7. Bathini, L., Prasad, M.J.N.V., Wasekar, N.P., Development of continuous compositional gradient Ni–W coatings utilizing electrodeposition for superior wear resistance under sliding contact, *Surface and Coatings Technology*, 2022, V. 445, p. 128728. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128728

8. Kitaev, N.I., Pichkhidze, S.Ya., Razrabotka resursosberegayushchei tekhnologii diffuzionnogo khromirovaniya poverkhnostnogo sloya stali 12KhN3A pri vysokotemperaturnom mikrodugovom vozdeistvii [Development of a resource-saving technology for diffusion chrome plating of the surface layer of 12KhN3A steel under high-temperature microarc action], *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2024, No 8, pp. 22–28. DOI: 10.34641/TM.2024.266.8.052

9. Yulmetova, O.S., Shcherbak, A.G., Fomichev, A.M., Novikov, V.I., Tekhnologicheskie aspekty protsessa formirovaniya funktsionalnykh tonkoplechnykh pokrytiy na uzlakh pretsizionnykh priborov [Technological aspects of the process of forming functional thin-film coatings on precision instrument assemblies], *Metalloobrabotka*, 2023, No 3 (135), pp. 67–76.

10. Pashkov, M.V., Khisamutdinov, R.M., Tekhnologicheskie resheniya po naneseniyu spetsialnykh pokrytiy dlya povysheniya iznosostoikosti detalei i uzlov mashin [Technological solutions for applying special coatings to increase the wear resistance of machine parts and assemblies], *Polzunovsky vestnik*, 2024, No 3, pp. 223–227. URL: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.032>

11. Zhang, M., Shi, X., Li, Z., Xu, H., Enhanced corrosion and wear resistance of gradient graphene–CrC nanocomposite coating on stainless steel, *Carbon*, 2021, V. 174, pp. 693–709. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.12.007

12. Wang, D., Lin, S., Zhen Y., Yin, Z., Ye, F., Gao, X., Qiao, Y., Xue, Y., Yang, H., Zhou, K., Failure mechanisms of CrN and CrAlN coatings for solid particle erosion resistance, *Vacuum*, 2022, V. 204 (3), p. 111313. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111313

13. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem* [Diagrams of the state of double metal systems]: reference book, N. P. Lyakishev (Ed.), V. 1, Moscow: Mashinostroenie, 1997.

14. Li, Q., Song, P., Zhang, R., Li, Zh., Wang, Yu, Du, P., Lu, J., Oxidation behavior and Cr–Zr diffusion of Cr coatings prepared by atmospheric plasma spraying on zircaloy-4 cladding in steam at 1300 C, *Corrosion Science*, 2022, V. 203, p. 110378. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110378

15. Sahu, J.N., Sasikumar, C., Development of hard and wear resistant surface coating on Ni–Cr–Mo steel by surface mechano-chemical carburization treatment (SMCT), *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, V. 263, pp. 285–295. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.027

16. Nurakov, S., Belotserkovsky, M., Suleimenov, T., Aitlessov, K., Application of chemical-thermal treatment for hardening of sprayed with supersonic coatings, *Procedia Computer Science*, 2019, V. 149, pp. 360–364. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.149

17. Lakhtin, Yu.M., Arzamasov, B.N., *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical and thermal treatment of metals]: study guide, Moscow: Metallurgiya, 1985.

18. Meissner, T.M., Oskay, C., Bonk, A., Grégoire, B., Donchev, A., Solimani, A., Galetz, M.C., Improving the corrosion resistance of ferritic-martensitic steels at 600°C in molten solar salt via diffusion coatings, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, V. 227, p. 111105. DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111105
19. Pryakhin, E.I., Mikhailov, A.V., Sivenkov, A.V., Tekhnologicheskie osobennosti poverkhnostnogo legirovaniya metallicheskih izdeliy Cr-Ni-kompleksami v srede rasplavov legkoplavkikh metallov [Technological features of surface alloying of metal products with Kr-Ni complexes in the environment of low-melting metal melts], *Chernye metally*, 2023, No 2, pp. 58–66
20. Sokolov, A.G., Boblyov, E.E., Popov, R.A., Osobennosti formirovaniya diffuzionnykh pokrytiy, poluchennykh kompleksnoi khimiko-termicheskoi obrabotkoi konstruktsionnykh stalei [Features of the formation of diffusion coatings obtained by complex chemical and thermal treatment of structural steels], *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2023, No 25 (1), pp. 98–109. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-98-109
21. Sokolov, A.G., Boblyov, E.E., Features and regularities in formation of diffusion nickel-copper coatings on steels in the medium of low-melting liquid-metal solutions, *CIS Iron and Steel Review*, 2022, V. 23, pp. 56–60. DOI: 10.17580/cisr.2022.01.11
22. Boblyov, E.E., Storozhenko, I.D., Influence of Diffusion Alloying of Steel 20 in Medium of Low-Melting Liquid Metal Solutions by Elements of Ni–Cu System on Elemental Composition and Properties of Surface Layers, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2024, V. 15, pp. 964–967. URL: <https://doi.org/10.1134/S2075113324700461>
23. Sokolov, A.G., Bobylev, E.E., Storozhenko, I.D., Mechanism and Peculiarities of Formation of Diffusion Coatings Based on Carbide-Forming Elements on Steel Surfaces in the Medium of Fusible Liquid-Metal Solutions, *Steel Translation*, 2023, V. 53, pp. 37–41. URL: <https://doi.org/10.3103/S0967091223010114>
24. Sokolov, A.G., Boblyov, E.E., Marchenko, V.D., Vliyanie kompleksnoi khimiko-termicheskoi obrabotki na korrozionnyu stoikost stalnykh izdeliy [The effect of complex chemical and thermal treatment on the corrosion resistance of steel products], *Polzunovsky vestnik*, 2023, No 3, pp. 238–244. URL: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.32>
25. Sokolov, A.G., Boblyov, E.E., Storozhenko, I.D., Popov, R.A., *Ustroistvo dlya diffuzionnoi metallizatsii v srede legkoplavkikh zhidkometallicheskih rastvorov* [Device for diffusion metallization in low-melting liquid metal solutions]: patent RU No 2767108, 2022.

UDC 669.3:621.77.016.2

EFFECT OF HYDROEXTRUSION ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COPPER M0b, PRE-TREATED BY EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING

L.F. SENNIKOVA, Cand Sc. (Eng), A.N. GANGALO, Cand Sc. (Eng),
V.M. TKACHENKO, Cand Sc. (Eng), G.K. VOLKOVA, V.A. GLAZUNOVA, E.Kh. KLIMOVA
*Donetsk Institute of Physics and Technology named after A.A. Galkin, 72 R. Luxemburg St,
283114 Donetsk, DPR, Russian Federation. E-mail: al-gangalo@yandex.ru*

Received February 24, 2025

Revised May 29, 2025

Accepted May 31, 2025

Abstract—The patterns of the formation of submicrocrystalline structure of the grain type and copper properties under conditions of intensive plastic deformation and subsequent processing of hydroextrusion with varying degrees of deformation have been studied. It was established that with an increase in the degree of single-stage hydroextrusion to $\varepsilon = 1.2$, the strength level of copper M0b does not increase compared to its strength after equal-channel angular pressing. This indicates the beginning of the return processes and dynamic recrystallization of the material, which is confirmed by structural studies using electron microscopy and radiographic analysis.

Keywords: copper, equal channel angular pressing, hydrostatic extrusion, submicrocrystalline structure, mechanical properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-31-37

REFERENCES

1. Volokitina, I.E., Volokitin, A.V., Evolyutsiya mikrostruktury i mekhanicheskikh svoystv medi v protsesse pressovanie – volochenie [Evolution of the microstructure and mechanical properties of copper during the pressing-drawing process], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2018, No 119 (9), pp. 971–976.
2. Lezhnev, S.N., Volokitina, I.E., Panin, E.A., Volokitin, A.V., Evolyutsiya mikro-struktury i mekhanicheskikh svoystv medi pri realizatsii sovmeshchennogo protsessa prokatka – RKU-pressovanie [Evolution of the microstructure and mechanical properties of copper during the combined rolling-ECA-pressing process], *Fizika metallov i metallovedenie*, 2020, No 121 (7), pp. 757–762.
3. Ivanov, A.M., Kombinirovaniye metodov deformatsionnoi obrabotki materialov [Combining methods of deformation processing of materials], *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, V. 10, No 83.
4. Ivanov, A.M., Uprochnenie nizkolegirovannoi stali kombinirovaniem ekstruzii vintovogo i ravnokanalnogo pressovaniy [Hardening of low-alloy steel by combining screw extrusion and equal-channel pressing], *Vestnik mashinostroeniya*, 2017, No 2.
5. Nugmanov, D.P., Sitdikov, O.Sh., Markushev, M.V., Povedenie vtorykh faz v magnievom splave MA14 pri vsestoronnei izotermicheskoi kovke i posleduyushchei izotermicheskoi prokatke [Behavior of second phases in magnesium alloy MA14 during comprehensive isothermal forging and subsequent isothermal rolling], *Materials Letters*, 2017, V. 7, No 2, pp. 198–202.
6. Sennikova, L.F., Gangalo, A.N., Volkova, G.K., Klimova, E.H., Zakonomernosti formirovaniya mikrostruktury i mekhanicheskikh svoystv medi M1 v usloviyakh kombinirovannoi plasticheskoi deformatsii [Patterns of microstructure formation and mechanical properties of M1 copper under conditions of combined plastic deformation], *Voprosy materialovedeniya*, 2023, No 4 (116), pp. 50–56.
7. Valiev, R.Z., Zhilyaev, A.P., Lengdon, T.G., *Obiemnye nanostrukturnye materialy: fundamentalnye osnovy primeneniya* [Bulk Nanostructured Materials: Fundamental Principles of Application], St Petersburg: Eko-Vektor, 2017.
8. Rusakov, A.A., *Rentgenografiya metallov* [Radiography of metals], Moscow: Atomizdat, 1977.
9. Utyashev, F.Z., Raab, G.I., Valitov, V.A., *Deformatsionnoe nanostrukturirovaniye metallov i splavov* [Deformational Nanostructuring of Metals and Alloys], St Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2020.
10. Trefilov, V.I., *Deformatsionnoe uprochnenie i razrushenie polikristallicheskikh metallov* [Deformational hardening and fracture of polycrystalline metals], Kiev: Naukova dumka, 1989.
11. Rogachev, S.O., Zemlyakova, N.V., Osobennosti rekristallizatsii medi v protsesse intensivnoi plasticheskoi deformatsii pri komnatnoi temperature [Features of copper recrystallization during intensive plastic deformation at room temperature], *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2024, No 173.
12. Gorelik, S.S., *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys], Moscow: MISiS, 2005.
13. Polukhin, P.I., Gorelik, S.S., Vorontsov, V.K., *Fizicheskie osnovy plasticheskoi deformatsii* [Physical foundations of plastic deformation], Moscow: Metallurgiya, 1982.
14. Umansky, Ya.S., Skakov, Yu.A., Ivanov, A.N., Rastorguev, L.N., *Kristallografiya, Rentgenografiya i elektronnaya mikroskopiya* [Crystallography, X-ray diffraction, and electron microscopy], Moscow: Metallurgiya, 1982.

UDC 669.2426:669.018.44

IMPROVING TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF ALLOYS OF THE Ni–Cr SYSTEM

A.M. ADASKIN¹, Cand Sc. (Eng), V.N. BUTRIM², Dr Sc. (Eng), V.V. KASHIRTSEV², Cand Sc. (Eng),
A.S. TRUSHNIKOVA², Cand Sc. (Eng), I.M. GREBENYUK²

¹ Moscow State Technological University STANKIN, 3A Vadkovsky Lane, Bld 1,
127055 Moscow, Russian Federation

² JSC COMPOSIT, 4 Pionerskaya St, 141070 Korolev, Moscow Region, Russian Federation.
E-mail: vbutrim@kompozit-mv.ru

Received March 14, 2025

Revised May 7, 2025

Accepted May 12, 2025

Abstract—A heat treatment regime has been justified and developed that reduces the hardness of the Cr–33Ni–W–V–Ti alloy and improves its machinability by cutting. The influence of the composition of the Cr–50Ni–W–Mo–Ti–Nb–Al alloy on cold plasticity are established. It has been shown that an increase in ductility is achieved with a lower content of elements forming the α -phase with a bcc lattice and the strengthening phases Ni_3Ti and Ni_3Al .

Keywords: alloys of the Cr–Ni system, chromium-based, nickel-based, machinability, cold ductility

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-38-48

REFERENCES

1. Maslenkov, S.B., *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant Steels and Alloys]: Handbook, Moscow: Metallurgiya, 1988.
2. Khimushin, F.F., *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-Resistant Steels and Alloys], 2nd Ed., Moscow: Metallurgiya, 1969.
3. Adaskin, A.M., Butrim, V.N., Saponov, I.Yu., Fazovye prevrashcheniya, struktura i svoystva splava Kh65NVFT na osnove khroma [Phase transformations, structure, and properties of the chromium-based alloy Kh65NVFT], *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, 2013, V. 35, No 11, pp. 1001–1012.
4. Butrim, V.N., Sovershenstvovanie khromonikelevykh splavov dlya kosmicheskoi tekhniki [Improvement of chromium-nickel alloys for space technology], *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2017, No 2, pp. 26–38.
5. Adaskin, A.M., Butrim, V.N. Vereshchaka, A.S., Kashirtsev, V.V., Kirillov, A.K., Obrabatyvaemost rezaniem zharoprochnogo splava Kh65NVFT na osnove khroma [Machinability of the chromium-based heat-resistant alloy Kh65NVFT], *STIN*, 2013, No 7, pp. 36–40.
6. Armarego, I.Dzh.A., Braun, R.H., *Obrabotka metallov rezaniem* [Metal cutting], Moscow: Mashinostroenie, 1977.
7. Mc Linn, D., *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals], Moscow: Metallurgiya, 1965.
8. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskiykh sistem* [State diagrams of double metal systems], N.P. Lyakisheva (Ed.), Moscow: Mashinostroenie, 1996. V. 2.
9. Hall, E.O., Variation of hardness of metals with grain size, *Nature*, 1954, V. 173, No 11.
10. Khrushchov, M.M. *Trenie, iznos i mikrotverdost materialov* [Friction, wear, and microhardness of materials]: Selected works, Moscow: Krassand, 2012.
11. Adaskin, A.M., Butrim, V.N., Kubatkin, V.S., Saponov, I.Yu., Vliyanie rezhima termicheskoi obrabotki na zharostoikost splava na osnove khroma pri vysokotemperaturnom okislenii na vozdukh [Effect of heat treatment mode on the heat resistance of a chromium-based alloy during high-temperature oxidation in air], *Voprosy materialovedeniya*, 2016, No 4 (88), pp. 18–28.
12. Adaskin, A.M., Butrim, V.N., Kubatkin, V.S., Saponov, I.Yu., Krivye deformatsionnogo uprochneniya i mekhanicheskie svoystva zharoprochnogo splava na osnove khroma v zavisimosti ot termicheskoi obrabotki i temperatury ispytaniy [Deformation hardening curves and mechanical properties of a chromium-based heat-resistant alloy, depending on heat treatment and test temperature], *MiTOM*, 2015, No 10, pp. 50–56.
13. Arzamasov, B.N., Makarova, V.I., Mukhin, G.G., et al., *Materialovedenie* [Materials Science], Moscow: MGTU im. Bauman, 2011.
14. *Spravochnik po mashinostroitelnykh materialam* [Handbook of Engineering Materials], V.G. Vorobiev, Yu.M. Lakhtin, A.G. Rakhshadt (Eds.), Moscow: Izd-vo mashinostroitelnoi literatury, 1959.
15. Maslenkov, S.B., *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant steels and alloys]: Handbook, Moscow: Metallurgiya, 1988.
16. Novikov, I.I., *Teoriya termicheskoi obrabotki metallov* [Theory of heat treatment of metals], Moscow: Metallurgiya, 1974.

