

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Коротовская, С. В., Мельников П. В., Хлусова Е. И. Влияние уровня тепловложения при сварке на формирование структуры и свойств в зоне термического влияния высокопрочной стали с пределом текучести не менее 690 МПа 5

Милюц В. Г., Цуканов В. В. Влияние комплексного модифицирования на содержание газов в судостроительной стали 15

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Нестерова Е. Д., Бобкова Т. И., Гошкодеря М. Е., Каширина А. А., Яковлева Н. В. Микроплазменное напыление функциональных покрытий из механически синтезированных композиционных порошков эквивалентной системы AlNiCoFeCr 24

Геращенко Е. Ю., Барковская Е. Н., Геращенко Д. А., Сердюк Н. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф. Износ- и коррозионно-стойкое наноструктурированное функциональное покрытие, полученное методом высокоскоростного холодного газодинамического напыления 40

Волокитина Е. В., Разумова Л. В., Озерской Н. Е., Борисов Е. В., Разумов Н. Г., Попович А. А. Получение высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMn, легированного азотом, методом селективного лазерного сплавления 47

Журавлева О. А., Воейкова Т. А., Власова А. Ю., Килочек А. И., Никулина Е. А., Цирульников Н. В., Малахов С. Н., Егоров А. С. Разработка новых биоцидных нанокompозитных материалов для защиты подводных конструкций от биообрастания 59

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Злобина И. В., Александрова Д. С., Егоров А. С., Анисимов А. В. Изменение свойств полиэфирэфиркетона и композитов на его основе под воздействием низких температур (Обзор) 71

Анисимов А. В., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Лобынцева И. В., Блышко И. В., Соболев М. Ю., Дворянцев Д. Д., Шарко Е. А. Разработка и исследование нового гибридного антифрикционного полимерного композиционного материала с диэлектрическими свойствами 90

Дворянцев Д. Д., Анисимов А. В., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Сорокина Е. П., Шарко Е. А. Получение препрега методом пропитки водной суспензией термопластичного полимера 100

Борукаев Т. А., Китиева Л. И., Маламатов А. Х. Композиты на основе полибутилентерефталата и вторичного полиэтилентерефталата 111

Тюрина С. А., Демин В. Л., Головин В. А., Щелков В. А., Рашутин Н. А. Современные методы водоподготовки. Накипеобразование в теплотехническом оборудовании 119

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Сараев Ю. Н., Горбач В. Д., Голиков Н. И. Методология совершенствования технологий производства и ремонта судовых конструкций на основе комплексного применения современных технологий, источников питания и сварочных материалов 135

Леонов В. П., Нестеров Д. М., Сахаров И. Ю., Кузнецов С. В. Расчетно-экспериментальное исследование температурных полей при выполнении сварки по наплавке на титановом псевдо-β-сплаве 152

Иголкин А. И., Лебедева Н. В., Максименко И. А. Высокопрочные паяные соединения титановых сплавов 164

Артёмьев А. А., Зорин И. В., Прияткин Д. В., Лысак В. И. Исследование влияния акустических колебаний на структуру и износостойкость наплавленных сплавов системы Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C 173

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Марголин Б. З., Швецова В. А., Сорокин А. А., Пирогова Н. Е., Бучатский А. А., Зернов Э. А. Особенности канального разрушения облученных аустенитных сталей. Часть 1. Экспериментальные исследования 185

Марголин Б. З., Швецова В. А., Зернов Э. А., Сорокин А. А., Пирогова Н. Е., Бучатский А. А. Особенности канального разрушения облученных аустенитных сталей. Часть 2. Модель и критерий канального разрушения 205

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов 225

**ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ С ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ
НЕ МЕНЕЕ 690 МПа**

С. В. КОРОТОВСКАЯ, канд. техн. наук, П. В. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук,
Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 12.02.2024

После доработки 19.02.2024

Принята к публикации 19.02.2024

Выполнены исследования изменения структуры и свойств в зоне термического влияния высокопрочной стали марки E690 в зависимости от уровня погонной энергии при сварке. Даны рекомендации по выбору режимов сварки для предотвращения деградации свойств сварных соединений.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, механизированная и автоматическая сварка, низколегированные сварочные материалы, погонная энергия, зона термического влияния, структура, работа удара, микротвердость
DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-5-14

ЛИТЕРАТУРА

1. Шоршоров М. Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. – М.: Наука, 1965. – 335 с.
2. Шоршоров М. Х., Белов В. В. Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке. – М.: Наука, 1972. – 220 с.
3. Грабин В. Ф., Денисенко А. В. Металловедение и сварка низко- и среднелегированных сталей. – Киев: Наукова думка, 1978. – 276 с.
4. Лившиц Л. С. Металловедение для сварщиков. – М.: Машиностроение, 1979. – 253 с.
5. Рыбаков А. А. Влияние химического состава микролегированной стали и скорости охлаждения металла ЗТВ сварных соединений труб на его структуру и ударную вязкость // Автоматическая сварка. – 2013. – № 9. – С. 10–18.
6. Макаров Э. Л. Сварка и свариваемые материалы. – М.: Металлургия, 1991. – Т. 1. – 528 с.
7. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
8. Хлусова Е. И., Орлов В. В. Изменение структуры и свойств в зоне термического влияния сварных соединений из низкоуглеродистых судостроительных и трубных сталей // Металлург. – 2012. – № 9. – С. 63–76.
9. Ардентов В. В., Малышевский В. А., Правдина Н. Н., Рыбин В. В., Семичева Т. Г. Структура и свойства зоны термического влияния высокопрочной конструкционной стали // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – № 5. – С. 119.
10. Мотовилина Г. Д., Пазилова У. А., Хлусова Е. И. Влияние легирования на структуру и свойства зоны термического влияния сварного соединения из высокопрочной хромоникельмолибденовой стали // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1 (45). – С. 54–63.
11. Liessem A., Erdelen-Peppler M. A critical view on the significance of HAZ toughness testing // Proceedings of IPC2004 International pipeline conference. Calgary. Alberta. Canada. October 4–8, 2004.
12. ГОСТ Р 52927-2023. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия.
13. НД № 2-020101-174. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства.
14. Поздняков В. Д., Завдоев А. В., Гайворонский А. А., Денисенко А. М., Максименко А. А. Влияние режимов импульсно-дуговой сварки на параметры металла шва и ЗТВ сварных соединений, выполненных проволокой Св-08Х20Н9Г7Т // Автоматическая сварка. – 2018. – № 9. – С. 9–15.

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА В СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ

В. Г. МИЛЮЦ, В. В. ЦУКАНОВ, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 5.11.2024

После доработки 13.11.2024

Принята к публикации 17.02.2025

Исследовано поведение газов на этапах производства высокопрочной корпусной стали, изготовленной с применением комплексного материала с РЗМ и стандартной технологии с модифицированием стали феррокальцием. Модифицирование высокопрочной корпусной стали комплексными сплавами с РЗМ и кальцием позволяет значительно снизить содержание водорода в металле. Показано, что содержание азота в стали при использовании каждого из опробованных способов модифицирующей обработки повышается начиная с жидкого металла на разливке вплоть до готовых листов. Содержание кислорода независимо от метода модифицирующей обработки возрастает в жидком металле, включая разливку, после чего существенно снижается в металле слябов и листов.