**ZONAL MACROSTRUCTURAL HETEROGENEITY OF PRODUCTS OF NICKEL BASED
SUPERALLOYS MANUFACTURED BY POWDER METALLURGY AND CAUSES
OF ITS FORMATION**

D.V. RYNDENKOV, Cand Sc. (Eng), D.A. KARYAGIN, M.O. SMIRNOV, Cand Sc. (Eng),
E.N. VOLKOVA

*Stupino Metallurgical Company (JSC CMK), 2 Pristanitsionnaya St, 142800 Stupino, Moscow Region,
Russian Federation, E-mail: info@cmk-group.ru*

Received January 22, 2025

Revised May 16, 2025

Accepted May 20, 2025

Abstract—In the macrostructure of products manufactured from powder obtained by the PREP (Plasma Rotating Electrode Process) method, when conducting macrostructure control, it is sometimes possible to observe zones of different etchability. Studying the microstructure in the zone containing both light and dark areas showed that in terms of grain size and shape it is typical for products manufactured by the powder metallurgy method, however, grains from dark areas have clearly defined boundaries due to the increased content of carbides. Additional carbides are formed during the coking of sublimates at the stage of gas-static treatment. The finished product inherits zonal heterogeneity caused by a gradual increase in the amount of sublimates of lubricants in the atmosphere of the spray chamber.

Keywords: powder metallurgy, PREP (Plasma Rotating Electrode Process), defects, heterogeneity, macrostructure, nickel superalloys

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-49-57

REFERENCES

1. Belov, A.F., Anoshkin, N.F., Fatkullin, O.H., *Struktura i svoistva granuliruemykh nikelevykh splavov* [Structure and properties of granulated nickel alloys], Moscow: Metallurgiya, 1984.
2. Anoshkin, N.F., Nekotorye aspekty kachestva zharoprochnykh i vysokoprochnykh materialov, izgotavlivaemykh metodom metallurgii granul [Some aspects of the quality of heat-resistant and high-strength materials produced by powder metallurgy], *Metallurgiya granul*, Moscow: VILS, 1986, Is. 3.
3. Koshelev, V.Ya., Garibov, G.S., Sukhov, D.I., Osnovnye zakonomernosti protsessa polucheniya granul zharoprochnykh splavov metodom plazmennogo raspyleniya vrashchayushcheisya zagotovki [Basic patterns of the process of obtaining granules of heat-resistant alloys by plasma spraying of a rotating work-piece], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2015, No 3, pp. 97–103.
4. Volkov, A.M., Shestakova, A.A., Bakradze, M.M., Sravnenie granul, poluchennykh metodami gazovoi atomizatsii i tsentrobezhnogo raspyleniya litykh zagotovok, s tochki zreniya primeneniya ikh dlya izgotovleniya diskov GTD iz zharoprochnykh nikelevykh splavov [Comparison of granules obtained by gas atomization and centrifugal spraying of cast billets for gas turbine disks made of heat-resistant nickel alloys], *Trudy VIAM*, 2018, No 11, pp. 12–19.
5. Garibov, G.S., Grints, N.M., Evolyutsiya kharakteristik granuliruemykh splavov dlya aviadvigateli [Evolution of the characteristics of granulated alloys for aircraft engines], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2013, No 44, pp. 106–112.
6. Ryndenkov, D.V., Rybantsova, E.N., O formirovani granuly s ostatkami litoi struktury v kompaktnykh iz zharoprochnykh Ni-splavov [On the formation of granules with remnants of the cast structure in compacts made of heat-resistant Ni alloys], *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2016, No 4, pp. 43–47.
7. Zenkov, R.L., Grinevich, G.P., Isaev, V.S., *Bunkernye ustroystva* [Bunker devices], Moscow: Mashinostroenie, 1977.
8. Khodkin, V.I., Tararyshkina, T.L., Vliyanie rezhimov zapolneniya kapsul granulami na segregatsiyu po ikh krupnosti [The effect of capsule filling modes on granule segregation based on their size], *Metallurgiya granul*, Moscow: VILS, 1983, Is. 1.
9. Eshuis, P., Van der Weele, K., Van der Meer, D., Lohse, D., Gra-nular Leidenfrost Effect: Experiment and Theory of Floating Particle Clusters, *Phys. Rev. Lett.*, 2005, V. 95, p. 258001. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.95.258001>

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF PHOTOPOLYMER CERAMIC PASTES
FOR STEREOLITHOGRAPHIC ADDITIVE MANUFACTURING**

A.A. ANGELUTS², M.A. MARKOV¹, M.M. NOVIKOV¹, A.P. SHKURINOV^{1,2}, S.A. CHEREBYLO¹

¹ National Research Center "Kurchatov Institute", 1 Akademika Kurchatova Sq, 123182 Moscow, Russian Federation. E-mail: novikov@rambler.ru

² Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, 119234 Moscow, Russian Federation

Received October 9, 2024

Revised April 14, 2025

Accepted April 16, 2025

Abstract—The paper studies properties of a suspension with aluminum oxide powders in a photopolymer composition developed for laser stereolithography. It is shown that the modified photopolymer IPLIT4 is the optimal choice in the manufacture of suspensions for the additive manufacturing of ceramic parts by stereolithography. Pastes with a ceramic filler content of 72% by weight were obtained. The possibilities of terahertz diagnostics of polymer ceramic and ceramic materials at different stages of the production process are demonstrated.

Keywords: additive manufacturing, stereolithography, photopolymerization, ceramics, photopolymer suspension

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-58-68

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out within the framework of the state assignment of the National Research Center "Kurchatov Institute".

REFERENCES

1. Zakeri, S., Vippola, M., Levänen, E., A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography, *Additive Manufacturing*, 2020, V. 35, p. 101177. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101177>
2. Patent RU 2685211: *Zhidkaya fotopolimerizuyushchayasya kompozitsiya dlya lazernoi stereolitografii* [Liquid photopolymerizable composition for laser stereolithography], Gurevich, Ya.M., Markov, M.A., Nikitin, A.N., et al., Publ. 16.04.2019.
3. Khoder, V.B., Kordikova, E.I., Dyakova, G.N., Napolnennye fotopolimernye kompozitsii dlya 3D-pechati metodom stereolitografii [Filled photopolymer compositions for 3D printing using stereolithography]: review, *Trudy BGTU: Ser. 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoekologiya*, 2022, No 1 (253), pp. 27–32.
4. Bove, A., Calignano, F., Galati, M., Iuliano, L., Photopolymerization of Ceramic Resins by Stereolithography Process: A Review, *Appl. Sci.*, 2022, No 12 (7), p. 3591. URL: <https://doi.org/10.3390/appl12073591>
5. Liu, G., Yan, C., Zhang, K., Jin, H., He, R., Effect of Solid Loading on the Property of Al₂O₃ Ceramics in Stereolithographic Additive Manufacturing, *Journal of Inorganic Materials*, 2022, V. 37, No 3, pp. 353–360. DOI: 10.15541/jim20210636
6. Azarmi, F., Sevostianov, I., Evolution of thermo-mechanical properties in the process of alumina manufacturing using laser stereolithography technique, *International Journal of Engineering Science*, 2019, V. 144, p. 103125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2019.103125>
7. Lakhdar, Y., Tuck, C., Binner, J., Terry, A., Goodridge, R., Additive manufacturing of advanced ceramic materials, *Progress in Materials Science*, 2021, V. 116, p. 100736. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100736>
8. De Camargo, I.L., et al., A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization, *Ceram. Int.*, 2021, V. 47 (80), pp. 11906–11921. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.031>
9. Ermakova, L.V., et al. Vliyanie akrilatnogo monomera na kharakteristiki fotopolimerizuemyi suspenzij dlya polucheniya keramiki iz stabilizirovannogo ZrO₂ [Description of acrylate monomer based on the

characteristics of photopolymerization of a suspension for the production of stabilized ZrO₂ ceramics], *Steklo i keramika*, 2022, No 10, pp. 3–10.

10. Sokolov, P.S., et al., Rheological properties of zirconium oxide suspensions in acrylate monomers for use in 3D printing, *Glass Ceram.*, 2018, V. 75, pp. 55–59. URL: <https://doi.org/10.1007/s10717-018-0028-3>

11. Schmidleithner, C., Kalaskar, D., 3D-printing. Ch. 1: Stereolithography, Cvetković D. (Ed.), London: IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.78147

12. Kamaev, S.V., Markov, M.A., Nikitin, A.N., Novikov, M.M., Lazernaya stereolitografiya: sostoyanie i perspektivy [Laser Stereolithography: Status and Prospects], *Additivnye tekhnologii*, 2018, No 4, pp. 44–48.

13. Halloran, J.W., Ceramic Stereolithography: Additive Manufacturing for Ceramics by Photopolymerization, *Annual Review of Materials Research*, 2016, V. 46, pp. 19–40. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-031841>

14. Schwentenwein M., et al., Lithography-based ceramic manufacturing: a novel technique for additive manufacturing of high-performance ceramics, *Advances in Science and Technology*, 2014, V. 88, pp. 60–64.

UDC 621.762.34:621.793.6

DEPOSITION OF METAL-CERAMIC Ti–ZrB₂ COATING ON TITANIUM ALLOY Ti–6Al–4V BY ELECTROSPARK ALLOYING METHOD USING A NON-LOCALIZED ELECTRODE

A.A. BURKOV, Cand Sc. (Phys-Math), L.A. KONEVTSOV, Cand Sc. (Eng), A.Yu. BYTSURA

Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 153 Tikhoookeanskaya St, 680042 Khabarovsk, Russian Federation. E-mail: alex_btsr@mail.ru

Received January 26, 2025

Revised April 14, 2025

Accepted April 16, 2025

Abstract—Ti–ZrB₂ coatings on titanium alloy Ti–6Al–4V were prepared by the method of electrospark deposition with a non-localized electrode, using titanium granules and ZrB₂ powder. It was found that the structure of the coatings corresponds to a metal-ceramic material, where α-Ti and β-Ti act as a metal matrix, and ZrB₂ is a reinforcing phase. The concentration of ZrB₂ in coatings was in the range from 38 to 92%. It was shown that with an increase in the concentration of ZrB₂ in coatings, their hardness increased monotonously from 10.79 to 15.86 GPa. With an increase in the ZrB₂ content, the average wear of the coatings was monotonously reduced. This indicates the good wettability of ZrB₂ particles by titanium melt.

Keywords: Ti–ZrB₂ coating, electric spark alloying, wear, oxidation resistance, hardness

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-69-79

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out within the framework of state assignment No 075-01108-23-02.

REFERENCES

1. Alabort, E., et al. Alloys-by-Design: A Low-Modulus Titanium Alloy for Additively Manufactured Biomedical Implants, *Acta Materialia*, 2022, V. 229, p. 117749. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117749>

2. Ding, H.H., et al., Investigation on Mechanical Properties of Tribofilm Formed on Ti–6Al–4V Surface Sliding Against A DLC Coating by Nano-Indentation and Micro-Pillar Compression Techniques, *Wear*, 2019, V. 432, p. 202954. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202954>

3. Chikarakara, E., Naher, S., Brabazon, D., High speed laser surface modification of Ti–6Al–4V, *Surface and Coatings Technology*, 2012, V. 206, No 14, pp. 3223–3229. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.01.010>

4. Rau, J.V., et al., Hardness of Zirconium Diboride Films Deposited on Titanium Substrates, *Materials Chemistry and Physics*, 2008, V. 112, No 2, pp. 504–509. URL: <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2008.06.004>

5. Wank, A., et al., Protection of Ti–6Al–4V Surfaces by Laser Dispersion of Diborides, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2005, V. 14, pp. 134–140. URL: <https://doi.org/10.1361/10599630522684>