Ключевые слова: высокопрочная корпусная сталь, модифицирование РЗМ и феррокальцием, водород, азот, кислород в стали

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-15-23

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов А.Н. Водород и азот в стали. – М.: Металлургия, 1968. – 283 с.
2. Водород в стали. / Пер. с англ. / Под ред. Г. Алефельда, И. Фелькля. – М.: Мир, 1981. – Т. 1, 2. – 912 с.
3. Шаповалов В. И., Трофименко В. В. Флокены и контроль водорода в стали. – М.: Металлургия, 1987. – 160 с.
4. Савицкий Е. М., Терехова В. Ф. Металловедение редкоземельных металлов. – М.: Наука, 1975. – 271 с.
5. Влияние редкоземельных элементов на флокеночувствительность конструкционных легированных сталей / А. М. Якушев, Ю. В. Кряковский, Е. И. Тюрин и др. // *Металлург.* – 1961. – № 12. – С. 9–11.
6. Шульте Ю. А. Электрометаллургия стального литья. – М.: Металлургия, 1970. – 224 с.
7. Милюц В. Г., Малахов Н. В., Владимиров Н. Ф., Батов Ю. М. Влияние алюминия и кальция на пластичность толстолистовой судостроительной стали в Z-направлении // *Металлург.* – 2011. – № 2. – С. 58–60.
8. Милюц В. Г., Цуканов В. В., Малыхина О. Ю., Насоновская А. Б., Владимиров А. Г., Голубцов В. А., Левагин Е. Ю. Влияние комплексного модифицирования высокопрочной судостроительной стали на состав и морфологию неметаллических включений // *Вопросы материаловедения.* – 2013. – № 4 (76). – С. 5–14.
9. Милюц В. Г., Владимиров Н. Ф., Батов Ю. М. Развитие технологии производства слитков высокопрочной корпусной стали для изготовления толстых листов. Ч. 1 // *Электрометаллургия.* – 2014. – № 9. – С. 16–22.
10. Милюц В. Г., Цуканов В. В., Петров С. Н., Ефимов С. В. Повышение чистоты корпусной стали, обработанной комплексными модификаторами // *Вопросы материаловедения.* – 2016. – № 3 (87). – С. 14–22.
11. Шуб Л. Г., Усманов Р. Г., Макаров В. В., Лямин О. П. Влияние состава металлошихты на качество стали 25Л // *Литейное производство.* – 2004. – № 6. – С. 6–7.
12. Шуб Л. Г., Макаров В. В., Лямин О. П., Усманов Р. Г. Поведение азота в кислой индукционной плавке // *Металлургия машиностроения.* – 2003. – № 5. – С. 5–6.

МИКРОПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МЕХАНИЧЕСКИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ ЭКВИАТОМНОЙ СИСТЕМЫ AlNiCoFeCr

Е. Д. НЕСТЕРОВА, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, М. Е. ГОШКОДЕРЯ, А. А. КАШИРИНА,
Н. В. ЯКОВЛЕВА

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

Поступила в редакцию 7.08.2024

После доработки 16.09.2024

Принята к публикации 16.09.2024

В представленной работе впервые опробован подход твердофазного легирования многокомпонентной системы применительно к эквиатомной смеси из однофазных порошков Al, Ni, Co, Fe и Cr и микроплазменное напыление покрытий на их основе. Установлено, что в процессе механохимического синтеза образуется композиционный порошок, представляющий собой округлые конгломераты системы «5ме», гранулометрическим распределением от 10 до 110 мкм. Исследования структуры и свойств покрытий показали формирование градиентов микротвердости и элементного состава, однако однородность возрастает с увеличением продолжительности механосинтеза. В покрытиях после механохимического синтеза композиционного порошка в течение 15 мин образуются Fm3m , Im3m и Pm3m фазы, поры располагаются по границам сплетов (пористость 4,8%), в распределении микротвердости удалось выделить две области со значениями микротвердости 600 и 300 HV (менее 10%) со средним отклонением 7%, адгезия к стальной подложке составила 54 МПа.

Ключевые слова: функциональные покрытия, микроплазменное напыление, композиционные порошки, твердофазное легирование, механохимический синтез

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-24-39

ЛИТЕРАТУРА

1. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principle Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes / J. W. Yeh, S. K. Chen, S. J. Lin et al. // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – V. 6, N 8. – P. 299–303.
2. Wang Y. P., Li B. Sh., Heng Zh. F. Solid solution or intermetallics in a high entropy alloy // *Advanced Engineering Materials*. – 2009. – V. 11, N 8. – P. 641–644.
3. Middleburgh S. C., King D. M., Lumpkin G. R. Atomic scale modelling of hexagonal structured metallic fission product alloys // *Royal Society Open Science*. – 2015. – N 2 (4).
4. Zhang Y., Zuo T. T., Tang Z. G., Michael C., Dahmen K. A. Liaw P. K., Lu Z. P. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Progress in Materials Science*. – 2014. – N 61. – P. 1–93.
5. Otto F., Yang Y., Bei H., George E. P. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloy // *Acta Materialia*. – 2013. – N 67 (7). – P. 2628–2638.
6. Greer A. L. Confusion by design // *Nature*. – 1993. – N 366 (6453). – P. 303–304.
7. Zhang Y., Zhou Y. J., Lin J. P., Chen G. L., Liaw P. K. Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys // *Advanced Engineering Materials*. – 2008. – N 10 (6). – P. 534–538.
8. Takeuchi A., Inoue A. Classification of Bulk Metallic Glasses by Atomic Size Difference, Heat of Mixing and Period of Constituent Elements and Its Application to Characterization of the Main Alloying Element // *Materials Transactions*. – 2005. – N 46 (12). – P. 2817–2829.
9. Yang X., Zhang Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys // *Materials Chemistry and Physics*. – 2012. – N 132 (2–3). – P. 133–138.
10. Li X., Feng Y., Liu B., Yi D., Yang X., Zhang W., Chen G., Liu Y., Bai P. Influence of NbC particles on microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – N 778 (6). – P. 485–494.
11. Ang A. S. M., Berndt C. C., Sesso M. L., Anupam A., Kottada R. S., Murty B. S. Plasma-sprayed high entropy alloys: microstructure and properties of AlCoCrFeNi and MnCoCrFeNi // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2015. – N 46. – P. 791–800.

12. Jin B., Zhang N., Yin S. Strengthening behavior of AlCoCrFeNi(TiN) high-entropy alloy coatings fabricated by plasma spraying and laser remelting // Journal of Materials Science & Technology. – 2022. – N 121. – P. 163–173.

13. Li C., Li J. Effect of aluminum contents on microstructure and properties of AlxCoCrFeNi alloys // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – N 504 (1). – P. 515–518.

14. Semikolenov A., Kuznetsov P., Shalnova S., et al., Microstructure Evolution of FeNiCoCrAl1.3Mo0.5 High Entropy Alloy during Powder Preparation, Laser Powder Bed Fusion, and Microplasma Spraying // Materials. – 2021. – No 14.

УДК 621.793.7:621.762.2

ИЗНОСО- И КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ, ПОЛУЧЕННОЕ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА, Е. Н. БАРКОВСКАЯ, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, д-р техн. наук,
Н. А. СЕРДЮК, канд. техн. наук, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ

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

Поступила в редакцию 18.11.2024

После доработки 12.12.2024

Принята к публикации 12.12.2024

Приведены результаты разработки оптимального состава прецизионного сплава на медно-никелевой основе, из которого путем высокоскоростного механосинтеза получены композиционные порошки, поверхность которых плакирована диборидом титана, обладающего высокой микротвердостью. Из полученных таким образом композиционных порошков с помощью высокоскоростного напыления на установке холодного газодинамического напыления ДИМЕТ-3 изготовлены функциональные покрытия. Полученные покрытия имеют высокую микротвердость (24–26 ГПа) и длительный срок эксплуатации (10000 ч) в широком диапазоне положительных и отрицательных температур (от –196 до 720–750°C).