6. Zorin, I.V., Sokolov, G.N., Artemyev, A.A., Dubtsov, Yu.N., Denisevich, D.S., Lysak, V.I., Kharlamov, V.O., Issledovanie vliyaniya sootnosheniya legiruyushchikh elementov v sisteme Ni–Al–Cr–W–Mo–Ta na stoikost naplavlennogo metalla k termicheskoi ustalosti [Study of the influence of the ratio of alloying elements in the Ni–Al–Cr–W–Mo–Ta system on the resistance of the deposited metal to thermal fatigue], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, V. 2 (102), pp. 74–86. URL: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-102-2-74-86>
7. Mihoob, M.M., et al., Optimizing the Thermal Spray Parameters for Producing High-Performance Mo/ZrB₂ Metal Matrix Composites Using the Taguchi Method, *Coatings*, 2023, V. 13, No 9, pp. 1620. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings13091620>
8. Tului, M., et al., Some Properties of Atmosphereic Air and Inert GAS High-Pressure Plasma SPRYED ZrB₂ Coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2002, V. 151–152, pp. 483–489. URL: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01572-9](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01572-9)
9. Bartuli, C., Valente T., Tului, M., Plasma spray deposition and high temperature characterization of ZrB₂–SiC protective coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2002, V. 155, No 2–3, pp. 260–273. URL: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(02\)00058-0](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(02)00058-0)
10. Randich, E., Allred, D.D., Chemically vapor-deposited ZrB₂/sub 2/as a selective solar absorber, *Thin Solid Films (Switzerland)*, 1981, V. 83, No 4, pp. 393–398. URL: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(81\)90646-5](https://doi.org/10.1016/0040-6090(81)90646-5)
11. Kirayukhantsev-Kornev, P., et al., Structure, Corrosion Resistance, Mechanical and Tribological Properties of ZrB₂ and Zr–BN Coatings, *Metals*, 2021, V. 11, No 8, p. 1194. URL: <https://doi.org/10.3390/met111081194>
12. Podchernyaeva, I.A., et al., High-Energy Electrospark Surface Strengthening of Steels with Composite Ceramics, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2014, V. 52, Iss. 11, pp. 656–662. URL: <https://doi.org/10.1007/s111106-014-9573-7>
13. Markov, M.A., Persinin, S.A., Krasikov, A.V., Bykova, A.D., Belyakov, A.N., Fadin, Yu.A., Oso-bennosti formirovaniya antifriktsionnykh pokrytiy na titane metodom elektroiskrovogo legirovaniya s ispol-zovaniem metallokeramicheskikh anodov [Features of the formation of antifriction coatings on titanium by the method of electric spark alloying using metal-ceramic anodes], *Voprosy materialovedeniya*, 2019, V. 4 (100), pp. 61–67. URL: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2019-100-4-61-67>
14. Tarelnyk, V.B., et al., Electrospark Deposition of Multilayer Coatings, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2020, V. 59, pp. 76–88. URL: <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00140-x>
15. Burkov, A.A., Bytsura, A.Yu., Influence of Substrate Surface on Electro-Spark Alloying, *Surface Engineering and Applied ElectroChemistry*, 2024, V. 60, No 2, pp. 204–210. URL: <https://doi.org/10.3103/s106837524020030>
16. Burkov, A.A., Kulik, M.A., Korroziionnaya i tribotekhnicheskaya kharakteristika metallomatrigh-nyykh Fe–Ti–Cr–B pokrytiy [Corrosion and tribotechnical characteristics of the metal-shaped Fe–Ti–Cr–B coatings], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2021, No 12, p. 43.
17. Burkov, A.A., Chigrin, P.G., Kulik, M.A., Effect of TaC content on microstructure and wear behav-ior of PRMMC Fe–TaC coating manufactured by electrospark deposition on AISI304 stainless steel, *Sur-face and Coatings Technology*, 2024, V. 494, p. 131446. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surf-coat.2024.131446>
18. Burkov, A.A., Improvement of Ti–6Al–4V-ally Wear Resistance by Electric-Spark Hafnium Car-bide Coatings, *Journal of Friction and Wear*, 2020, V. 41, pp. 543–548. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366620060045>
19. Burkov, A.A., et al., Elektroiskrovoe osazhdenie poroshka diborida khroma na nerzhaveyush-chuyu stal AISI 304 [Electric precipitation of chromium diboride powder on stainless steel AISI 304], *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*, 2022, V. 24, No 2, pp. 78–90. URL: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2022-24.2-78-90>
20. Burkov, A.A., Poluchenie amorfnykh pokrytiy elektroiskrovoy obrabotkoi stali 35 v smesi zheleznykh granul s CrMoWCBSi poroshkom [Obtaining amorphous coatings by spark-plasma treatment of steel 35 in a mixture of iron granules and CrMoWCBSi powder], *Obrabotka metallov: tekhnologiya, obo-rudovanie, instrumenty*, 2019, V. 21, No 4, pp. 19–30.

21. Cassie, A.B.D., Baxter, S., Wettability of Porous Surface, *Transactions of the Faraday Society*, 1944, V. 40, pp. 546–551.
22. Chen, C., et al., Effect of ZrB₂ on Microstructure and Wear Properties of TC4 Alloy Coatings by Laser Direct Energy Deposition, *Materials Chemistry and Physics*, 2024, p. 130208. URL: <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2024.130208>
23. Bsenko, L., Lundström, T., The high-temperature hardness of ZrB₂ and HfB₂, *Journal of the Less Common Metals*, 1974, V. 34, No 2, pp. 273–278. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(74\)90169-6](https://doi.org/10.1016/0022-5088(74)90169-6)
24. Li, Q.H., et al., Microstructure and Corrosion Properties of AlCoCrFeNi High Entropy Alloy Coatings Deposited on AISI 1045 Steel by the Electrospark Process, *Metallurgical and Materials Transactions*, 2013, V. 44, pp. 1767–1778. URL: <https://doi.org/10.1007/S11661-012-1535-4>
25. Li, Y.C., et al., Effect of Spray Powder Particle Size on the Bionic Hydrophobic Structures and Corrosion Performance of Fe-Based Amorphous Metallic Coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2022, V. 437, p. 128377. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128377>
26. Farotade, G.A., et al., Microstructural Characterization and Surface Properties of Laser Clad Ni–ZrB₂ Coatings on Ti–6Al–4V Alloy, *Materials Today: Proceedings*, 2021, V. 38, pp. 1035–1039. URL: <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.05.780>
27. Archard, J.F., Contact and Rubbing of Flat Surface, *Journal of Applied Physics*, 1953, V. 24, No 8, pp. 981–988. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1721448>

UDC 621.357.74:621.785.3

PERFORMANCE PROPERTIES OF Ni–W, CO–W AND Ni–P–W COATINGS HARDENED BY HEAT TREATMENT

A.V. KRASIKOV, Cand Sc. (Eng), M.V. MERKULOVA, M.E. GOSHKODERYA

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

Received May 13, 2025

Revised May 16, 2025

Accepted May 27, 2025

Abstract—The article presents the results of a comprehensive study of the main performance properties of tungsten-containing galvanic coatings Ni–W, Co–W and Ni–P–W, hardened by heat treatment. It is shown that for binary alloys, heat treatment at 600°C is optimal, which allows achieving maximum wear resistance. For the ternary system, it is advisable to use annealing at 350°C. As a result of annealing, all the studied coatings have high adhesion. It is concluded that to ensure wear resistance of machine parts, it is advisable to use Co–W coatings, and for protection against wear and corrosion in salt water, the most acceptable coating is Ni–P–W.

Keywords: galvanic protective coatings, Ni–W coating, Co–W coating, Ni–P–W coating, heat treatment of coatings, microhardness

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-80-88

REFERENCES

1. Brenner, A., Burkhead, P., Seegmiller, E., Electrodeposition of tungsten alloys containing iron, nickel and cobalt, *Journal of research of the national bureau of standards*, 1947, V. 39, pp. 351–383.
2. Golts, L.N., Kharlamov, V.N., Elektroliticheskoe osazhdenie splavov volframa, nikelya i medi iz vodnykh rastvorov [Electrolytic deposition of tungsten, nickel, and copper alloys from aqueous solutions], *Zhurnal prikladnoi khimii*. 1936, V. 9, pp. 640–652.
3. Vasko, A.T., *Elektrokhimiya volframa* [Electrochemistry of tungsten], Kiev: Tekhnika, 1969.
4. Tsyntsar, N., et al., Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2012, V. 48, No 6, pp. 491–520.
5. Eliaz, N., Gilead, E., Induced Codeposition of Alloys of Tungsten, Molybdenum and Rhenium with Transition Metals, *Modern Aspects of Electrochemistry*, 2008, No 42, pp. 191–301.
6. Yamasaki, T., High-strength nanocrystalline Ni–W Alloys produced by electrodeposition, *Mater. Phys. Mech.*, 2000, V. 1, pp. 127–132.

7. Donten, M., Bulk and surface composition, amorphous structure, and thermocrystallization of electrodeposited alloys of tungsten with iron, nickel, and cobalt, *J. Solid State Electrochem.*, 1999, No 3, pp. 87–96.
8. Vasko, A.T., *Elektrokimiya molibdena i volframa* [Electrochemistry of Molybdenum and Tungsten], Kiev: Naukova dumka, 1977.
9. He, F., Yang, J., Lei, T., Gu, Ch., Structure and Properties of Electrodeposited Fe–Ni–W Alloys with Different Levels of Tungsten Content: A Comparative Study, *Appl. Surf. Sci.*, 2007, V. 253, Is. 18, pp. 7591–7598.
10. Tharamani, C.N., Beera, P., Jayaram, V., Begum, N.Sh., Studies on electrodeposition of Fe–W alloys for fuel cell applications, *Applied Surface Science*, 2006, V. 253, Is. 4, pp. 2031–2037.
11. Galikova, Z., Chovancova, M., Danielik, V., Properties of Ni–W alloy coatings on steel substrate, *Chemical Papers*, 2006, No 60 (5), pp. 353–359.
12. Chen, H., Ren, X., Zhang, X., Jinhui, L., Wear and Corrosion Properties of Crystalline Ni–W Alloy Coatings Prepared by Electrodeposition, *Materials Science Forum*, 2016, V. 849, pp. 671–676.
13. Hamid, Z.A., Electrodeposition of cobalt–tungsten alloys from acidic bath containing cationic surfactants, *Materials Letters*, 2003, No 57 (16–17), pp. 2558–2564.
14. Krasikov, A.V., Merkulova, M.V., Mikhailov, M.S., et al., Formation of a composite coating by crystallization of supersaturated solid solution in the Ni–W system, *Transactions of the Indian institute of metals*, 2024, V. 77, No 9, pp. 2901–2908.
15. Krasikov, A.V., Kastsova, A.G., Markov, M.A., et al., Electrochemical Synthesis of Amorphous Layers from a Nonequilibrium Co–W Alloy as a Precursor for Nanocomposite Coating Formation, *Russian Metallurgy*, 2022, V. 2022, No 6, pp. 666–673.
16. Krasikov, A.V., Synthesis of Nanocomposite Coatings Based on Electrodeposited Amorphous Ni–P–W Layers, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, V. 11, No 6, pp. 1359–1363.
17. Bera, P., Seenivasan, H., Rajam, K.S., Grips, W.V.K., XRD, FESEM and XPS studies on heat treated Co–W electrodeposits, *Materials Letters*, 2012, V. 76, pp. 103–105.
18. Krolkowski, A., Plonska, E., Ostrowski, A., et al. Effects of compositional and structural features on corrosion behavior of nickel-tungsten alloys, *J. Solid State Electrochem.*, 2009, V. 13, pp. 263–275.
19. Cesiulis, H., Sinkeviciute, J., Bersirova, O., Ponthiaux, P. Tribocorrosion Testing of Self-Passivating Molybdenum and Tungsten Alloys Containing Cobalt and Iron, *BALTTRIB 2009, Proceedings*, 2009, pp. 253–258.
20. Hosseini, M.G., Abdolmaleki, M., Ebrahimzadesh, H., Sadjadi, S.S.A., Effect of 2-butyne-1,4-diol on the nanostructure and corrosion resistance properties of Electrodeposited Ni–W–B Coatings, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2011, V. 6, pp. 1189–1205.
21. Chianpairot, A., Lothongkum, G., Schuh, A.C., Boonyongmaneerat, Y., Corrosion of nanocrystalline Ni–W alloys in alkaline and acidic 3.5 wt.% NaCl solutions, *Corrosion Science*, 2011, V. 53, pp. 1066–1071.
22. Gulyaev, A.P., *Korrozionno-stoikie splavy tugoplavkikh metallov* [Corrosion-resistant alloys of refractory metals], Moscow: Nauka, 1982.
23. Tharamani, C. N., Beera P., Jayaram, V., et al., Studies on electrodeposition of Fe–W alloys for fuel cell applications, *Applied Surface Science*, 2006, V. 253, Is. 4, pp. 2031–2037.
24. Younes, O., et al., Electroplating of Amorphous Thin Films of Tungsten/Nickel Alloys, *Langmuir*, 2001, V. 17 (26), pp. 8270–8275.
25. Younes, O., Gileadi, E., Electroplating of Ni/W Alloys I. Ammoniacal Citrate Baths, *J. Electrochem. Soc.*, 2002, V. 149 (2), pp. 100–111.
26. Younes-Metzler, O., Zhu, L., Gileadi, E., The anomalous codeposition of tungsten in the presence of nickel, *Electrochimica Acta*, 2003, No 48 (18), pp. 2551–2562.

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF ELECTRODEPOSITION OF NI-P COATING
FROM PYROPHOSPHATE AND CITRATE ELECTROLYTES**

A.V. KRASIKOV, Cand Sc. (Eng), M.V. MERKULOVA

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

Received April 29, 2025

Revised May 16, 2025

Accepted May 27, 2025

Abstract—The paper presents a comparative study of the influence of the parameters of electrochemical deposition of Ni–P coatings on their composition and current efficiency when deposited from pyrophosphate and citrate electrolytes. It was shown that both electrolytes are suitable for depositing Ni–P coatings on complex-shaped products. A comparison of the properties of coatings of different compositions obtained from these electrolytes was carried out. To obtain harder coatings, it is advisable to use a pyrophosphate electrolyte; however, due to microcracks development in coatings with a phosphorus content of 12 wt. % or more, it is unsuitable for corrosion protection. For this purpose, it is advisable to use a citrate electrolyte, which ensures porosity of the coatings even with a phosphorus content of 12 wt. %.

Keywords: protective coatings, Ni–P coating, citrate electrolyte, pyrophosphate electrolyte

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-89-96

REFERENCES

1. Azhogin, F.F., Belenky, M.A., Gall, I.E., et al., *Galvanotekhnika* [Electroplating]: Reference book, A.M. Ginberg, A.F. Ivanov, L.L. Kravchenko (Eds.), Moscow: Metallurgiya, 1987.
2. Purin, B.A., *Elektroosazhdenie metallov iz pirofosfatnykh elektrolitov* [Electrodeposition of metals from pyrophosphate electrolytes], Riga: Zinatne, 1975.
3. Andryushchenko, F.K., Orekhova, V.V., Pavlovskaya, K.K., *Pirofosfatnye elektrolity* [Pyrophosphate electrolytes], Kiev: Tekhnika, 1965.
4. Orekhova, V.V., Bayrachny, B.I., *Teoreticheskie osnovy galvanostegicheskikh protsessov* [Theoretical Foundations of Galvanostegic Processes], Kiev: Vyshchaya shkola, 1998.
5. Dolgikh, O.V., Sotskaya, N.V., Kravtsova, Yu.G., Sleptsova, O.V., Kataliticheskaya aktivnost nikelovykh splavov v reaktsii vydeleniya vodoroda [Catalytic activity of nickel alloys in hydrogen evolution reactions], *Vestnik VGU, Ser. Khimiya, biologiya, farmatsiya*, 2007, No 1, pp. 33–38.
6. Zhao, H.F., Electrodeposition of amorphous Ni-P alloy coatings, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 1997, V. 7, No 3, pp. 148–151.
7. Yuan, X., Sun, D., Hua, Z., Wang, L., Initial electrodeposition behavior of amorphous Ni–P alloys, *Advanced Materials Research*, 2011, V. 154, pp. 535–539.
8. Krasikov, A.V., Bykova, A.D., Merkulova, M.V., Markov, M.A., Issledovanie tekhnologii elektrokhimicheskogo naneseniya nanokristallicheskikh pokrytiy nikel – volfram iz tsitratnogo elektrolita [Research on the electrochemical deposition of nickel-tungsten nanocrystalline coatings from a citrate electrolyte], *Voprosy materialovedeniya*, 2020, No 1 (101), pp. 111–117.
9. Krasikov, A.V., Pervukhina, M.S., Tekhnologicheskie osobennosti naneseniya pokrytiy iz korrozionno-stoikikh nanostrukturirovannykh splavov nikel – volfram metodom elektrokhimicheskogo osazhdeniya [Technological features of applying coatings from corrosion-resistant nickel-tungsten nanostructured alloys by electrochemical deposition], *Voprosy materialovedeniya*, 2011, No 3 (67), pp. 117–124.
10. Yamasaki, T., High-strength nanocrystalline Ni–W Alloys produced by electrodeposition, *Mater. Phys. Mech. L.*, 2000, V. 1, pp. 127–132.
11. Ahmad, J., Asami, K., Takeuchi, A., Inoue, A., Effect of Sodium Hypophosphite on the Structure and Properties of Electrodeposited Ni–W–P Alloys, *Materials Transactions*, 2003, V. 44, No 4, pp. 705–708.
12. Cesiulis, H., Xie, X., Podlaha-Murphy, E., Electrodeposition of Co–W Alloys with P and Ni, *Material science*, 2009, V. 15, No 2, pp. 115–122.