Ключевые слова: композиционный порошок, функциональное покрытие, медно-никелевый сплав, плакированный порошок

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-40-46

ЛИТЕРАТУРА

1. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. – СПб.: Техносфера, 2004.
2. Жабрев В. А., Марголин В. И., Павельев В. С. Введение в нанотехнологию (общие сведения, понятия и определения). Учебное пособие. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – С. 171.
3. Патент на изобретение 2816077 РФ. Способ получения композиционного порошкового материала для нанесения функциональных покрытий с высокой износостойкостью / Фармаковский Б. В., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Быстров Р. Ю., Самоделкин Е. А., Шакиров И. В., Коркина М. А., Бобкова Т. И., 2024.
4. Геращенко Е. Ю., Самоделкин Е. А., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В. Наноструктурированные композиционные порошки для получения защитных покрытий деталей и узлов машиностроения // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 1 (105). – С. 52–59.
5. Бурханов Г. С., Дементьев В. А. Тугоплавкие монокарбиды и дибориды переходных металлов – перспективные компоненты высокотемпературных композиционных материалов // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2 (90). – С. 57–67.
6. Косарев В. Ф., Алхимов А. П. Газодинамическое напыление. Новые технологии и оборудование // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2003. – № 3 (19). – С. 28–30.
7. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. – М.: Физико-математическая литература, 2010. – 536 с.
8. Structure and properties of aluminum coatings obtained by the cold gas-dynamic spraying method / Tushinsky L. I., Plokhov A. V., Mochalina N. S. et al. // Thermophysics and Aeromechanics. – 2006. – V. 13, N. 1. – P. 125–129. DOI 10.1134/S153186990601014X

9. Каширин А. И., Шкодкин А. В. Метод газодинамического напыления металлических покрытий: развитие и современное состояние // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 12 (36). – С. 22–33.
10. Геращенко Д. А., Соболев М. Ю., Марков М. А., Геращенко Е. Ю., Быкова А. Д., Красиков А. В., Макаров А. М. Триботехнические свойства металлокерамических покрытий Al–Sn–Zn–Al₂O₃ для пар трения // Трение и износ. – 2018. – Т. 39. № 6. – С. 669–675.
11. Makarov A. M., Gerashchenkov D. A., Markov M. A., Gerashchenkova E. Yu., Belyakov A. N., Bykova A. D., Aleksandrov S. E. Study of the method of obtaining functional interest-metallic coatings based on Ni-Ti reinforced with WC nanoparticles // Key Engineering Materials. – 2019. – Т. 822. – С. 760–767.
12. Alekseeva E., Shishkova M., Strekalovskaya D., Shaposhnikov N., Gerashchenkov D., Glukhov P. Performance of Ni-based coatings with various additives fabricated by cold gas spraying // Metals. – 2022. – Т. 12. – № 2.
13. Бобкова Т. И. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Климов В. Н. Особенности формирования износостойких покрытий из порошков, полученных с помощью микрометаллургического процесса высокоскоростной закалки расплава // Metallurg. – 2016. – № 10. – С. 91–97.
14. ГОСТ 5272–68. Коррозия металлов. Термины. Дата последнего изменения 23.06.2009 г.
15. Патент RU 2561615. Способ получения композиционного плакированного порошка для нанесения покрытий / Ешметьева Е. Н., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю., Фармаковский Б. В., Юрков М. А., Климов В. Н., Низкая А. В., 2014
16. Маренников Н. В., Геращенко Д. А., Бурканова Е. Ю., Самоделкин Е. А. Разработка технологических подходов получения наноструктурированных композиционных порошков методом сверхскоростного механо-синтеза // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 2 (62). – С. 64–67.
17. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю. Исследование адгезион-ной прочности композиционных армированных покрытий системы металл – неметалл, полученных методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(78). – С. 103–117.
18. Макаров А. М., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф. Оптимизация параметров процесса напыления покрытий методом ХГДН применительно к условиям производства на примере порошка алюминия // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2 (90). – С. 116–123.
19. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Под ред. О. В. Белого, Ж. И. Алферова. – СПб.: Пермьяков С.А., 2015. – 542 с.

УДК 620.1

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CoCrFeNiMn, ЛЕГИРОВАННОГО АЗОТОМ, МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Е. В. ВОЛОКИТИНА, Л. В. РАЗУМОВА, канд. техн. наук, Н. Е. ОЗЕРСКОЙ,
Е. В. БОРИСОВ, канд. техн. наук, Н. Г. РАЗУМОВ, д-р техн. наук,
А. А. ПОПОВИЧ, д-р техн. наук

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: volokitina1606@gmail.com

Поступила в редакцию 5.11.2024

После доработки 5.12.2024

Принята к публикации 10.12.2024

Представлены результаты исследования возможности получения высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMnN_x методом селективного лазерного сплавления. Порошки высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMnN_x (с расчетным содержанием азота x 0,1, 0,2 и 0,5 мас.%) получали методом механического легирования с последующей плазменной сфероидизацией. Процесс компактирования сплавов селективным лазерным сплавлением и их механические свойства исследовали при комнатной и криогенной температурах. При снижении температуры механические свойства сплавов с содержанием азота 0,1 и 0,2 мас.% повышаются соответственно: условный предел текучести – на 27,2 и 63,3%, предел прочности – на 30,8 и 52,7%.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, селективное лазерное сплавление, порошковая металлургия, механическое легирование, аддитивные технологии

ЛИТЕРАТУРА

1. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes / J. W. Yeh et al. // *Adv. Eng. Mater.* – 2004. – V. 6, N 5. – P. 299–303.
2. Yeh J.-W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie. Science des Matériaux.* – 2006. – V. 31, N 6. – P. 633–648.
3. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor et al. // *Materials Science and Engineering A.* – 2004. – V. 375–377, N 1–2 (Spec. iss) . – P. 213–218.
4. Insights into the phase diagram of the CrMnFeCoNi high entropy alloy / M. Laurent-Brocq et al. // *Acta Mater.* – 2015. – V. 88. – P. 355–365.
5. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy / F. Otto et al. // *Acta Mater.* – 2013. – V. 61, N 15. – P. 5743–5755.
6. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy / G. Laplanche et al. // *Acta Mater.* – 2016. – V. 118. – P. 152–163.
7. Progress in additive manufacturing on new materials: A review / N. Li et al. // *J Mater Sci Technol.* – 2019. – V. 35, N 2. – P. 242–269.
8. Selective laser melting of an equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloy: Processability, non-equilibrium microstructure and mechanical property / R. Li et al. // *J Alloys Compd.* – 2018. – V. 746. – P. 125–134.
9. Hierarchical microstructure and strengthening mechanisms of a CoCrFeNiMn high entropy alloy additively manufactured by selective laser melting / Z. G. Zhu et al. // *Scr Mater.* – 2018. – V. 154. – P. 20–24.
10. Fabricating CoCrFeMnNi high entropy alloy via selective laser melting in-situ alloying / P. Chen et al. // *J. Mater Sci Technol.* – 2020. – V. 43. – P. 40–43.
11. Interstitial doping enhances the strength-ductility synergy in a CoCrNi medium entropy alloy / I. Moravcik et al. // *Materials Science and Engineering: A.* – 2020. – V. 781. – P. 139242.
12. Beyramali Kivy M., Kriewall C. S., Asle Zaeem M. Formation of chromium-iron carbide by carbon diffusion in Al_xCoCrFeNiCu high-entropy alloys // *Mater Res Lett.* – 2018. – V. 6, N 6. – P. 321–326.
13. The effect of strain rate on mechanical properties and microstructure of a metastable FeMnCoCr high entropy alloy / Z. F. He et al. // *Materials Science and Engineering: A.* – 2020. – V. 776. – P. 138982.
14. Pitting corrosion of the high-entropy alloy Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.5}Mo_{0.1} in chloride-containing sulphate solutions / Y. L. Chou et al. // *Corros. Sci.* – 2010. – V. 52, N 10. – P. 3481–3491.
15. On the mechanism of extraordinary strain hardening in an interstitial high-entropy alloy under cryogenic conditions / Z. Wang et al. // *J. Alloys Compd.* – 2019. – V. 781. – P. 734–743.
16. Enhancement of vacancy diffusion by C and N interstitials in the equiatomic FeMnNiCoCr high entropy alloy / E. Lu et al. // *Acta Mater.* – 2021. – V. 215. – P. 117093.
17. Ye Y. X. et al. Effect of interstitial oxygen and nitrogen on incipient plasticity of NbTiZrHf high-entropy alloys // *Acta Mater.* – 2020. – V. 199. – P. 413–424.
18. The effect of interstitial carbon on the mechanical properties and dislocation substructure evolution in Fe_{40.4}Ni_{11.3}Mn_{34.8}Al_{7.5}Cr₆ high entropy alloys / Z. Wang et al. // *Acta Mater.* – 2016. – V. 120. – P. 228–239.
19. Nitrogen induced heterogeneous structures overcome strength-ductility trade-off in an additively manufactured high-entropy alloy / M. Song et al. // *Appl Mater Today.* – 2020. – V. 18. – P. 100498.
20. Effect of nitrogen on mechanical properties of CoCrFeMnNi high entropy alloy at room and cryogenic temperatures / M. Klimova et al. // *J. Alloys Compd.* – 2020. – V. 849. – P. 156633.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ БИОЦИДНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОДВОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОТ БИООБРАСТАНИЯ

О. А. ЖУРАВЛЕВА¹, канд. хим. наук, Т. А. ВОЕЙКОВА¹, канд. биол. наук, А. Ю. ВЛАСОВА¹,
А. И. КИЛОЧЕК^{1,2}, Е. А. НИКУЛИНА³, канд. техн. наук, Н. В. ЦИРУЛЬНИКОВА³, д-р хим. наук,
С. Н. МАЛАХОВ¹, канд. хим. наук, А. С. ЕГОРОВ³, канд. хим. наук

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – Курчатовский комплекс НБИКСПТ, 123182, Москва,
пл. Академика Курчатова, 1. E-mail: zhuravlevaolgga@yandex.ru

² ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», 107023, Москва,
ул. Большая Семеновская, 38

³ НИЦ «Курчатовский институт» – Курчатовский комплекс химических исследований,
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Поступила в редакцию 31.07.2024

После доработки 13.01.2025

Принята к публикации 14.01.2025

В НИЦ «Курчатовский институт» проводится работа по созданию антимикробных нанокмозитов, содержащих биогенное коллоидное наносеребро (NPsAg). Биогенные NPsAg получены микробным синтезом с использованием клеток бактерий и раствора AgNO₃ в жидкой и сухой препаративных формах. Для защиты подводных объектов от биообрастания разработан состав, включающий комплексные хелатные соединения переходных металлов Cu, Zn и биогенные NPsAg. Хелаты Cu, Zn синтезированы реакцией комплексообразования, антимикробная активность которых возрастает с введением NPsAg. Установлено, что NPsAg сохраняют стабильность и биоцидный эффект при длительном нахождении в морской воде, что важно для эксплуатации в составе противообрастающих покрытий. Разработана технология введения биоцидных NPsAg в состав полимерных нетканых материалов и ионообменных смол различных типов.

Ключевые слова: биообрастание, комплексные соединения переходных металлов, биогенный синтез наночастиц серебра, нанокмозиты, нетканые материалы, ионообменные смолы

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-59-70

ЛИТЕРАТУРА

1. Yan S., Song G. L., Li Z., Wang H., Zheng D., Cao F., Horynova M., Dargusch M. S., Zhou L. A state-of-the-art review on passivation and biofouling of Ti and its alloys in marine environments // Journal of materials science & technology. – 2018. – V. 34, N 3. – P. 421–435. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.11.021>
2. Garibay-Valdez E., Martínez-Córdova L. R., Vargas-Albores F., Emerenciano M. G., Miranda-Baeza A., Cortés-Jacinto E., Ortiz-Estrada Á. M., Cicala F., Martínez-Porchas M. The biofouling process: The science behind a valuable phenomenon for aquaculture // Reviews in Aquaculture. – 2023. – V. 15, N 3. – P. 976–990. <https://doi.org/10.1111/raq.12770>
3. Schultz M. P., Walker J. M., Steppe C. N., Flack K. A. Impact of diatomaceous biofilms on the frictional drag of fouling-release coatings // Biofouling. – 2015. – V. 31. – P. 759–773. <https://doi.org/10.1080/08927014.2015.1108407>
4. Li L., Hong H., Cao J., Yang Y. Progress in Marine Antifouling Coatings: Current Status and Prospects // Coatings. – 2023. – V. 13. – P. 1893. <https://doi.org/10.3390/coatings13111893>
5. Jiang D., Xue Q., Liu Z., Han J., Wu X. Novel anti-algal nanocomposite hydrogels based on thiol/acetyl thioester groups chelating with silver nanoparticles // New J. Chem. – 2017. – V. 41. – P. 271–277. <https://doi.org/10.1039/C6NJ02246D>
6. Miller R. J., Adeleye A. S., Page H. M., Kui L., Lenihan H. S., Keller A. A. Nano and traditional copper and zinc antifouling coatings: Metal release and impact on marine sessile invertebrate communities // J. Nanopart. Res. – 2020. – V. 22. – P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11051-020-04875-x>
7. Nyabadza A., McCarthy É., Makhesana M., Heidarinnassab S., Plouze A., Vazquez M., Brabazon D. A review of physical, chemical and biological synthesis methods of bimetallic nanoparticles and applications in sensing, water treatment, biomedicine, catalysis and hydrogen storage // Advances in Colloid and Interface Science. – 2023. – P. 103010. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103010>
8. ВКПМ. Национальный биоресурсный центр: [сайт]. URL: <https://vkpm.genetika.ru/>
9. Zhuravliova O. A., Voeikova T. A., Vlasova A. Yu., Malakhov S. N., Patsaev T. D., Vasiliev A. L., Bulushova N.

V., Debabov V. G. Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using the *Shewanella oneidensis* MR-1 Strain. Technological Approaches to Increasing the Production and Creating of Preparative Forms of Biogenic Nanomaterial // Nanobiotechnology Reports. – 2023. – V. 18, N 3. – P. 384–396. <https://doi.org/10.1134/S263516762370026X>

10. Лурье А. А. Сорбенты и хроматографические носители: справочник. – М.: Химия, 1972. – 320 с.

11. ОФС. 1.2.4.0010.18 [Общая фармакопейная статья]. Определение антимикробной активности антибиотиков методом диффузии в агар. – М., 2018. – 28 с.

12. Alsharif S. M., Salem S. S., Abdel-Rahman M. A., Fouda A., Eid A. M., Hassan S. E. D., Mohamed A. A., Awad M. A. Multifunctional properties of spherical silver nanoparticles fabricated by different microbial taxa // Heliyon. – 2020. – V. 6. – № 5. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03943>

УДК 678.073:536.485

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА И КОМПОЗИТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР (ОБЗОР)

И. В. ЗЛОБИНА^{1,2}, канд. техн. наук, Д. С. АЛЕКСАНДРОВА¹, А. С. ЕГОРОВ¹, канд. хим. наук,
А. В. АНИСИМОВ³, д-р техн. наук

¹ ФГУП «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1. E-mail: egorov@irea.org.ru

² Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77. E-mail: zlobinaiv@sstu.ru

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

Поступила в редакцию 23.09.2024

После доработки 7.11.2024

Принята к публикации 7.11.2024

Настоящая работа посвящена обзору исследований, рассматривающих влияние низких и сверхнизких температур на свойства полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) и композитов на его основе. В рассмотренных исследованиях описываются изменения физико-механических, термомеханических, термических и трибологических свойств ПЭЭК при низких температурах, а также влияние различных наполнителей на изменение этих свойств. В приведенных в настоящем обзоре работах анализируются возможности, перспективы и ограничения применения ПЭЭК в условиях постоянного или временного воздействия низких температур. Понимание тенденций, описанных в представленных исследованиях, может помочь при моделировании свойств различных композитов на основе ПЭЭК и проектировании изделий, предназначенных для применения при пониженных температурах.

Ключевые слова: полиэфирэфиркетон, композитные материалы, пониженные температуры, физико-механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-71-89

ЛИТЕРАТУРА

1. Review of composite materials and applications / M. Bhong et al. // Materials Today: Proceedings, 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2023.10.026.

2. Structural, thermal, and mechanical characterisation of PEEK-based composites in cryogenic temperature / M. Nikonovich et al. // Polymer Testing. – 2023. – V. 125. – P. 108139, doi: 10.1016/j.polymeresting.2023.108139.

3. Doringhaus H., Haim J., Hyatt D. Plastics for Engineers: Materials, Properties, Applications. – Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 1992. – 227 с.

4. Rae P. J., Brown E. N., Orlor E. B. The mechanical properties of poly (ether-ether-ketone)(PEEK) with emphasis on the large compressive strain response // Polymer. – 2007. – V. 48, N 2. – P. 598–615. doi: 10.1016/j.polymer.2006.11.032.