PULSED GALVANOSTATIC ELECTROLYSIS MODES FOR ENHANCING CORROSION RESISTANCE OF ECO-FRIENDLY TIN-ZINC ALLOY COATINGS

S.Yu. KIREEV, Dr Sc. (Eng), G.V. KOZLOV, Dr Sc. (Eng), S.N. KIREEVA, Cand Sc. (Eng),
A.Z. YANGURAZOVA, Yu.N. KIRILINA, Cand Sc. (Eng), A.S. BALYBERDIN

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

E-mail: sergey58_79@mail.ru; Dean_fptet@pnzgu.ru

Received March 18, 2025

Revised March 27, 2025

Accepted March 31, 2025

Abstract—The influence of pulsed galvanostatic electrolysis modes (unipolar and reverse) on the corrosion resistance and functional properties of eco-friendly tin-zinc (Sn–Zn) alloy coatings was investigated. An alkaline solution with sodium citrate and sodium lauryl sulfate additives was used as the electrolyte. The unipolar mode (5 ms, 1.5 A/dm²) provided high current efficiency (72%) and microhardness (950–1050 MPa) but increased porosity (7–12%). The reverse mode (5 ms cathodic/anodic phases, 2.0/0.5 A/dm²) demonstrated minimal porosity (2–4%), reduced internal stresses (50–80 MPa), and maximum corrosion resistance (>1200 hours in salt spray). It was established that the anodic phases of the reverse mode level the surface, reducing defects. Pulsed technologies have surpassed stationary electrolysis in wear resistance (2–3 times), microhardness (+15–25%), and solderability (wetting angle 12–18°). The reverse mode is recommended for marine electronics and aviation, while the unipolar mode is suitable for tasks prioritizing microhardness. The results contribute to the development of eco-friendly alternatives to toxic coatings in compliance with RoHS/REACH directives.

Keywords: pulsed electrolysis, corrosion resistance, tin-zinc coatings, porosity, anodic leveling

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-97-107

REFERENCES

1. Joscha, B., Annkatrin, K., Michael, R., Beyond RoHS and REACH: Relevant CMR Substances in Electronic Products, *Electronics Goes Green 2024+(EGG), IEEE*, 2024, pp. 1–5.
2. Dubent, S., Mertens, M.L.A.D., Saurat, M., Electrodeposition, characterization and corrosion behaviour of tin–20 wt.% zinc coatings electroplated from a non-cyanide alkaline bath, *Materials Chemistry and Physics*, 2010, V. 120, No 2–3, pp. 371–380.
3. Maniam, K.K., Paul, S., Corrosion performance of electrodeposited zinc and zinc-alloy coatings in marine environment, *Corrosion and Materials Degradation*, 2021, V. 2, No 2, pp. 163–189.
4. Wang, K., Pickering, H.W., Weil, K.G., Tin-zinc alloy electroplating and its corrosion behavior, *Prod Finish*, 2023, V. 867, pp. 6–11.
5. Kireev, S.Yu., Formirovanie i issledovanie svoystv finishnykh pokritiy pechatnykh plat splavom olovo-tsink vzamen pokritiy splavom olovo-svinets [Formation and investigation of the properties of finishing coatings of printed circuit boards with tin-zinc alloy instead of tin-lead alloy coatings], *Korroziya: materialy, zaschita*, 2015, No 8, pp. 7–12.
6. Yangurazova, A.Z., Kireev, S.Yu., K voprosu o poiske alternativy kadmievomu pokritiyu [On the question about searching an alternative to cadmium coating], *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2021, V. 35, No 5 (240), pp. 34–35.
7. Liu, P., et al., Study on microstructure and properties of mechanically deposited Zn-Sn coating, *Coatings*, 2022, V. 12, No 12.
8. Benidir, S., Madani, A., Baka, O., Kherfi, A., Delhalle, J., Mekhalif, Z., Influence of applied potential on tin content in electrodeposition of Zn–Sn alloy coatings and its effect on corrosion protection, *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 2022, V. 52, No 7, pp. 899–909.
9. Shepelevich, V.G., Zernitsa, D.A., The formation of the structure of the alloys of the tin–zinc system upon high-speed solidification, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2021, V. 12, Is. 4, pp. 1094–1099.

10. Zernitsa, D.A., Shepelevich, V.G., Structure formation and peculiarities of crystallization of lead-free tin–zinc alloys obtained by rapid solidification, *Journal of the Belarusian State University. Physics*, 2022, No 3, pp. 48–55.
11. Tamhane, D., Thalapil, J., Banerjee, S., Tallur, S., Smart cathodic protection system for real-time quantitative assessment of corrosion of sacrificial anode based on electro-mechanical impedance (EMI), *IEEE Access*, 2021, V. 9, pp. 12230–12240.
12. Grachev, V.A., Rozen, A.E., Perelygin, Y.P., Kireev, S.Y., Los, I.S., Multilayer corrosion-resistant material based on iron–carbon alloys, *Heliyon*, 2020, V. 6, No 5.
13. Rozen, A.E., Loginov, O.N., Rosen, A.A., Kireev, S.Yu., Sevostyanov, N.V., Structure of the interlayer boundary of layered metal materials with an internal protector obtained via explosion welding, *Metallurgist*, 2022, V. 66, No 5, pp. 586–592.
14. Kirikova, D.I., Kireeva, S.N., Kireev, S.Yu., Perelygin, Y.P., Elektroosazhdenie tsinka iz kislogo laktatnogo elektrolita s ispolzovaniem unipolyarnogo galvanostaticeskogo rezhima impulsnogo elektroliza [Electrodeposition of zinc from acid lactate bath using unipolar galvanostatic pulses], *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 2016, V. 24, No 3, pp. 32–38.
15. Kireev, S.Yu., Perelygin, Y.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.
16. 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.
17. Zhang, Z., Gao, Q., Ao, J., Yao, L., Bi, J., Gao, S., Jeng, M.-J., Sun, G., Zhou, Z., Liu, F., Zhang, Y., Sun, Y., Morphology Modification of Sn and Zn Metal Thin Films Applied for CZTSe Solar Cell: The Effect of Pulse Current Electrodeposition, *7th IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, WCPEC 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 881–886.
18. Burton, N.A., Grant, J.C., Increasing the efficiency of water electrolysis with the application of pulsing electric fields, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, V. 215.
19. Lu, H., Zhang, L., Xi, X., Nie, Z., Optimization of pulse bi-directional electrolysis in-situ synthesis of tungsten carbide by response surface methodology, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, V. 111.
20. Du, W., Yan, J., Cao, C., Li, C.C., Electrocrystallization orientation regulation of zinc metal anodes: strategies and challenges, *Energy Storage Materials*, 2022, V. 52, pp. 329–354.
21. Cao, F., Wang, J., Lian, Y., et al., A study on the influence of the electroplating process on the corrosion resistance of zinc-based alloy coatings, *Coatings*, 2023, V. 13, No 10.
22. Liang, J., Li, J., Dong, H., et al., Aqueous alternating electrolysis prolongs electrode lifespans under harsh operation conditions, *Nature Communications*, 2024, V. 15, No 1.
23. Kazimierczak, H., Ozga, P., Jałowiec, A., Kowalik, R., Tin–zinc alloy electrodeposition from aqueous citrate baths, *Surface and coatings technology*, 2014, V. 240, pp. 311–319.
24. Perelygin, Yu.P., Kireev, S.Yu., Vinogradov, S.N., Iznosostoykost i antifriktsionnye svoystva galvanicheskikh pokrytii palladiem, olovom, tsinkom i splavami na ikh osnove [Wear resistance and antifrictional properties of galvanic coatings of the palladium, tin, zinc and alloys on their basis], *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax*, 2012, No 10, pp. 13–16.
25. Kireev, S.Yu., Perelygin, Yu.P., Metody opredeleniya payaemosti pokrytii [Measurement of coatings solderability], *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 2011, V. 19, No 2, pp. 52–57.
26. Zhang, Y., Zhang, T., Wan, H., Li, G., Liu, H., Mechanism of microbiologically induced anaerobic water-line corrosion of 980 high strength steel in nutrient-rich artificial seawater, *Corrosion Science*, 2023, V. 220.
27. Chung, Y., Lee, C.W., Electrochemically fabricated alloys and semiconductors containing indium, *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 2012, V. 3, No 3, pp. 95–115.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYTETRAFLUOROETHYLENE AND HALLOYSITE OF DIFFERENT GRADES

P.N. TARASOVA, Yu.V. KAPITONOVA, Cand. Sc. (Eng), N.P. SIVTSEVA-GLADKINA, N.N. LAZAREVA, Cand. Sc. (Eng), A.A. OKHLOPKOVA, Dr Sc. (Eng), Yu.V. KYCHKINA, A.A. KANAEVA

Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinskogo St, 677000 Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation. E-mail: pn.tarasova@mail.ru

Received April 4, 2025

Revised April 29, 2025

Accepted May 6, 2025

Abstract—The paper studies the effect of halloysite nanotubes of three grades on changes in the physical, mechanical and tribological properties, as well as the structure of polytetrafluoroethylene. Halloysite is a kaolinite rolled into a tube and has the chemical formula $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$. The studied halloysite grades differ in textural characteristics and phase composition. It is shown that composites reinforced with halloysite demonstrate a significant decrease in the wear rate of polytetrafluoroethylene (by 400 times) while maintaining a low friction coefficient (~ 0.20). With an increase in the halloysite content to 5 wt. %, the elastic modulus of the material increases significantly. It is shown that the introduction of halloysite grade ANT 811 improves the relative elongation by 9 times and wear resistance by 6 times compared to halloysite grade ANT 3810. Changes in wear resistance and friction coefficient indices are correlated. The PTFE/halloysite ANT 811 composite has the highest wear resistance, while the SEM method shows the formation of a wear-resistant layer of secondary structures on the friction surface of the composite material. Despite the morphology of the HNT particles, tribological tests show that the HNT particles act as a solid lubricant at the initial stages of friction.

Keywords: polymer composite materials, polytetrafluoroethylene, layered silicates, nanotubes, halloysite

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-108-121

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant numbers [FSRG-2024-0004]).

REFERENCES

1. Xiao, W., Ji, X., Effect of nano fillers on the properties of polytetrafluoroethylene composites: Experimental and theoretical simulations, *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, V. 138, No 45, p. 51340. DOI: 10.1002/app.51340
2. Chan, J. X., Wong, J. F., Petrú, M., Hassan, A., Nirmal, U., Othman, N., Ilyas, R. A., Effect of nanofillers on tribological properties of polymer nanocomposites: A review on recent development, *Polymers*, 2021, V. 13, No 17, p. 2867. DOI: 10.3390/polym13172867
3. Liu, M., Jia, Z., Jia, D., Zhou, C., Recent advance in research on halloysite nanotubes-polymer nanocomposite, *Progress in polymer science*, 2014, V. 39, No 8, pp. 1498–1525. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2014.04.004
4. Cheng, C., Song, W., Zhao, Q., Zhang, H., Halloysite nanotubes in polymer science: Purification, characterization, modification and applications, *Nanotechnology Reviews*, 2020, V. 9, No 1, pp. 323–344. DOI: 10.1515/ntrev-2020-0024
5. Kausar, A., Review on polymer/halloysite nanotube nanocomposite, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2018, V. 57, No 6, pp. 548–564. DOI: 10.1080/03602559.2017.1329436
6. Idumah, C. I., Hassan, A., Ogbu, J., Ndem, J. U., Nwuzor, I. C., Recently emerging advancements in halloysite nanotubes polymer nanocomposites, *Composite Interfaces*, 2019, V. 26, No 9, pp. 751–824. DOI: 10.1080/09276440.2018.1534475
7. Amirikiai, A., Panahi-Sarmad, M., Sadeghi, G. M. M., Arjmand, M., Abrisham, M., Dehghan, P., Nazockdast, H., Microstructural design for enhanced mechanical and shape memory performance of polyurethane nanocomposites: Role of hybrid nanofillers of montmorillonite and halloysite nanotube, *Applied Clay Science*, 2020, V. 198, p. 105816. DOI: 10.1016/j.clay.2020.105816