5. Evaluating the potential of thermoplastic polymers for cryogenic sealing applications: strain rate and temperature effects / Z. Wang et al. // arXiv preprint arXiv: 2406.01165. – 2024.

© 2025

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

6. El-Qoubaa Z., Othman R. Strain rate sensitivity of polyetheretherketone's compressive yield stress at low and high temperatures // *Mechanics of Materials*. – 2016. – V. 95. – P. 15–27. DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.12.008.
7. Mechanical and thermal expansion properties of glass fibers reinforced PEEK composites at cryogenic temperatures / X. X. Chu et al. // *Cryogenics*. – 2010. – V. 50. – N 2. – P. 84–88.
8. Low temperature effect on impact energy absorption capability of PEEK composites / Garcia-Gonzalez D. et al. // *Composite Structures*. – 2015. – V. 134. – P. 440–449. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.08.090.
9. Effect of cryogenic environments on failure of carbon fiber reinforced composites / J. Hohe et al. // *Composites Science and Technology* – 2021. – V. 212. – P. 108850. DOI: j.compscitech.2021.108850.
10. Cryogenic mechanical properties of CF/polymer composites for tanks of reusable rockets / T. Aoki et al. // *Advanced composite materials*. – 2001. – V. 10, N 4. – P. 349–356. DOI: 10.1163/156855101753415373.
11. Adams R. D., Gaitonde J. M. Low-temperature flexural dynamic measurements on PEEK, HTA and some of their carbon fibre composites // *Composites science and technology*. – 1993. – V. 47, N 3. – P. 271–287. DOI: 10.1016/0266-3538(93)90036-G.
12. Zhang Z., Hartwig G. Low-temperature viscoelastic behavior of unidirectional carbon composites // *Cryogenics*. – 1998. – V. 38. – N 4. – P. 401–405. DOI: 10.1016/S0011-2275(98)00022-8.
13. Strain rate and temperature dependence of short/unidirectional carbon fibre PEEK hybrid composites / J. Pheysey et al. // *Composites Part B: Engineering*. – 2024. – V. 268. – P. 111080. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.111080.
14. Ahlborn K. Cryogenic mechanical response of carbon fibre reinforced plastics with thermoplastic matrices to quasi-static loads // *Cryogenics*. – 1991. – V. 31, N 4. – P. 252–256. DOI: 10.1016/0011-2275(91)90087-D.
15. Ahlborn K. Durability of carbon fibre reinforced plastics with thermoplastic matrices under cyclic mechanical and cyclic thermal loads at cryogenic temperatures // *Cryogenics*. – 1991. – V. 31, N 4. – P. 257–260, DOI: 10.1016/0011-2275(91)90088-E.
16. Nikonovich M., Ramalho A., Emami N. Effect of cryogenic aging and test-environment on the tribological and mechanical properties of PEEK composites // *Tribology International*. – 2024. – V. 194. – P. 109554. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109554.
17. Karger-Kocsis J., Friedrich K. Temperature and strain-rate effects on the fracture toughness of poly (ether ether ketone) and its short glass-fibre reinforced composite // *Polymer*. – 1986. – V. 27, N 11. – P. 1753–1760. DOI: 10.1016/0032-3861(86)90272-7.
18. Sasuga T., Hagiwara M. Mechanical relaxation of crystalline poly (aryl-ether-ether-ketone) (PEEK) and influence of electron beam irradiation // *Polymer*. – 1986. – V. 27, N 6. – P. 821–826. DOI 10.1016/0032-3861(86)90288-0.
19. Poly (ether ether ketone) is processed through extrusion-machining and 3D printing: A comparative study on mechanical, thermal and fracture properties at ambient and cryogenic environments / L. Karthikeyan et al. // *Journal of Elastomers & Plastics*. – 2021. – V. 53, N 6. – P. 672–683. DOI: 10.1177/0095244320961830.
20. Wang Q., Zheng F., Wang T. Tribological properties of polymers PI, PTFE and PEEK at cryogenic temperature in vacuum // *Cryogenics*. – 2016. – V. 75. – P. 19–25. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2016.01.001.
21. Friction and wear of carbon fibre filled polymer composites at room and low temperatures / G. Theiler et al. // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe*. – 2004. – V. 35. – N 10–11. – P. 683–689. DOI: 10.1002/mawe.200400827.
22. Ptak A., Taciak P., Wieleba W. Effect of temperature on the tribological properties of selected thermoplastic materials cooperating with aluminium alloy // *Materials*. – 2021. – V. 14, N 23. – P. 7318. DOI: 10.3390/ma14237318.
23. Role of transfer film formation on the tribological properties of polymeric composite materials and spherical plain bearing at low temperatures / W. Cui et al. // *Tribology International*. – 2020. – V. 152. – P. 106569. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106569.
24. Thermal expansion of PEEK between 80 and 470K / G. J. Farrow et al. // *Journal of materials science letters*. – 1990. – V. 9. – P. 743–744. DOI: 10.1007/BF00721820.
25. Schwarz G., Krahn F., Hartwig G. Thermal expansion of carbon fibre composites with thermoplastic matrices // *Cryogenics*. – 1991. – V. 31, N 4. – P. 244–247. DOI: 10.1016/0011-2275(91)90085-B.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО ГИБРИДНОГО АНТИФРИКЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

А. В. АНИСИМОВ, д-р техн. наук, И. В. ЛИШЕВИЧ, канд. техн. наук,
А. С. САРГСЯН, канд. техн. наук, И. В. ЛОБЫНЦЕВА, И. В. БЛЫШКО, М. Ю. СОБОЛЕВ,
Д. Д. ДВОРЯНЦЕВ, Е. А. ШАРКО

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 49. E-mail: nrk11@crism.ru

Поступила в редакцию 12.11.2024

После доработки 16.01.2025

Принята к публикации 16.01.2025

Работа посвящена исследованию физико-механических свойств и триботехнических характеристик новых гибридных антифрикционных полимерных композиционных материалов (ПКМ). Исследовано влияние состава гибридных тканей на физико-механические свойства и триботехнические характеристики гибридных ПКМ. Показано, что новые гибридные антифрикционные материалы не уступают по характеристикам антифрикционным углепластикам и превосходят их по некоторым показателям.

Ключевые слова: ПКМ, гибридные антифрикционные ПКМ, углепластики, коэффициент трения, прочность

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-90-99

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахарева В. Е. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы. Справочник / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2014. – С. 79–133.
2. Бондалетова Л. И. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 111 с.
3. Чурсова Л. В., Панина Н. Н., Гребенева Т. А., Кутергина И. Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. – СПб.: Профессия, 2020. – 576 с.
4. Крыжановский В. К., Кербер М. Л., Бурлов В. В. Производство изделий из полимерных материалов. – СПб.: Профессия, 2004. – 464 с.
5. Точильников Д. Г., Гинзбург Б. М. Методика экспрессных триботехнических испытаний антифрикционных полимеров // Вопросы материаловедения. – 2002. – № 3(31). – С. 39–48.
6. Михайлин Ю. А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен // Полимерные материалы, изделия, оборудование, технологии. – 2003. – № 3 (46), 4 (47), 6 (49), 7 (50), 11 (54).
7. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные КМ. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.
8. Машков Ю. К. Трибология конструкционных материалов: учеб. пособие. – Омск: ОмГТУ, 1996. – 304 с.
9. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. – СПб.: Профессия, 2006. – 624 с.
10. Гофман И. В., Юдин В. Е., Orell O., Vuorinen J., Григорьев А. Я., Ковалева И. Н., Светличный В. М. Влияние степени упорядоченности надмолекулярной структуры теплостойких термопластов конструкционного назначения на их механические и трибологические характеристики в диапазоне температур 20–250°C // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 4 (72). – С. 150–159.
11. Мышкин Н. К., Петрокопец М. И. Трибология. Принципы и приложения. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
12. Современные наукоемкие технологии. URL: <https://top-technologies.ru/ru> (дата обращения: 24.09.2022)
13. Ткаченко Э. В. Разработка армированных композитов на основе полиамида 6 и фенолона С-1 // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Севастополь, 2018. – С. 28.
14. Мороков А. А., Смирнов Г. П., Цыбизова Н. С. Технология прядения, ткачества и нетканых материалов: учеб. пособие. – СПб.: ФГБОУВПО «СПГУТД», 2013. – 163 с.