8. Bulbul, Y. E., Okur, M., Demirtas-Korkmaz, F., Dilsiz, N., Development of PCL/PEO electrospun fibrous membranes blended with silane-modified halloysite nanotube as a curcumin release system, *Applied Clay Science*, 2020, V. 186, p. 105430. DOI: 10.1016/j.clay.2019.105430
9. Eryildiz, M., Altan, M., Fabrication of polylactic acid/halloysite nanotube scaffolds by foam injection molding for tissue engineering, *Polymer Composites*, 2020, V. 41, No 2, pp. 757–767. DOI: 10.1002/pc.25406
10. Hamed, S., Koosha, M., Designing a pH-responsive drug delivery system for the release of black-carrot anthocyanins loaded in halloysite nanotubes for cancer treatment, *Applied Clay Science*, 2020, V. 197, P. 105770. DOI: 10.1016/j.clay.2020.105770
11. Prashantha, K., Lacrampe, M. F., Krawczak, P., Processing and characterization of halloysite nanotubes filled polypropylene nanocomposites based on a masterbatch route: effect of halloysites treatment on structural and mechanical properties, *Express Polymer Letters*, 2011, V. 5, No 4, pp. 295–307. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2011.30
12. Du, M., Guo, B., Lei, Y., Liu, M., Jia, D., Carboxylated butadiene–styrene rubber/halloysite nanotube nanocomposites: Interfacial interaction and performance, *Polymer*, 2008, V. 49, No 22, pp. 4871–4876. DOI: 10.1016/j.polymer.2008.08.042
13. Prashantha, K., Lacrampe, M. F., Krawczak, P., Highly dispersed polyamide-11/halloysite nanocomposites: Thermal, rheological, optical, dielectric, and mechanical properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, V. 130, No 1, pp. 313–321. DOI: 10.1002/app.39160
14. Krishnaiah, P., Manickam, S., Ratnam, C. T., Raghu, M. S., Parashuram, L., Prasanna Kumar, S., Jeon, B. H., Mechanical, thermal and dynamic-mechanical studies of functionalized halloysite nanotubes reinforced polypropylene composites, *Polymers and Polymer Composites*, 2021, V. 29, No 8, pp. 1212–1221. DOI: 10.1177/0967391120965115
15. Krishnaiah, P., Ratnam, C. T., Manickam, S., Development of silane grafted halloysite nanotube reinforced polylactide nanocomposites for the enhancement of mechanical, thermal and dynamic-mechanical properties, *Applied Clay Science*, 2017, V. 135, pp. 583–595. DOI: 10.1016/j.clay.2016.10.046
16. Pasbakhsh, P., Churchman, G. J., Keeling, J. L., Characterisation of properties of various halloysites relevant to their use as nanotubes and microfibre fillers, *Applied Clay Science*, 2013, V. 74, pp. 47–57. DOI: 10.1016/j.clay.2012.06.014
17. Aytekin, M. T., Hoşgün, H. L., Characterization studies of heat-treated halloysite nanotubes, *Chemical Papers*, 2020, V. 74, No 12, pp. 4547–4557. DOI: 10.1007/s11696-020-01263-6
18. Le, Ba T., Alkurdi, A. Q., Lukács, I. E., Molnár, J., Wongwises, S., Gróf, G., Szilágyi, I. M., A novel experimental study on the rheological properties and thermal conductivity of halloysite nanofluids, *Nanomaterials*, 2020, V. 10, No 9, p. 1834. DOI: 10.3390/nano10091834
19. Atyakshcheva, L. F., Kasyanov, I. A., Galluazit – prirodnye alyumosilikatnye nanotrubki: strukturnye osobennosti i adsorbcionnye svoystva [Halloysite – natural aluminosilicate nanotubes: structural features and adsorption properties], *Sovremennye mole-kulyarnye sita*, 2021, V. 3, No 2, pp. 124–143. DOI: 10.53392/27130304_2021_3_2_124
20. Nambiar, A. P., Pillai, R., Sanyal, M., Vadikkeettil, Y., Shrivastav, P. S., A starch based sustainable bio-hybrid composite for surface assimilation of methylene blue: preparation, characterization, and adsorption study, *Environmental Science: Advances*, 2023, V. 2, No 6, pp. 861–876. DOI: 10.1039/D2VA00274D
21. Dyatlova, E. M., Bobkova, N. M., Sergievich, O. A., IR-spektroskopicheskoe issledovanie kaolinovogo syr'ya belorusskikh mestorozhdenij [IR-spectroscopic study of kaolin raw materials from Belarusian deposits], *Problemy nedropol'zovaniya*, 2019, V. 21, No 2, pp. 143–149. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.143
22. Xu, J., Reiter, G., Alamo, R. G., Concepts of nucleation in polymer crystallization, *Crystals*, 2021, V. 11, No 3, p. 304. DOI: 10.3390/cryst11030304
23. Kapitonova, Yu. V., Lazareva, N. N., Tarasova, P. N., Okhlopko, A. A., Laukkanen, S., Mukhin, V. V., Morphology analysis of friction surfaces of composites based on PTFE and layered silicates, *Polymers*, 2022, V. 14, No 21, p. 4658. DOI: 10.3390/polym14214658
24. Kapitonova, Yu. V., Tarasova, P. N., Okhlopko, A. A., Lazareva, N. N., Tribohimicheskie reakcii, protekayushchie na poverhnosti treniya kompozitov na osnove PTFE, napolnennogo sloistymi silikatami

[Tribological reactions occurring on the friction surface of PTFE-based composites filled with layered silicates], *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2024, No 2, pp. 98–106. DOI: 10.25699/SSSB.2024.54.2.012

25. Sleptsova, S. A., Okhlopova, A. A., Kapitonova, Iu. V., Lazareva, N. N., Makarov, M. M., Nikiforov, L. A., Spektroskopicheskie issledovaniya tribookislitelnykh protsessov modifitsirovannogo PTFE [Spectroscopic studies of tribooxidative processes of modified PTFE], *Trenie i iznos*, 2016, V. 37, No 2, pp. 168–176.

UDC 678.743.41:621.891:534.29

INFLUENCE OF OSCILLATORY PROCESS ENERGY ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIAL

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

Omsk State Technical University, 11 Mira Ave, 644050 Omsk, Russian Federation.

E-mail: den.veber.18@bk.ru

Received April 8, 2025

Revised April 15, 2025

Accepted July 7, 2025

Abstract—A new method of pressing composites modified with carbon fillers is presented, with additional complex impact of ultrasonic vibrations at 17 kHz and superimposed low-frequency amplitude modulation at 100 Hz. Thus, impact of this kind made it possible to reduce the intensity of mass wear of composite samples under dry friction by 1000 times compared to polytetrafluoroethylene samples and at the same time maintain the friction coefficient of the original polymer. It is shown that ultrasonic vibrations promote disaggregation of nanosized particles, and simultaneously superimposed low-frequency amplitude modulation leads to an ordered distribution of the filler in the polymer matrix. This mode ensures the production of a defect-free structure due to compaction of the composite mixture and helps to eliminate pores and cracks in the volume of the material.

Keywords: polytetrafluoroethylene, multi-walled carbon nanotubes, wear resistance, low-frequency modulation, ultrasound

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-122-135

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and the Higher Education of the Russian Federation No FSGF-2024-0003.

REFERENCES

1. 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>
2. Alam, K.I., Dorazio, A., Burris, D.L., Polymers tribology exposed: eliminating transfer film effects to clarify ultralow wear of PTFE, *Tribology Letters*, 2020, V. 68, Art. 67. URL: <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01306-9>
3. 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>
4. Amenta, F., Bolelli, G., Pedrazzi, S., Allesina, G., Santeramo, F., Bertarini, A., Sassatelli, P., Lusvarghi, L., Sliding Wear Behaviour of Fibre-Reinforced PTFE Composites against Coated and Uncoated Steel, *Wear*, 2021, V. 486, p. 204097. URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2021.204097>
5. Li, J., Ran, Y., Evaluation of the Friction and Wear Properties of PTFE Composites Filled with Glass and Carbon Fiber, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2010, V. 41, No 2, pp. 115–118. URL: <https://doi.org/10.1002/mawe.200900545>
6. 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>

7. Chen, W.X., Li, F., Han, G., Xia, J.B., Wang, L.Y., Tu, J.P., Xu, Z.D., Tribological Behavior of Carbon-Nanotube-Filled PTFE Composites, *Tribology Letters*, 2003, V. 15, No 3, pp. 275–278. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1024869305259>
8. Mashkov, Yu.K., Kurguzova, O.A., Ruban, A.S., Razrabotka i issledovanie iznosostoikikh polimernykh kompozitov [Development and research of wear-resistant polymer composites], *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobilno-dorozhnoi akademii*, 2018, V. 15, No 1, pp. 36–45.
9. Nikitina, A.V., Okhlopko, A.A., Vasiliev, A.P., Issledovanie vliyaniya nanorazmernogo nitrida bora na svoistva politetraftoretilena [Investigation of the effect of nanoscale boron nitride on the properties of polytetrafluoroethylene], *Proceedings of the conference "Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idei k vnedreniyu"*, Komsomolsky-na-Amure gosudarstvennyy universitet, 7–11 February, 2022, pp. 329–333.
10. Okhlopko, A.A., Adrianova, O.A., Popov, S.N., *Modifikatsiya polimerov ultradispersnymi soedineniyami* [Modification of polymers by ultrafine compounds], Yakutsk: Izd-vo SO RAN, 2003.
11. Ronghao, L., Keqiang, L., Haiyong, T., Jianmin, X., Shaoquan, L., Mechanical Properties of Plasma-Treated Carbon Fiber Reinforced PTFE Composites with CNT, *Surface and Interface Analysis*, 2017, V. 49, No 11, pp. 1064–1068. URL: <https://doi.org/10.1002/sia.6278>
12. Vasilev, A.P., Lazareva, N.N., Struchkova, T.S., Okhlopko, A.A., Danilova, S.N., Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Modified with Combined Fillers: Carbon Fibers, Zirconium Dioxide, Silicon Dioxide and Boron Nitride, *Polymers*, 2023, V. 15, No 2, pp. 313–326. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15020313>
13. Rennhofer, H., Zanghellini, B., Dispersion State and Damage of Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers by Ultrasonic Dispersion: A Review, *Nanomaterials*, 2021, V. 11, No 6, pp. 1469–1496. URL: <https://doi.org/10.3390/nano11061469>
14. Negrov, D.A., Putintsev, V.Yu., Vliyanie nizkochastotnoi modulyatsii na mekhanicheskie svoistva i tribotekhnicheskie kharakteristiki polimernykh kompozitsionnykh materialov [The effect of low-frequency modulation on the mechanical properties and tribotechnical characteristics of polymer composite materials], *Polzunovsky vestnik*, 2021, No 4, pp. 140–145. URL: <https://doi.org/10.251712/ASTU.2072-8921.2021.04.018>
15. Negrov, D.A., Eremin, E.N., Povyshenie koeffitsienta usileniya i chastotnoi ustoichivosti ultrazvukovoi volnovodnoi sistemy [Increasing the gain coefficient and frequency stability of an ultrasonic waveguide system], *Omsky nauchny vestnik*, 2012, V. 110, No 2, pp. 94–97.
16. Negrov, D.A., Eremin, E.N., Putintsev, V.Yu., Peredelskaya, O.A., Raschet ultrazvukovykh volnovodnykh sistem dlya razlichnykh tekhnologicheskikh protsessov [Calculation of ultrasonic waveguide systems for various technological processes], *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost*, 2013, No 1, pp. 99–102.
17. Negrov, D.A., Putintsev, V.Yu., Uovershenstvovanie tekhnologii pressovaniya izdeliy iz politetraftoretilena [Improving the technology of pressing polytetrafluoroethylene products], *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Ser.: Tekhnika i tekhnologii*, 2021, V. 14, No 5, pp. 564–571.
18. Negrov, D.A., Putintsev, V.Yu., Glotov, A.I., Vliyanie uovershenstvovannoi tekhnologii pressovaniya na strukturoobrazovanie politetraftoretilena [The influence of improved pressing technology on the structure formation of polytetrafluoroethylene], *Polzunovsky vestnik*, 2024, No 1, pp. 240–244.
19. Negrov, D.A., Putintsev, V.Yu., Vliyanie nizkochastotnoi modulyatsii na mekhanicheskie svoistva i tribotekhnicheskie kharakteristiki polimernykh kompozitsionnykh materialov [The effect of low-frequency modulation on the mechanical properties and tribotechnical characteristics of polymer composite materials], *Polzunovsky vestnik*, 2021, No 4, pp. 140–145.
20. Okhlopko, A.A., Struchkova, T.S., Vasiliev, A.P., Alekseev, A.G., Dyakonov, A.A., Vliyanie termicheskoi obrabotki na nadmolekulyarnuyu strukturu poroshka politetraftoretilena [The effect of heat treatment on the supramolecular structure of polytetrafluoroethylene powder], *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta im. M.K. Ammosova*, 2016, V. 54, No 4, pp. 48–57.
21. Klaas, N.V., Marcus, K., Kellock, C., The Tribological Behaviour of Glass Filled Polytetrafluoroethylene, *Tribology International*, 2005, V. 38, Is. 9, pp. 824–833. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.02.010>

22. Alam, K.I., Burris, D.L., Ultralow Wear Poly (Tetrafluoroethylene): A Virtuous Cycle of Wear Reduction and Tribochemical Accumulation, *Journal of Physical Chemistry C*, 2021, V. 125, No 35, pp. 19417–19427. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c03885>
23. Samad, M.A., Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/UHMWPE Hybrid Nanocomposite Polymer Coatings for Tribological Applications: A Comprehensive Review, *Polymers*, 2021, V. 13, No 4, pp. 608–647. URL: <https://doi.org/10.3390/polym13040608>
24. Zhang, F., Zhang, J., Zhy, Y., Wang, X., Microstructure and Properties of Polytetrafluoroethylene Composites Modified by Carbon Materials and Aramid Fibers, *Coatings*, 2020, V. 10, No 11, pp. 1103–1123. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings10111103>
25. Shi, Y., Feng, X., Wang, H., Tribological and Mechanical Properties of PTFE Composites Filled with the Combination of Short Carbon Fiber and Carbon Nanofiber, *Key Engineering Materials*, 2007, V. 334–335, pp. 689–692. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.334-335.689>
26. Xiao, W., Ji, X., Effect of nano fillers on the properties of polytetrafluoroethylene composites: Experimental and theoretical simulations, *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, V. 138, No 45, p. 51340. URL: <https://doi.org/10.1002/app.51340>
27. Negrov, D.A., Putintsev, V.Y., 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 4, pp. 1141–1149. URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-025-0210-9>

UDC 678.743.41:677.172

CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON PTFE AND WOLLASTONITE FROM RICE STRAW

E.V. ABAKUNOVA¹, T.S. STRUCHKOVA¹, Cand Sc. (Eng), S.B. YARUSOVA², Cand Sc. (Chem),
S.N. DANILOVA^{1,3}, Cand Sc. (Eng), A.E. PANASENKO², Cand Sc. (Chem),
A.A. OKHLOPKOVA¹, Dr Sc. (Eng), P.S. GORDIENKO², Dr Sc. (Eng)

¹ North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, 48 Kulakovskogo St, 677000 Yakutsk,
Russian Federation. E-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

² Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
159 100-letiya Vladivostoka Prosp, 690022 Vladivostok, Russian Federation

³ Harbin Institute of Technology, 92 Xidazhi St, 150090 Harbin, People's Republic of China

Received April 23, 2025

Revised May 23, 2025

Accepted May 27, 2025

Abstract—The effect of wollastonite on the properties of polymer composite materials (PCMs) based on polytetrafluoroethylene (PTFE) was investigated. New composite formulations were developed with wollastonite content ranging from 0.1 to 2 wt. %. It was found that the incorporation of wollastonite enhances the mechanical properties of PCMs, resulting in a 35% increase in tensile strength and a 47% improvement in elongation at break. Moreover, the wear resistance of the composites increased by 67-fold compared to pristine PTFE. The investigations were further supported and correlated with thermodynamic and structural analyses. The supramolecular structure of PTFE changes from a ribbon-like to a spherulite-like morphology upon the addition of wollastonite. IR-spectroscopy confirmed the formation of secondary structures derived from oxidized functional groups. Thermodynamic studies revealed that increasing the wollastonite concentration in PCMs led to higher crystallinity and melting enthalpy values.

Keywords: polymer composite material, polytetrafluoroethylene, wollastonite, rice straw

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-136-144

ACKNOWLEDGMENTS

Synthesis and investigation of silicate filler material was performed within the State Order of the Institute of Chemistry FEB RAS, no. FWFN (0205)-2025-0002. The study of the properties and structure of PCM was carried on the base North-Eastern Federal University out with the financial support of the Russian Ministry of Science and Higher Education Research Project No FSRG-2023-0026.