15. Материалы для судостроения и морской техники. Т. 2: Справочник / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО Профессионал, 2009. – С. 381–433.

16. Валуева М. И., Колобков А. С., Малаховский С. С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ: Промышленные биотехнологии. – 2020. – С. 49–54.

17. Анисимов А. В., Барахтин Б. К., Бахарева В. Е., Петров С. Н., Рыбин В. В. Исследование микроструктуры и механизма изнашивания поверхностей пар трения углепластики – медьсодержащие сплавы // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 2 (46). – С. 44–51.

18. Лысенков М. П. Способность некоторых неметаллических материалов формировать бинарную поверхность трения // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 2 (46). – С. 136–139.

19. Точильников Д.Г., Гинзбург Б.М. Методика экспрессных триботехнических испытаний антифрикционных полимеров // Вопросы материаловедения. – 2002. – № 3 (31). – С. 39–48.

20. Бахарева В. Е., Николаев Г. И., Анисимов А. В. Антифрикционные неметаллические материалы для узлов трения скольжения // Вопросы материаловедения. – 2011. – №1 (65). – С. 75–88.

УДК 678.073:678.026.2

ПОЛУЧЕНИЕ ПРЕПРЕГА МЕТОДОМ ПРОПИТКИ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИЕЙ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИМЕРА

Д. Д. ДВОРЯНЦЕВ, А. В. АНИСИМОВ, д-р техн. наук, И. В. ЛИШЕВИЧ, канд. техн. наук,
А. С. САРГСЯН, канд. техн. наук, Е. П. СОРОКИНА, Е. А. ШАРКО

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

Поступила в редакцию 22.11.2024

После доработки 16.01.2025

Принята к публикации 16.01.2025

Представлен метод получения лент термопластичного препрега на основе однонаправленного углеродного волокна с низким модулем упругости марки UMT42S-3K-EP методом пропитки из водной суспензии полимера. Исследован гранулометрический состав исходных мелкодисперсных компонентов и их смесей после стадии измельчения и смешения, а также изучена их структура методом РЭМ-микроскопии и РСМА-анализа. На основании теории взаимодействия частиц на поверхности твердое вещество – жидкость были приготовлены образцы суспензий на основе полиэфирэфиркетона (РЕЕК), стабилизированного анион- и катионактивными поверхностно-активными веществами (ПАВ). Для реализации технологии пропитки углеродного волокна полимерной суспензией с постоянным поддержанием взвеси полимера разработан лабораторный узел УПС-5-50-2Л и внедрен в установку для пропитки ТМА-600. Полученные лабораторные образцы термопластичных лент исследованы методами СЭМ-микроскопии и РСМА-анализа, а также определено соотношение полимер – армирующий материал.

Показано, что применение ПАВ позволяет значительно снизить гидрофобность РЕЕК для его стабилизации в водном растворе. Разработанный узел пропитки в составе линии ТМА-600 позволяет реализовывать технологию получения тонких однонаправленных лент препрега с содержанием полимера в волокне до 46,8%. Установлено, что концентрации катионактивного ПАВ до 2 мас.% достаточно для обеспечения смачиваемости поверхности РЕЕК.

Ключевые слова: термопластичный препрег, пропитка из суспензии полимера, поверхностно-активное вещество

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-100-110

ЛИТЕРАТУРА

1. Бэйдер Э. Я., Петрова Г. Н. Термопластичные связующие для полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. – 2015. – С. 40–49.

2. Ноздрин Л. В., Короткова В. И., Бейдер Э. Я. Термопластичные полимеры для конструкционных материалов. Обзор // Технология. Сер. «Конструкции из композиционных материалов». – 1991. – № 1. – С. 3–10.

© 2025

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

3. Перов Б. В. Термопласты, наполненные волокнами // Термопласты конструкционного назначения / Под ред. Е. Б. Тростянской. – М.: Химия, 1975. – С. 187–216.
4. Термопласты конструкционного назначения / Под ред. Е. Б. Тростянской. – М.: Химия, 1975. – 240 с.
5. Бахарева В. Е. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы. Справочник / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2014. – С. 79–133.
6. Зеленский Э. С., Куперман А. М., Лебедева О. В. Армированные пластики на основе термопластичных связующих // Технология. Сер. «Конструкции из композиционных материалов». – 1991. – № 1. – С. 10–21.
7. Дворянцев Д. Д., Саргсян А. С., Анисимов А. В., Лишевич И. В. Получение высокопрочного углепластика на основе полифениленсульфида с помощью метода ATL с лазерным нагревом // Вопросы материаловедения. – 2023. – Т. 114, № 2. – С. 125–135.
8. Ho K. K. C., Shamsuddin S.-R., Riaz S., Lamorinere S. Wet impregnation as route to unidirectional carbon fibre reinforced thermoplastic composites manufacturing // *Plastics, Rubber and Composites*. – 2011. – N 2, V. 40. – P. 102–103.
9. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композиционные материалы. Механика и технология / Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
10. Кобычно И. А. Получение и применение новых многоуровневых термопластичных композиционных материалов с углеродными наночастицами // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – СПб., 2022. – 20 с.
11. Киркин Б. С., Кузнецова К.Р., Петрова Г. Н., Сорокин А. Е. Сравнительный анализ свойств полиэфирэфиркетонов отечественного и зарубежного производства // *Труды ВИАМ*. – 2018. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-34-43
12. Zhang, H. Y., Yuan, L. L., Hong, W. J., Yang, S. Y., Improved Melt Processabilities of Thermosetting Polyimide Matrix Resins for High Temperature // *Polymers*. – 2022. – V.14, N 965.
13. Kung H. K. Effects of Surface Roughness on High-temperature Oxidation of Carbon-fiber-reinforced Polyimide Composites // *Journal of Composite Materials*. – 2005. – V. 39, Is.18. – P. 1677–1687.
14. Ma Y., Yan C., Xu H., Liu D., Shi P., Zhu Y., Liu J. Enhanced interfacial powder spray impregnated thermoplastic tows by pultrusion // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 1996. – V. 27. – P. 567–574.

УДК 678.74

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИБУТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА И ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

Т. А. БОРУКАЕВ¹, д-р хим. наук, Л. И. КИТИЕВА², канд. техн. наук,
А. Х. МАЛАМАТОВ¹, д-р техн. наук

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова,
Россия, КБР, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

² Ингушский государственный университет, Россия, РИ, 386001, г. Магас,
ул. И. Б. Зязикова, 7

Поступила в редакцию 16.12.2024

После доработки 13.01.2025

Принята к публикации 13.01.2025

Получены композиционные материалы на основе промышленного полибутилентерефталата и вторичного полиэтилентерефталата. Исследованы основные физико-механические свойства полученных композитов. Обнаружено, что данные полимеры совмещаются и образуют однородную систему при определенных их соотношениях. Установлено оптимальное количество вторичного полиэтилентерефталата, которое можно вводить в полибутилентерефталат с сохранением его основных физико-механических свойств.