REFERENCES

1. Raskutin, A.E., Strategiya razvitiya polimernykh kompozitsionnykh materialov [Development strategy of polymer composite materials], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2017, No S, pp. 344–348.
2. Chen, H., Li, C., Yao, Q., Chen, F., Fu, Q., Enhanced thermal conductivity and wear resistance of polytetrafluoroethylene via incorporating hexagonal boron nitride and alumina particles, *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, V. 139, No 3, p. 51497.
3. Wang, H., Sun, A., Qi, X., Dong, Y., Fan, B., Experimental and analytical investigations on tribological properties of PTFE/AP composites, *Polymers*, 2021, V. 13, No 24, p. 4295.
4. Sathish, M., Radhika, N., Venuvanka, N., Rajesh Kumar, L., A review on sustainable properties of plant fiber-reinforced polymer composites: characteristics and properties, *Polymer International*, 2024, V. 73, No 11, pp. 887–943.
5. Akhmetkhanov, R.M., Sadritdinov, A.R., Zakharov, V.P., Shurshina, A.S., Kulish, E.I., Izucheniye vyazkouprugikh kharakteristik vtorichnogo polimernogo syrya v prisutstvii prirodnykh napolnitelei rastitelnogo proiskhozhdeniya [Study of the viscoelastic characteristics of secondary polymer raw materials in the presence of natural plant-based fillers], *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*, 2020, V. 22, No 1, pp. 11–17.
6. Podnezhny, E.N., Drobyshevskaya, N.E., Boyko, A.A., Shapovalov, V.M., Drobyshevsky, N.S., Osobennosti formirovaniya biorazлагаemykh kompozitov, napolnennykh risovoi luzgoi [Features of the formation of biodegradable composites filled with rice hulls], *Vestnik Gomelskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo*, 2021, No 4 (87), pp. 50–57.
7. Danilova, S.N., Yarusova, S.B., Kulchin, Yu.N., Zhevtun, I.G., Buravlev, I.Yu., Okhlopko, A.A., Gordienko, P.S., Subbotin, E.P. UHMWPE/CaSiO₃ nanocomposite: mechanical and tribological properties, *Polymers*, 2021, V. 13, No 4, p. 570.
8. Patent RF 2770075: *Sposob polucheniya wollastonita iz kremniysoderzhashego rastitelnogo syrya* [Method for producing wollastonite from silicon-containing plant materials], Yarusova, S.B., Panasenko, A.E., Gordienko, P.S., Zemnukhova, L.A., Publ. 14.04.2022.
9. Gotlib, E.M., Sadykova, D.F., Kozhevnikov, R.V., Tverdov, I.D., Mishagin, K.A., Polivinilkhlordnye kompozitsii dlya linoleuma s dobavkami napolnitelei na osnove risovoi shelukhi [Polyvinyl chloride compositions with fillers based on rice husk for linoleum], *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2023, V. 66, No 2, pp. 114–119.
10. Gorbachev, A.V., Fayzullin, I.Z., Wolfson, S.I., Kanarsky, A.V., Zakharov, I.V., Kazakov, Yu.M., Kompozitsionny material na osnove poliolefinov i modifitsirovannykh rastitelnykh napolniteley [Composite material based on polyolefins and modified vegetable fillers], *Plasticheskie massy*, 2023, V. 1, No 1–2, pp. 48–52.
11. Nikitina, A.V., Vasiliev, A.P., Okhlopko, A.A., Struchkova, T.S., Alekseev, A.G., Vliyaniye sposobov aktivatsii oksida titana na svoystva i strukturu politetrafluoretilena [Influence of titanium oxide activation methods on the properties and structure of polytetrafluoroethylene], *Yuzhno-Sibirsky nauchnyy vestnik*, 2022, No 2, p. 42.
12. Struchkova, T.S., Amvrosiev, Ya.A., Issledovanie vliyaniya nanoshpineli magniya na strukturu i svoystva politetrafluoretilena [Investigation of the effect of magnesium nanospinel on the structure and properties of polytetrafluoroethylene], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2020, V. 22, No 2, pp. 47–50.
13. Ignatieva, L.N., Buznik, V.M., IR-spektroskopicheskie issledovaniya politetrafluoretilena i ego modifitsirovannykh form [IR-spectroscopic studies of polytetrafluoroethylene and its modified forms], *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2008, V. 52, No 3, pp. 139–142.
14. Kapitonova, Yu.V., Tarasova, P.N., Okhlopko, A.A., Lazareva, N.N., *Tribokhimicheskie reaktsii, protekayushie na poverkhnosti treniya kompozitov na osnove PTFE, napolnennogo sloistymi silikatami* [Tribochemical reactions occurring during friction of composites based on PTFE filled with layered silicates], *Yuzhno-Sibirsky nauchnyy vestnik*, 2024, No 2(54), pp. 98–106.

**INFLUENCE OF THE NATURE OF THE INERT CARRIER ON THE EFFICIENCY
OF MICROENCAPSULATING A CORROSION AND SCALE INHIBITOR**

S.A. SIDOROVA¹, S.A. TYURINA^{1,3}, Cand Sc. (Eng), N.A. RASHUTIN¹, V. L. DEMIN^{1,2}, Cand Sc. (Eng),
V.A. SHCHELKOV^{2,3}, Cand Sc. (Eng)

¹ MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Ave, 119454 Moscow,
Russian Federation. E-mail: tyurina_s@mirea.ru

² Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, 31/bldg 4 Leninsky Ave,
119071 Moscow, Russian Federation

³ NPO ROKOR, 68/3 Mira Ave, 129110 Moscow, Russian Federation

Received January 28, 2025

Revised April 24, 2025

Accepted September 15, 2025

Abstract—Microencapsulation of corrosion inhibitors allows increasing the efficiency of modification of polymer composite coatings, increasing their corrosion resistance over a long period. The selection of an inert carrier, which constitutes a solid base of a functional particle, remains an urgent task. The paper considers the features of solid carriers of functional additives, which are used to obtain microcapsules. The kinetics of release of an inhibitory agent was studied by a spectrophotometric method with the construction of a calibration graph. It was found that activated aluminum oxide showed the highest loading of the inhibitory agent and a longer release time among the considered carriers.

Keywords: microencapsulation technology, modification of polymer coatings, corrosion inhibition, corrosion, scale formation, paint materials

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-145-155

REFERENCES

1. Rashutin, N.A., Tyurina, S.A., Demin, V.L., Ustanovki dlya uskorenogo nakipeobrazovaniya [Plants for accelerated scale formation], *Proceedings of the conference IPTIP RTU MIREA "Perspektivnye materialy i tekhnologii (PMT-2024)"*, Moscow: MIREA, 2024, pp. 235–236. EDN CTEBPP
2. Schmitt, G., et al., *Global needs for knowledge dissemination, research, and development in materials deterioration and corrosion control*, World Corrosion Organization, 2009. URL: <http://www.corrosion.org.cn/fszy/202304/P020230501743614591484.pdf> (reference date 31/08/2025).
3. Tatarintsev, V.A., Osobennosti nakipeobrazovaniya v trubakh teploobmennyykh apparatov [Features of scale formation in heat exchange apparatus pipes [Features of scale formation in heat exchanger pipes], *Vestnik YuUrGU. Ser. Energetika*, 2022, No 1, pp. 97–105. DOI: 10.14529/power220111
4. Obot, I.B., Under-Deposit Corrosion on Steel Pipeline Surfaces: Mechanism, Mitigation and Current Challenges, *J. Bio. Tribo. Corros.*, 2021, V. 7, Issue 2, Art. 49. URL: <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00485-9>
5. Bannyh, O.P., *Osnovnye konstruktsii i teplovoi raschet teploobmennikov* [Basic structures and thermal calculation of heat exchangers], St Petersburg: SPbNIU ITMO, 2012, 42 p.
6. Galkovsky, V.A., Chupova, M.V., Analiz snizheniya koeffitsienta teploperedachi teploobmennyykh apparatov vsledstvie zagryazneniya poverkhnosti [Analysis of the decrease in the heat transfer coefficient of heat exchange devices due to surface contamination], *Naukovedenie*, 2017, V. 9, No 2 (March–April). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN217.pdf> (reference date 31/08/2025).
7. Gnedenkov, S.V., Sinebryukhov, S.L., Minaev, A.N., Mashtalyar, D.V., Gordienko, P.S., Vliyanie pokrytiy na intensivnost protsessov soletozheniya [Influence of coatings on the intensity of salt deposition processes], *Issledovano v Rossii*, V. 6, Moscow: MFTI, 2003, pp. 1780–1790. URL: <http://web.archive.org/web/20040320051934/http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2003/146.pdf> (reference date 31/08/2025).
8. Ramezanzadeh, B., Moghadam, M.H.M., Shohani, N., Mahdavian, M., Effects of highly crystalline and conductive polyaniline / graphene oxide composites on the corrosion protection performance of a zinc-rich epoxy coating, *Chemical Engineering Journal*, 2017, No 320, pp. 363–375. DOI: 10.1016/j.cej.2017.03.061. EDN: YXJCLP.

9. Sharifi, E., Ranjbar, Kh., Dezincification assisted cracking of yellow brass tubes in a heat exchange, *Engineering Failure Analysis*, 2022, V. 136, p. 106200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2022.106200>
10. Li, H., Liu H., Wang G., Zhang X., Chen T., Yu Y., Yao H., Review on Erosion-wear and Protection of Heat Exchange Surface in Power Station Boilers, *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2023, V. 43, No 5, pp. 957–970.
11. Sander, J., et al., *Korrosionsschutz durch Beschichtungen*, Hannover: Vincentz Verlag, 2011.
12. Asadi, N., Naderi, R., Mahdavian, M., Doping of zinc cations in chemically modified halloysite nanotubes to improve protection function of an epoxy ester coating, *Corros. Sci.*, 2019, No 151, pp. 69–80. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.02.022. EDN: WAGAGG.
13. Stepin, S.N., Tolstosheeva, S.I., Svetlakov, A.P., Protektornye tsinkonapolnennyye gruntovki. Vliyanie komponentov na protivokorroziionnyuyu effektivnost. Ch. 1 [Effect of components on anticorrosive efficiency. Part 1], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, V. 19, No 9, pp. 122–128.
14. Drinberg, A.S., Itsko, E.F., Kalinskaya, T.V., *Antikorroziionnye gruntovki* [Anticorrosion primers], St Petersburg NIPROINS LKM i PSOP, 2006.
15. Pavlovich, A.V., Vladenkov, V.V., Izyumsky, V.N., Zinc-filled anti-corrosion primers, *Lakokrashnaya promyshlennost*, 2010, No 3, pp. 38–46.
16. Andreeva, S.A., Tyurina, S.A., Dalskaya, G.Yu., Izuchenie kinetiki vysvobozhdeniya funktsionalnykh dobavok iz mikrokapsul [Study of the kinetics of functional additives release from microcapsules], *Proceedings of the conference "Perspektivnye materialy i tekhnologii (PMT-2023)"*, A.N. Yurasov (Ed.), Moscow: MIREA, 2024, V. 1, pp. 319–325. EDN OHIDZS
17. Rashutin, N.A., Tyurina, S.A., Demin, V.L., Sidorova, S.A., Podkhody k izmeneniyu zashchitnykh svoystv polimernykh pokrytiy pri ispolzovanii modifitsiruyushchikh dobavok [Approaches to changing the protective properties of polymer coatings using modifying additives], *Butlerovskie soobshcheniya*, 2023, V. 76, No 12, pp. 42–50. DOI 10.37952/ROI-jbc-01/23-76-12-42. EDN QUNLAS
18. Rashutin, N.A., Tyurina, S.A., Vliyanie funktsionalnykh dobavok na protsess nakipeobrazovaniya zashchitnykh polimernykh pokrytiy [The effect of functional additives on the scale formation process of protective polymer coatings], *Proceedings of the conference "Opticheskie tekhnologii, materialy i sistemy"*, Moscow: MIREA, 2022, pp. 311–314. EDN BPKSZX
19. Gnedenkov, S.V., Minaev, A.N., Lysenko, L.V., Shatalov, V.K., Shapkina, E.I., Lysenko, S.L., Issledovanie nakipeobrazovaniya v perspektivnykh forsirovannykh teploobmennyykh sistemakh [Study of scale formation in advanced forced heat exchange systems], *Naukoemkie tekhnologii*, 2013, V. 7, pp. 26–34.
20. Golovin, V.A., Shchelkov, V.A., Rashutin, N.A., Tyurina, S.A., Demin, V.L., Mikrokapulirovannyye i aktivnyye dobavki dlya povysheniya antinakipnykh svoystv polimernykh protivokorroziionnykh pokrytiy [Microencapsulated and active additives for improving the anti-scale properties of polymer anti-corrosion coatings], *Korroziya: zashchita materialov i metody issledovaniy*, 2023, No 4, pp. 131–141. URL: <https://doi.org/10.61852/2949-3412-2023-1-4-131-141>
21. Golovin, V.A., Tyurina, S.A., Microencapsulation of corrosion inhibitors and active additives for anticorrosive protective polymer coatings, *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2019, V. 8, No 2, pp. 179–198. DOI: 10.17675/2305-6894-2019-8-2-2. EDN VQWFAB
22. Bakhvalov, A.V., Opredelenie soderzhaniya fosfonatov v tekhnologicheskoy vode kosvennym kolorimetricheskim metodom s primeneniem dvukh gradirovannykh zavisimostey [Determination of phosphonates in process water by an indirect colorimetric method using two calibration curves], *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2021, No 11 (168). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-soderzhaniya-fosfonatov-v-tehnologicheskoy-vode-kosvennym-kolorimetricheskim-metodom-s-primeneniem-dvuh-gradirovannykh> (reference date 18/12/2024).
23. Sidorova, S.A., Dalskaya, G.Yu., Tyurina, S.A., Demenkov, A.S., Sakharov, M.V., Issledovanie morfologii mikrokapsul, primenyaemykh dlya modifikatsii antikorroziionnykh polimernykh pokrytiy [Study of the morphology of microcapsules used for modifying anti-corrosion polymer coatings], *Proceedings of the conference of IPTIP RTU MIREA "Perspektivnye materialy i tekhnologii (PMT-2024)"*, Moscow: MIREA, 2024.

**EFFECT OF SILICON DIOXIDE OBTAINED BY GAS-PHASE AND PRECIPITATION METHODS
ON THE PROPERTIES OF UNSATURATED POLYESTER RESIN**

E.A. ARTAMONOV, Cand. Sc (Eng), K.N. RYABUKHA, L.A. SMYSLOVA

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

Received March 10, 2025

Revised April 4, 2025

Accepted April 11, 2025

Abstract—The strength properties of unsaturated polyester resin grade PN-609-21M were studied depending on the concentration of two types of silicon dioxide, as well as their influence on the technological properties of the resin.