Ключевые слова: полибутилентерефталат, вторичный полиэтилентерефталат, композиты, получение, свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-111-118

ЛИТЕРАТУРА

1. Итоги конференции «ПЭТФ 2018». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mplast.by/novosti/2018-03-06-itogi-konferentsii-petf-2018/>
2. Козлов А. Купите куртку, и будет ПЭТФ // The Chemical Journal. – 2017. – № 9. – С. 62–65.
3. Филимонов О. И. Особенности ПЭТ-тары как вторичного антропогенного сырья и ценообразование в сфере ее переработки // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2 (ч. 2).
4. Беданок А. Ю., Бештоев Б. З., Микитаев М. А., Микитаев А. К., Сазонов В. В. Полиэтилентерефталат: новые направления рециклинга // Пластические массы. – 2009. – № 6. – С. 18–21.
5. Белов Д. В., Беляев С. Н. Перспективы переработки пластиковых отходов на основе полиэтилентерефталата с применением живых систем (обзор) // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 238–252.
6. Чупрова Л.В., Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Ершова О.В. Исследование возможности получения композиционных материалов на основе вторичных полимеров // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4.
7. Кормильцева К.А. Переработка пластиковых отходов: полиэтилентерефталат // Молодой ученый. – 2022. – № 22 (417). – С. 611–614.
8. Лавров Н. А., Белухичев Е. В. Теоретические основы и механизмы совмещения полимеров // Пластические массы. – 2023. – № 5–6. – С. 8–11.
9. Борукаев Т. А., Машукова Б. С., Машуков Н. И., Тленкопачев М. А., Микитаев А. К. Физико-механические свойства полибутилентерефталата, модифицированного полиазометинами // Пластические массы. – 2004. – № 4. – С. 18–19.
10. Кацапова О. В., Лапковский В. В. Изучение физико-химических свойств волокнистых материалов на основе смесей полиалкилентерефталатов и изотактических полиолефинов // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. 23, № 5 (85). – С. 13–15.
11. Boon Peng Changa, Amar K. Mohanty, Manjusri Misraab. Tuning the compatibility to achieve toughened biobased poly(lactic acid)/poly(butylene terephthalate) blends // RSC Adv. – 2018. – N 8. – P. 27709–27724.
12. Wu Ting, Hu Hui Lian, Du Yi Ping, Jiang Dong. Discrimination of Thermoplastic Polyesters by MALDI-TOF MS and Py-GC/MS // Int. J. of Polym. Analysis and Characterization. – 2014. – V. 19, N 5. – P. 441–452.
13. Блайт Э. Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров / Пер. с англ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с. (Blythe A.R., Bloor D. Electrical Properties of Polymers. – Cambridge University Press, 2005. – 480 p.)
14. Китиева Л. И. Получение полибутилентерефталата // Инновационные подходы в решении проблем современного общества. – Пенза: Наука и просвещение, 2018. – С. 294–302.
15. Макарова В. В., Авдеев В. Н., Стрелец Б. Х., Смирнова Н. М., Акулин Ю. А., Куличихин В. Г. Некоторые пути химической и физической модификации полиэтилентерефталата // Высокомолек. соед. Серия А. – 2005. – Т. 47, № 7. – С. 1140–1152.

УДК 620.193.43:621.182.112

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВОДОПОДГОТОВКИ. НАКИПЕОБРАЗОВАНИЕ В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

С. А. ТЮРИНА¹, канд. техн. наук, В. Л. ДЕМИН^{1,2}, канд. техн. наук, В. А. ГОЛОВИН², д-р техн. наук,
В. А. ЩЕЛКОВ², канд. техн. наук, Н. А. РАШУТИН¹

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.

Поступила в редакцию 14.10.2024

После доработки 19.12.2024

Принята к публикации 26.12.2024

Рассмотрены методы обессоливания (опреснения) воды с высоким содержанием минеральных веществ, а также проблема образования накипи и коррозии в теплотехническом оборудовании. Вода часто используется для водоснабжения теплотехнического оборудования, и содержащиеся в ней соли приводят к снижению его эффективности и даже выходу из строя. Представлен экспресс-метод накипеобразования, позволяющий проводить оценку влияния модифицирующих добавок на противонакипные свойства защитного полимерного покрытия. Процесс образования отложений в реальных аппаратах с реальными средами достаточно длительный, и получение результата, пригодного для оценки, может растянуться на годы. В предлагаемой установке образование накипных отложений на подложке происходит за 2 ч. Метод заключается в экспонировании латунной пластины с нанесенным защитным полимерным покрытием в экспериментальной лабораторной установке, обеспечивающей условия, схожие с условиями работы теплообменного оборудования при неизменном составе минерального раствора, с последующим анализом состава покрытия и отложений карбонатов. Анализ заключается в определении толщины образовавшегося слоя накипи на модифицированном и немодифицированном покрытиях, определении элементного состава этих отложений, а также оценке равномерности их распределения.

Ключевые слова: опреснение, обессоливание, состав, структура, коррозия, теплоэнергетическое оборудование

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-119-134

ЛИТЕРАТУРА

1. Талалаева В. Ф. Обзор методов и технологий опреснения воды для целей питьевого водоснабжения // Экология и водное хозяйство. – 2022. – № 4. – С. 84–100. DOI: 10.31774/2658-7890-2022-4-4-84-100
2. Якуцени С. П. Вода: ресурсы, запасы, рынки // Горная промышленность. – 2022. – № 4. – С. 120–128. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-4-120-128
3. Алекин О.А. Химия океана. – Л.: Наука, 1966. – С. 32–34.
4. Феофанов Ю. А. Роль рециркуляции жидкости при работе сооружений биологической очистки сточных вод // Вода и экология: проблемы и решения. – 2019. – № 4 (80). – С. 79–87. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.79-87
5. Ахмедова Д. А. Технологическая схема термического опреснения морской воды с абсорбционным тепловым насосом как средство повышения эффективности // Deutsche Internationale Zeitschrift für zeitgenössische Wissenschaft. – 2021. – № 23. – С.43–46. DOI: 10.24412/2701-8369-2021-23-43-46
6. Алиева О. О. Технология утилизационного опреснения морской воды // Вестник науки и образования. – 2022. – № 1–1 (121). – С. 36–41.
7. Милютин Ю. В., Мифтахов Р. М., Сидельников А. А., Ребец М. В., Руденко И. А. Применение титановых сплавов в кожухотрубных теплообменных аппаратах для морской воды // Вестник МАХ. – 2006. – № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-titanovyh-splavov-v-kozhuhotrubnyh-teploobmennyyh-apparatah-dlya-morskoj-vody> (дата обращения: 21.12.2023)
8. Пат. РФ № 2 667 766 С1 / Миронов В. В., Миронов Д. В., Максимов Л. И., Якимов В. В. Способ опреснения морской воды. Опубликовано: 24.09.2018 // Бюл. № 27.
9. Алиева О. О. Технология утилизационного опреснения морской воды // Вестник науки и образования. – 2022. – № 1–1 (121). – С. 36–41.
10. Благин Е. В., Горшкалев А. А., Корнеев С. С., Урлапкин В. В. Исследование возможности повышения эффективности дистилляционной опреснительной установки // МНИЖ. – 2018. – № 11–1 (77). – С. 63–69.
11. Сафина Д. З. Использование ионообменных методов для водоподготовки энергетических предприятий // Вестник магистратуры. – 2013. – № 5 (20). – С. 26–27.
12. Лин М. М., Шитова В. О., Каграманов Г. Г. Очистка сточных вод от тяжелых металлов методом ионного обмена // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – № 2 (171). – С. 109–110.
13. Дымникова О. В., Кривоблоцкая Д. А., Дорждерем Болор. Анализ эффективности ионного обмена с учетом степени загрязненности сточных вод // Безопасность техногенных и природных систем. – 2017. – № 3. – С. 23–32.