Keywords: unsaturated polyester resin (UPR), synthetic silica, compressive strength, viscosity, formulation

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-156-163

REFERENCES

1. National standard GOST 27952–88: *Smoly poliefirnye nenasyshchennye. Tekhnicheskie usloviya* [Polyester unsaturated resins. Technical specifications], Moscow: Izd-vo standartov, 1989.
2. Merkulov, D.A., *Kompozitsionnye stroitelnye materialy na osnove poliefirnoi smoly PN-609–21M* [Composite building materials based on polyester resin PN-609-21M]: thesis for the degree of Candidate of ... Sciences (Eng), Saransk: Ogarev State University of Mordovia, 2017, pp. 7–9, 13.
3. Kutishcheva, E.S., Usoltseva, I.O., Perederin, Yu.V. *Sposoby polucheniya vysokodispersnogo dioksida kremniya* [Methods for producing highly dispersed silicon dioxide], *Polzunovsky vestnik*, 2021, No 2, pp. 188–193.
4. National standard GOST 14922–77: *Aerosil. Tekhnicheskie usloviya* [Aerosil. Technical specifications], corrected: No 2 (1986), 3 (1987) and 4 (1990).
5. Timoshchik, O.A., Shchelokova, E.A., Kasikov, A.G., *Vliyanie usloviy polucheniya amorfnogo kremnezema zol-gel metodom na ego svoystva* [Influence of the conditions for obtaining amorphous silica by the sol-gel method on its properties], *Khimiya i materialovedenie*, 2019, No 3, pp. 368–374.
6. TU 2168-002-14344269–09: *Kovelos (dioksid kremniya osazhdenny). Tekhnicheskie usloviya* [Kovelos (precipitated silicon dioxide). Technical specifications].
7. National standard GOST 25271–93: *Plastmassy. Smoly zhidkie, emulsii ili dispersii. Opredelenie kazhushcheysya vyazkosti po Brukfildu* [Plastics. Resins, liquid, emulsions and dispersions. Determination of apparent viscosity according to Brookfield].
8. Vasyalina, A.A., Ozhiganov, V.V., Bakunin, D.O., Ilyin, A.A., *Uluchshenie dispergiruemosti vodnodispersionnoi gruntovki* [Improving the dispersibility of water-based primer], *Ot khimii k tekhnologii shag za shagom*, 2022, V. 3, No 4, pp. 15–18.
9. OST 5.9616–85: *Stekloplastiki poliefirnye dlya sudostroeniya. Tipovye tekhnologicheskie protsessy formovaniya* [Polyethylene fiberglass for shipbuilding. Typical molding processes].
10. National standard GOST 4651–2014: *Plastmassy. Metody ispytaniya na szhatie* [Plastics. Compression testing methods].
11. Starokadomsky, D.L., *Vliyanie usileniya termokhimstoikosti epoksimkompozitov, a takzhe adgezii k stali i drugikh prochnostnykh svoystv v zavisimosti ot udelnoi poverkhnosti nanokremnezemov v ryadu 60–450 m²/g pri 1 mas.% napolneniya* [The effect of increasing the thermochemical resistance of epoxy composites, as well as adhesion to steel and other strength properties, depending on the specific surface area of nanosilica in the range of 60–450 m²/g at 1 wt.% of filling], *Plasticheskie massy*, 2018, No 11–12, pp. 53–55.
12. Starokadomsky, D.L., *Vliyanie aerosilov razlichnoi udelnoi poverkhnosti na khimicheskuyu stoikost epoksipolimera v kontsentrirovannoi azotnoi kislote* [Effect of aerosils with different specific surface areas on the chemical resistance of epoxide polymer in concentrated nitric acid], *Plasticheskie massy*, 2010, No 6, pp. 27–33.

13. Mokina, E.S., Shein, A.B., Issledovanie vliyaniya udelnoi poverkhnosti tekhnicheskogo ugleroda na tekhnologicheskie i fiziko-mekhanicheskie svoistva rezin [Study of the effect of the specific surface area of technical carbon on the technological and physical-mechanical properties of rubber], *Vestnik Permskogo universiteta*, 2013, Is. 3, No 11, pp. 75–80.

UDC 678.686:539.421.5

FEATURES OF THE INFLUENCE OF POLYSULFONE ON LOW-TEMPERATURE IMPACT VISCOSITY OF EPOXY RESIN

Yu.Yu. FEDOROV, Cand Sc. (Eng), N.V. SHADRINOV, Cand Sc. (Eng)

*Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1 Oktyabrskaya St, 677891 Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation.*

E-mail: yuristan@yandex.ru

Received March 5, 2025

Revised March 27, 2025

Accepted April 11, 2025

Abstract—The effect of polysulfones of the PSF-150 and PSF-180 grades as a thermoplastic modifier on the impact strength of epoxy resin ED-20 in the temperature range from –60 to 20°C was studied. The evolution of the structural and morphological organization of the epoxy composition with an increase in the concentration of polysulfone was studied using scanning electron microscopy. It was shown that at a concentration of 20 phr, a phase structure is formed in which thermoplastic polysulfone becomes a continuous matrix, which provides a significant increase in impact strength in a wide range of temperatures, including extremely low values down to –60°C.

Keywords: epoxy resin, polysulfone, thermoplastic modifier, phase structure, impact strength, low temperature

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-164-172

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No 122011100162-9) using scientific equipment of the Center for Collective Use of the FRC “Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”.

REFERENCES

1. Kerber, M.L., Vinogradov, V.M., *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoistva, tekhnologiya* [Polymer composite materials: structure, properties, technology], St Petersburg: Professiya, 2009.
2. Mikhailin, Yu.A., *Konstruktsionnye polimernye kompozitsionnye materialy* [Structural polymer composite materials], St Petersburg: NOT, 2008.
3. Zagora, A.G., Tkachuk, A.I., Terekhov, I.V., Mukhametov, R.R., *Metody khimiches-koi modifikatsii epoksidnykh oligomerov* [Methods of chemical modification of epoxy oligomers]: review, *Trudy VIAM*, 2021, No 7 (101), pp. 73–85.
4. Babaevsky, P.G., Kulik, S.G., *Treshchinostojkost otverzhdennykh polimernykh kompozitsiy* [Crack resistance of cured polymer compositions], Moscow: Khimiya, 1991.
5. Irzhak, V.I., *Epoksidnye polimery i kompozity s epoksidnoi matritsei* [Epoxy polymers and composites with epoxy matrix], Moscow: RAN, 2022.
6. Osipov, P.V., Osipchik, V.S., Smotrova, S.A., Saveliev, D.N., *Regulirovanie svoistv napolnennykh epoksidnykh oligomerov* [Regulation of the properties of filled epoxy oligomers], *Plastiches-kie massy*, 2011, No 4, pp. 3–5.
7. Chursova, L.V., Panina, N.N., Grebeneva, T.A., Kutergina, I.Yu., *Epoksidnye smoly, otverditeli, modifikatory i svyazuyushchie na ikh osnove* [Epoxy resins, hardeners, modifiers and binders based on them], St Petersburg: Professiya, 2020.
8. Shirshova, E.S., Tatarintseva, E.A., Plakunova, E.V., Panova, L.G., *Izuchenie vliya-niya modifikatorov na svoistva epoksidnykh kompozitsiy* [Study of the effect of modifiers on the properties of epoxy compositions], *Plasticheskie massy*, 2006, No 12, pp. 34–36.

9. Kumar, R., Kumar, K., Sahooc, P., Bhowmik, S., Study of mechanical properties of wood dust reinforced epoxy composite, *Procedia Materials Science*, 2014, No 6, pp. 551–556.
10. Plakunova, E.V., Tatarintseva, E.A., Mostovoi, A.S., Panova, L.G., Struktura i svoistva epoksidnykh termoreaktoplastov [Structure and properties of epoxy thermosets], *Perspektivnye materialy*, 2013, No 3, pp. 57–62.
11. Sadygov, Sh.F., Ishchenko, N.Ya., Agaeva, S.A., Modifikatsiya ED-20 glitsidnymi efirmami nekotorykh benzoinykh kislot [Modification of ED-20 with glycidal esters of non-benzoic acids], *Plasticheskie massy*, 2008, No 3, pp. 24–26.
12. Oyanguren, P.A., Galante, M.J., Andromaque, K., et al., Development of bicontinuous morphologies in polysulfone-epoxy blends, *Polymer*, 1999, V. 40, pp. 5249–5255.
13. Solodilov, V.I., Korokhin, R.A., Gorbatkina, Yu.A., Kuperman, A.M., Organo-plastiki na osnove slozhnykh gibridnykh matrits, vklyuchayushchikh v kachestve modifikatorov epoksidnykh smol polisulfon i uglirodnye nanotrubki [Organoplastics based on complex hybrid matrices, including polysulfone and carbon nanotubes as epoxy resin modifiers], *Khimicheskaya fizika*, 2012, V. 31, No 6, pp. 63–71.
14. Kopitsyna, M.N., Bessonov, I.V., Kotomin, S.V., Treshchinostokost epoksidnykh svyazuyushchih, modifitsirovannykh termoplastichnym polisulfonom i furfuralsetonovoi smoloi [Crack resistance of epoxy binders modified with thermoplastic polysulfone and furfural acetone resin], *Inzh. zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, No 12 (60).
15. Buznik, V.M., Vasilevich, N.I., Materialy dlya osvoeniya arkticheskikh territoriy – vyzovy i resheniya [Materials for the development of Arctic territories – challenges and solutions], *Lab. i proizvod.*, 2020, No 1 (11), pp. 98–107.
16. Fedorov, Yu.Yu., Shadrinov, N.V., Vasiliev, S.V., Savvina, A.V., Influence of Thermoplastic Elastomer Filler on Impact Viscosity of Epoxy Resin at Low Temperatures, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2023, V. 14, No 4, pp. 1007–1012.
17. Tretyakov, I.V., Vyatkina, M.A., Cherevinsky, A.P., Solodilov, V.I., Shapagin, A.V., Korokhin, R.A., Budylin, N.Yu., Kireinov, A.V., Gorbatkina, Yu.A., Vliyanie poliefirsulfona na svoistva epoksidnogo svyazuyushchego i namotochnykh stekloplastikov na ego osnove [The effect of polyethersulfone on the properties of epoxy binders and windable fiberglass based on it], *Izvestiya RAN: Ser. fizicheskaya*, 2021, V. 85, No 8, pp. 1132–1136.
18. Lobanov, M.V., Gulyaev, A.I., Babin, A.N., Povyshenie udaro- i treshchinostokosti epoksidnykh reaktoplastov i kompozitsiy na ikh osnove s pomoshchyu dobavok termoplastov kak modifikatorov [Increasing the impact and crack resistance of epoxy reactoplastics and compositions based on them using additives of thermoplastics as modifiers], *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. B*, 2016, V. 58, No 1, pp. 3–15.
19. Petrova, T.V., Tretyakov, I.V., Kireynov, A.V., Shapagin, A.V., Budylin, N.Y., Alexeeva, O.V., Beshtoev, B.Z., Solodilov, V.I., Yurkov, G.Y., Berlin, A.A., Structure and Properties of Epoxy Polysulfone Systems Modified with an Active Diluent, *Polymers (Basel)*, 2022, No 14 (23).
20. Yoon, T., Kim, B.S., Lee, D.S., Structure development via reaction-induced phase separation in tetrafunctional epoxy/polysulfone blends, *Journal Applied Polymer Science*, 1997, V. 66, pp. 2233–2242.
21. Solodilov, V.I., Shapagin, A.V., Korokhin, R.A., Gorbatkina, Yu.A., Vliyanie temperatury otverzhdeniya na fazovye ravnovesiya, morfologiyu, treshchino- i udarostokost epoksipolisulfonovykh smesei i armirovannykh plastikov na ikh osnove [The effect of the curing temperature on phase equilibria, morphology, crack and impact resistance of epoxypolisulfone mixtures and reinforced plastics based on them], *Klyuchevye trendy v kompozitakh: nauka i tekhnologii: Proc. Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2019, pp. 691–702.
22. Shapagin, A.V., Budylin, N.Y., Chalykh, A.E., Regulation of a phase structure at the interface in epoxy–polysulfone systems, *Russ. Chem. Bull.*, 2018, V. 67, pp. 2172–2177.
23. Mikhailin, Yu.A., *Teplo-, termo- i ognestokost polimernykh materialov* [Heat, thermo, and exhaust gas instability of polymer materials], St Petersburg: NOT, 2011.
24. Tarasevich, B.N., *IK-spektry osnovnykh klassov organicheskikh soedineniy. Spravochnye materialy* [IR spectra of the main classes of organic compounds]: Reference materials, Moscow: MGU, 2012.
25. Kuptsov, A.H., Zhizhin, G N., *Fourie-KR i Fourie-IR spektry polimerov* [Fourier-Raman and Fourier-IR specters of polymers], Moscow: Tekhnosfera, 2013.

UDC 621.791.92:621.78.08:621.039.534

STUDY OF THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT AND THERMOKINETIC COOLING CONDITIONS OF DEPOSITED METAL Fe_{0.09}C₃₁Cr₈Ni₂Mo ON THE FORMATION OF ITS PHASE COMPOSITION

I.S. GRIGORIEV¹, S.N. GALIATKIN¹, Cand Sc. (Eng), E.A. VASILIEVA¹, V.M. KARPOV²

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

² St Petersburg State Marine Technical University", 3 Lotsmanskaya St, 190121 St Petersburg, Russian Federation

Received April 21, 2025

Revised April 23, 2025

Accepted April 30, 2025

Abstract—The paper presents the study of the structure of the deposited metal Fe_{0.09}C₃₁Cr₈Ni₂Mo at different cooling rates. The research was carried out using the EBSD analysis method in the initial state after surfacing. The effect of post weld heat treatment on the resulting percentage of γ/σ phases in the deposited metal, depending on the percentage of γ/σ phases in the before heat treatment state is considered. The ways of improving the performance characteristics of the metal deposited with materials such as Fe_{0.09}C₃₁Cr₈Ni₂Mo to a temperature of 350–400°C are proposed.

Keywords: friction pair assemblies, pipe valves, Fe_{0.09}C₃₁Cr₈Ni₂Mo, duplex steels, hardness, dilatometric studies, EBSD analysis

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-173-183

REFERENCES

1. National standard GOST R 59023.4–2020: *Svarka i naplavka oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Trebovaniya k podogrevu pri svarke (naplavke)* [Welding and surfacing of equipment and pipelines of nuclear power plants. Requirements for preheating during welding (surfacing)].
2. Belov, Yu.M., Krasavchikov, V.A., Novy material dlya naplavki uplotnitelnykh poverkhnostei armatury, rabotayushchei v agressivnykh sredakh [New material for surfacing the sealing surfaces of armature working in aggressive environments], Leningrad: LDNTP, 1972.
3. National standard GOST R 59023.1–2020: *Svarka i naplavka oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Materialy, primenyaemye dlya vypolneniya svarnykh soedineniy i naplavo* [Welding and surfacing of equipment and pipelines for nuclear power plants. Materials used for welding and surfacing].
4. ST TsKBA 053-2008: *Armatura truboprovodnaya. Naplavka i kontrol kachestva naplavlennykh poverkhnostey. Tekhnicheskie trebovaniya* [Pipeline fittings. Welding and quality control of welded surfaces. Technical requirements].
5. NP-068-05: *Federalnye normy i pravila v oblasti ispolzovaniya atomnoi energii. Truboprovodnaya armatura dlya atomnykh stantsiy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [Federal norms and regulations in the field of nuclear energy use. Pipe fittings for nuclear power plants. General technical requirements].
6. Kozhin, M.V., Kuskov, V.N., Galinsky, A.A., Kopysov, G.A., *Primenenie spechennoi lenty LS-09H31N8AM2 v kachestve antifriktsionnogo materiala podshipnikov nasosov atomnykh reaktorov i sudovykh ustanovok* [Application of sintered LS-09H31N8AM2 tape as an antifriction material for pump bearings in nuclear reactors and marine installations], Tyumensky gosudarstvennyy neftegazovyy universitet, 2015, Is. 8, pp. 110–113.
7. Vicente, A., Botelho Junior, A.B., Croce, D.E.R., et al., Effect of Relative Plate Thickness in the Heat Flow and Cooling Rate during Welding of Super Duplex Stainless Steel, *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 2020, V. 5 (5), pp. 244–250.
8. National standard GOST R 59023.6–2020: *Svarka i naplavka oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Naplavka uplotnitelnykh i napravlyayushchikh poverkhnostey* [Welding

and surfacing of equipment and pipelines for nuclear power plants. Surfacing of sealing and guiding surfaces].

9. Musienko, A.Yu., Leonov, V.P., Kozlova, I.R., Petrov, S.N., *Matematicheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v titanovykh splavakh s uchetom mikrostruktury i rezultatov izmereniy kristallograficheskikh orientirovok metodom EBSD-analiza* [Mathematical modeling of the stress-strain state in titanium alloys, taking into account the microstructure and the results of measurements of crystallographic orientations using the EBSD analysis method], *Voprosy materialovedeniya*, 2017, No 4 (92), pp 219–234.

10. Karlsson, L., Intermetallic phase precipitation in duplex stainless steels and weld metals metallurgy, influence on properties and welding aspects, *Welding in the World*, 1999, V. 43/5, pp. 20–40.

11. Charles, J., The duplex stainless steels: materials to meet your needs, *Proceedings of the Conference "Duplex stainless steels'91"*, Beaune, 1991.

12. Vicente, A., Dos Santos, I.L., Botelho Junior, A.B., Crocce, D.E.R., Tenório, J.A.S., Study of the Distribution of Cr, Mo, Ni and N in δ -Ferrite and Austenite in Duplex Stainless Steels, *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 2020, V. 5 (4), pp. 156–162.

13. Topolska, S., Łabanowski, J. Effect of microstructure on impact toughness of duplex and superduplex stainless steels, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2009, V. 36/2, pp. 142–149.

UDC 621.791.927.5:621.039.536.2

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE FUSION ZONE OF ANTI-CORROSION COATING MADE BY PULSE ARGON ARC SURFACING ON CR–MO–V STEEL

G.B. FOMIN, Yu.M. MARKOVA, I.A. MOROZOVSKAYA, Cand Sc. (Eng),
M.N. TIMOFEEV, Cand Sc. (Eng)

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

Received August 15, 2025

Revised September 3, 2025

Accepted September 11, 2025

Abstract—The paper presents results of metallographic examinations, measurement of microhardness and analysis of diffraction of back scattered electrons in a zone of fusing of the anticorrosive cladding, which was executed in the pulse inert gas on heat resistant Cr–Mo–V steel by metal arc welding. Interrelation of distribution of values of microhardness on the metal of underclad zone with its structure of parameters of PWHT is established.

Keywords: anticorrosive deposition, pulse inert gas welding, fusion zone, heat resistant Cr–Mo–V steel, microstructure, microhardness, EBSD-analysis

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-184-195

REFERENCES

1. Balandin, Yu.F., Gorynin, I.V., et al., *Konstruktsionnye materialy AES* [NPP construction materials], Moscow: Energoatomizdat, 1984.

2. Tsukanov, V.V., *Sovremennye stali i tekhnologii v energomashinostroyenii* [Modern Steels and Technologies in Power Engineering], St Petersburg: Professional, 2014.

3. Teplukhina, I.V., Bogdanov, V.I., Zaitseva, O.Yu., Shamrai, E.L., Tsvetkov, A.S., Issledovanie mekhanicheskikh svoystv i struktury metalla krupnogabaritnoi obechaiki iz stali tipa 15Kh2MFA [Study of the mechanical properties and metal structure of a large-sized shell made of 15Kh2MFA steel], *Metallurg*, 2017, No 9, pp. 71–77.

4. Ardentov, V.V., Ivanov, K.M., Shamanin, M.V., Issledovanie svoystv zony splavleniya teploustoichivoi perlitnoi stali s austenitnym metallom shva razlichnogo sostava [Study of the properties of the fusion zone of heat-resistant perlite steel with austenitic weld metal of various compositions], *Svarka*, Leningrad: Sudpromgiz, 1962, Is. 5, pp. 60–72.

5. Kashirsky, Yu.V., Degtyarev, A.F., Menshova, N.F., *Svoistva konstruktsionnykh materialov atomnoi promyshlennosti. T. 1: Korpusnye materialy dlya AES* [Properties of structural materials for the nuclear industry. V. 1: Housing materials for nuclear power plants]: Handbook, Moscow: Filin, 2006.
6. Gorynin, I.V., Karzov, G.P., Galyatkin, S.N., Mikhaleva, E.I., Morozovskaya, I.A., Antikorrozionnaya naplavka. Opyt primeneniya i puti sovershenstvovaniya [Anti-corrosion surfacing. Application experience and improvement paths], *Voprosy materialovedeniya*, 2005, No 2 (42), pp. 129–143.
7. Aleksandrov, M.A., Borduchenko, Yu.L., Perspektivy atomnogo ledokolnogo flota po osvoeniyu Severnogo morskogo puti [Prospects for the Nuclear Icebreaker Fleet in the Development of the Northern Sea Route], *Morskoi vestnik*, 2021, No 2 (78), pp. 17–23.
8. Kashtanov, A.D., Teplukhina, I.V., Tsvetkov, A.S., *Kompleks konstruktsionnykh materialov i tekhnologii dlya korpusov reaktorov perspektivnykh AEU* [Complex of structural materials and technologies for reactor housings of advanced nuclear power plants], Reports of the international conference “Materialy i tekhnologii dlya Arktiki”, St Petersburg: NRC Kurchatovsky institut – CRISM “Prometey”, 2017, pp. 102–105.
9. Lebedev, V.A., Zhuk, G.V., Loy, S.A., Osnovnye ekspluatatsionnye kharakteristiki svarnogo soedineniya i naplavlennogo sloya pri elektrodugovoy svarke-naplavke s impulsnoi podachei elektrodnoi provoloki [Main performance characteristics of the welded joint and the deposited layer during electric arc welding and surfacing with a pulse supply of electrode wire], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2021, No 4, pp. 35–43.
10. Karasev, M.V., Kolodyazhny, D.Yu., Fediukin, S.V., Problemy i perspektivy impulsno-dugovoi svarki plavyashchimsya elektrodom v zashchitnom gaze [Problems and prospects of pulse-arc welding with a consumable electrode in a protective gas], *Svarka i diagnostika*, 2018, No 5, pp. 60–62.
11. Morozovskaya, I.A., Timofeev, M.N., Fomin, G.B., Kotillo, M.S., Issledovanie struktury i svoystv naplavlennogo antikorrozionnogo pokrytiya oborudovaniya sudovykh reaktornykh ustanovok iz Cr–Mo–V stali, vypolnennogo impulsnym argonodugovym sposobom [Study of the structure and properties of the welded anti-corrosion coating of ship reactor equipment made of Cr–Mo–V steel using the pulse argon-arc method], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2025, No 3, pp. 2–10.

UDC 621.039.54:620.17

A METHOD OF DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND TRUE STRESS-STRAIN CURVE FOR FUEL CLADDING MATERIAL BY RING SPECIMENS TESTING.

Part 1. Analysis of existing methods and development of new ones

V.N. FOMENKO, Cand Sc. (Eng), B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), F.L. SHISHKOV

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

Received February 25, 2025

Revised April 10, 2025

Accepted May 15, 2025

Abstract—Various types of specimens machined from fuel claddings are considered and methods of their tests are analyzed. The disadvantages and advantages of existing methods are considered from point of view of obtaining adequate mechanical properties for highly embrittled materials. On the basis of the performed analysis and calculations the new ring specimen is proposed and the method of its testing and processing of experimental data is developed which takes into account the friction between the loading device and specimen and allows determining the mechanical properties and obtaining the true stress-strain curve for fuel cladding materials.

Keywords: fuel claddings, mechanical properties, test scheme, true stress-strain curve, research method

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-196-209

ACKNOWLEDGMENTS

This article has been prepared to substantiate the national standard “Rapid assessment of radiation resistance of structural materials irradiated in ion accelerator. Methods of testing metals.”

REFERENCES

1. National Standard GOST 10006-80: *Truby metallicheskie. Metod ispytaniy na rastyazhenie* [Metallic Tubes. Tension Testing Method].
2. National standard GOST 19040-81: *Truby metallicheskie. Metod ispytaniya na rastyazhenie pri povyshennykh temperaturakh* [Metallic Tubes. Elevated Temperature Tension Testing Method].
3. ASTM E 8/E8M-09: *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
4. ASTM E 21-09: *Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials*.
5. National standard GOST 1497-84: *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie* [Metals. Tensile testing methods].
6. Le Saux, M., Besson, J., Carassou, S., et al., A model to describe the anisotropic viscoplastic mechanical behavior of fresh and irradiated Zircaloy-4 fuel claddings under RIA loading conditions, *Journal of nuclear materials*, 2008, V. 378, pp. 60–69.
7. Sinelnikov L.P., Averin S.A., Kozlov A.V., et al., Oborudovanie i metodiki poslereaktornykh issledovaniy materialov v komplekse kamer AO IRM [Equipment and methods for post-reactor studies of materials in a complex of protective chambers of JSC IRM], *Atomnaya energiya*, 2016, V. 121, No 4, pp. 187–194.
8. Josefsson, B., Grigoriev, V., Modified ring tensile testing and a new method for fracture toughness testing of irradiated cladding, *Studsvik material AB*, S-61182, 1996.
9. Arsene, S., Bai, J., A new approach to measuring transverse properties of structural tubing by a ring test, *Journal of testing and evaluation*, 1996, V. 24, No 6, pp. 386–391.
10. Cohen, A.B., Majumdar, S., Ruther, W.E., *Modified ring stretch tensile testing of Zr-1Nb cladding*, Summary of paper for 25th Water Reactor Safety Information Meeting, NRC office of Nuclear Regulatory Research, Bethesda, Maryland, October 20–22, 1997.
11. Nagase, F., Sugiyama, T., Fuketa, T., Optimized ring tensile test method and hydrogen effect on mechanical properties of Zircaloy cladding in hoop direction, *Journal of nuclear science and technology*, 2009, V. 46, No 6, pp. 545–552.
12. Samal, M.K., Balakrishnan, K.S., Parashar, J., Tiwar, G.P., Investigation of Deformation Behavior of Ring-Tensile Specimens Machined from Pressure Tubes of Indian PHWR, *Indian Institute of Metals*, 2014, V. 67, No 2, pp. 167–176.
13. Kazakeviciute, J., Rouse, J.P., De Focatiis, D.S.A., Hyde, C.J., The development of a novel technique for small ring specimen tensile testing, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, V. 99, February, pp. 131–139.
14. Kiraly, M., Antok, D.M., Horvath, L., Evaluation of axial and tangential ultimate tensile strength of zirconium cladding tubes, *Nuclear engineering and technology*, 2018, V. 50, pp. 425–431.
15. Nindiyasari, F., Ter Pierick, P., Boomstra, D., Pandit Ring, A.M., Ring tensile test of reference Zircaloy cladding tube as a proof of principle for hotcell setup, *Materials Science, Engineering*, 2018. URL: <https://old.euronuclear.org/events/topfuel/topfuel2018/fullpapers/TopFuel2018-A0254-fullpaper.pdf> (reference date 04/09/2025)
16. Kamerman, D., Cappia, F., Wheeler, K., Development of axial and ring hoop tension testing methods for nuclear fuel cladding tubes, *Nuclear Materials and Energy*, 2022, V. 31, p. 101175.
17. Leontieva-Smirnova, M.V., Izmalkov, I.N., Kostiukhina, A.V., et al., Opredelenie predela tekuchesti stali EK-181 pri ispytaniyakh na rastyazhenie koltsevykh obraztsov [The determination of yield stress of EK-181 steel in tension tests of ring specimens], *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2016, V. 82, No 10, pp. 56–61.
18. STO 086-288-2023: *Obolochki obluchennykh i neobluchennykh tvelov. Vypolnenie izmereniy kharakteristik mekhanicheskikh svoystv pri rastyazhenii koltsevykh obraztsov iz tonkostennykh trub iz stali i splavov* [Cladding of irradiated and unirradiated fuel elements. Measuring the characteristics of mechanical properties during tension of ring specimens made of thin-walled tubes made of steels and alloys], GNTs RF NIIAR, 2023
19. Gurovich, B.A., et al., Improved evaluation of ring tensile test ductility applied to neutron irradiated 42XNM tubes in the temperature range of (500–1100)°C, *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, No 52 (6), pp. 1213–1221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.11.019>

20. Frolov, A.S., Fedotov, I.V., Gurovich, B.A., Evaluation of the true-strength characteristics for isotropic materials using ring tensile test, *Nuclear Engineering and Technology*, 2021, V. 53 (7), pp. 2323–2333. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.01.033>

21. Timoshenko, S.P., Goodyear, J., *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity], 2nd ed., Moscow: Nauka, 1979.

UDC 621.039.54:620.17

A METHOD OF DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND TRUE STRESS-STRAIN CURVE FOR FUEL CLADDING MATERIAL BY RING SPECIMENS TESTING.

Part 2. Numerical and experimental verification

V.N. FOMENKO, Cand Sc. (Eng), B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), F.L. SHISHKOV

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

Received February 25, 2025

Revised April 10, 2025

Accepted May 15, 2025

Abstract—The numerical and experimental verification is performed of the proposed method for determination of standard mechanical properties and the true stress-strain curve for fuel cladding material by ring specimens testing and FEM modeling of their loading (see Part 1 of the article). The tests results of the proposed ring specimens are represented for EP823 steel (12Cr–Mo–W–Si–V–Nb–B) in the initial and irradiated states over a wide temperature range when using various lubricants and without lubrication. Based on the obtained results of these tests, the mechanical properties and true stress-strain curves are determined for EP823 steel.

Keywords: fuel claddings, mechanical properties, test scheme, true stress-strain curve, research method

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-123-3-210-226

ACKNOWLEDGMENTS

This article has been prepared to substantiate the national standard “Rapid assessment of radiation resistance of structural materials irradiated in ion accelerator. Methods of testing metals”.

REFERENCES

1. Enokhov, A.S., *Spravochnik po fizike* [Physics' handbook], Moscow: Prosveshchenie, 1978, p. 85.
2. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Fomenko, V.N., Kostylev, V.I., Dalneishee razvitie modeli Prometey i metoda Unified Curve. Ch. 2. Razvitie metoda Unified Curve [Development of the Prometey model and method of unified curve. Part 2. Unified curve], *Voprosy materialovedeniya*, 2016, No 4 (88), pp. 151–178.