14. Рашутин Н. А., Тюрина С. А. Методы модификации защитных полимерных покрытий. Инновационные технологии в электронике и приборостроении // Сб. докл. Российской научно-технической конференции с международным участием, Москва, 05–12 апреля 2021 г. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. – С. 364–368.
15. Черкинский С. Н., Штанников Е. В. Гигиенические аспекты опреснения воды // Гигиена и санитария. – 1970. – № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gigienicheskie-aspekty-opresneniya-vody> (дата обращения: 21.12.2023)
16. Смирнова Е. Е. Методы опреснения морской воды // Вестник науки. – 2020. – Т. 2, № 1(22). – С. 249–252.
17. Серышевский А. Ф. Структурный анализ жидкостей в аморфных телах: учеб. пособие. – Изд. 2-е. – М.: Высш. Школа, 1980. – 328 с.
18. Албагачиева М. М., Нагибина И. Ю. Анализ методов очистки воды от хлоридов // Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Омск, 2021
19. Бон А. И., Дзюбенко В. Г., Шишова И. И. О некоторых процессах создания асимметричных и композитных обратноосмотических мембран // ВМС. Серия Б. – 1993. – № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nekotoryh-protsessah-sozdaniya-asimmetrichnyh-i-kompozitnyh-obratnoosmoticheskikh-membran> (дата обращения: 21.12.2023)
20. Хохрякова Е. А., Резник Я. Е. Водоподготовка: Справочник / Под ред. С. Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.
21. Орлов Н. С. Ультра- и микрофильтрация: учеб. пособие. – М.: РХТУ им. Менделеева, 2014. – 117 с.
22. Gil J. D., Ruiz-Aguirre A., Roca L., Zaragoza G., Berenguel M. Prediction models to analyse the performance of a commercial-scale membrane distillation unit for desalting brines from RO plants // Desalination. – 2018. – N 445. – P. 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.022>.
23. Юнес М. С. Опреснение морской воды методом мембранной дистилляции применительно к условиям сельского хозяйства Сирии // Дис. ... канд. техн. наук, 2004. – 168 с.
24. Штаудт-Бикель К., Лихтенталер Р. Н. Первапорация – термодинамические свойства и выбор полимеров для мембран // ВМС. Серия А. – 1994. – № 11. – С. 1924–1945.
25. Naim M., Elewa M., El-Shafei A., Moneer A. Desalination of simulated seawater by purge-air pervaporation using an innovative fabricated membrane // Water Science & Technology. – 2015. – N 72(5). – P. 785–793. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.022>
26. Мосин О. В., Игнатов И. Современные технологии опреснения морской воды // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 4 (78). – С. 13–19.
27. 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. ROi: jbc-01/23-76-12-42
28. Martínez Moya, S.; Boluda Botella, N. Review of Techniques to Reduce and Prevent Carbonate Scale. Prospecting in Water Treatment by Magnetism and Electromagnetism // Water. – 2021. – V. 13. – Art. 2365. <https://doi.org/10.3390/w13172365>
29. Андреева С. А., Тюрина С. А., Дальская Г. Ю. Изучение кинетики высвобождения функциональных добавок из микрокапсул // Сб. докл. конф. «Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2023)». – 2023. – Т. 1. – С. 319–325.
30. Теплых С. Ю., Бочков Д. С., Базарова А. О. Исследование способов удаления фосфатов из бытовых сточных вод // Градостроительство и архитектура. – 2020. – Т. 10, № 4. – С. 69–77. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.9
31. Зимняков А. М., Наумов Р. В. Анализ химических отложений теплового оборудования и способы их очистки // Изв. ПГУ им. В. Г. Белинского. – 2010. – № 21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-himicheskikh-otlozheniy-teplovogo-oborudovaniya-i-sposoby-ih-ochistki> (дата обращения: 23.12.2023)
32. Пудова Н. Е., Какуркин Н. П., Бывальцев Е. А. Оценка эффективности антискалантов по предотвращению осаждения малорастворимых соединений // Вода: химия и экология. – 2018. – № 1–3 (114). – С. 120–126.

33. 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. <https://doi.org/10.61852/2949-3412-2023-1-4-131-141>

УДК 621.791:629.5

МЕТОДОЛОГИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТА СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ И СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. Н. САРАЕВ¹, д-р техн. наук, В. Д. ГОРБАЧ², д-р техн. наук, Н. И. ГОЛИКОВ¹, д-р техн. наук

¹ Якутский научный центр ИФТПС СО РАН, 677980, Республика Саха (Якутия),
г. Якутск, ул. Октябрьская, 1

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

Поступила в редакцию 4.06.2024

После доработки 22.10.2024

Принята к публикации 17.02.2025

Представлена методология научно обоснованной концепции совершенствования технологий производства и ремонта судовых конструкций на основе комплексного применения современных технологий, источников питания и перспективных отечественных сварочных и наплавочных материалов. Предлагаемый методологический подход сформирован в соответствии с принятой стратегией научно-технологического развития Российской Федерации. Повышение эффективности отечественного промышленного производства неразрывно связано с развитием технологий сварки и родственных процессов для получения высокопрочных неразъемных соединений при производстве и ремонте быстроизнашивающихся изделий и конструкций ответственного назначения. Дано обоснование выбора наиболее эффективных путей совершенствования технологий производства и ремонта судовых конструкций, а также техники портовой инфраструктуры на основе комплексного применения перспективных технологий их производства, ремонтно-упрочняющих обработок высоконагруженных изделий, современных источников питания и отечественных сварочных и наплавочных материалов.

Ключевые слова: сварка, производство, ремонт, сварные соединения, судовые конструкции, надежность, работоспособность, импульсные технологии, ударная механическая обработка, методология

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-135-151

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утверждена Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145.

2. Ларионов В. П., Слепцов О. И., Сараев Ю. Н., Безбородов В. П. Новые подходы к разработке современных технологий сварки и нанесения покрытий для обеспечения эксплуатационной надежности металлоконструкций и изделий, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера // Труды IV Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Пленарные доклады. – Якутск, 2008. – С. 26–30.

3. Слепцов О. И., Михайлов В. Е., Петушков В. Г., Яковлев Г. П., Яковлева С. П. Повышение прочности сварных конструкций для Севера. – Новосибирск: Наука, 1989. – 223 с.

4. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Хладостойкие стали для технических средств освоения арктического шельфа // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3. – С. 108–126.

5. Москвичев В. В., Черняев А. П., Чернякова Н. А., Волохов Г. М., Оганьян Э. С., Князев Д. А., Махутов Н. А., Резников Д. О., Слепцов О. И. Расчетно-экспериментальные методы и технологии обеспечения прочности и живучести техники Крайнего Севера и Арктики // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2020 г. Министерство энергетики Российской Федерации. – М., 2020. – С. 78–81.

6. Слепцов О. И. Технологическая прочность сварных соединений при низких температурах / Под ред. В. П. Ларионова. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1984. – 102 с.

© 2025

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

7. Сараев Ю. Н., Голиков Н. И., Слепцов О. И., Сидоров М. М., Семенов С. В. Разработка концепции создания и функционирования региональных центров производства, восстановительного ремонта и упрочняющей обработки ресурсопределяющих деталей и изделий техники, работающей в условиях Крайнего Севера и Арктики // Сб. трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В. П. Ларионова (11–15 сентября 2023 г., г. Якутск). EURASTRENCOLD-2023. – Киров: Изд-во МЦИТО, 2023. – С. 531–537.
8. Сараев Ю. Н., Ларионов В. П., Слепцов О. И., Сивцев М. Н., Безбородов В. П., Муратов А. А. Обеспечение эксплуатационной надежности и экологической безопасности высокоответственных конструкций, работающих в условиях Сибири и Крайнего Севера, использованием адаптивных импульсных технологий сварки // Труды II Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD-2004. Пленарные доклады. – 2004. – С. 147–158.
9. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур / Ю. Н. Сараев, С. В. Гладковский, Н. И. Голиков и др. // Научные технологии в проектах РНФ. Сибирь. – Томск, 2017. – С. 134–202.
10. Кархин В. А. Тепловые процессы при сварке. Изд. 2-е. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2015. – 572 с.
11. Сараев Ю. Н. Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера, на основе применения адаптивных импульсных технологий сварки // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 8. – С. 14–19.
12. Сараев Ю. Н., Полетика И. М., Козлов А. В., Хомченко Е. Г. Формирование структуры и свойств сварных соединений в условиях регулируемого тепловложения при импульсно-дуговой сварке // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 5. – С. 137–140.
13. Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Гладковский С. В., Голиков Н. И. Повышение надежности металлических конструкций при эксплуатации в условиях низких климатических температур посредством комплексного применения современных методов модифицирования зоны сварного соединения // Сварочное производство. – 2016. – № 9. – С. 3–9.
14. Сараев Ю. Н. Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов // Сварочное производство. – 2002. – № 1. – С. 4–11.
15. Лоос А. В., Лукутин А. В., Сараев Ю. Н. Источники питания для импульсных технологических процессов. – Томск: Издательская полиграфическая фирма ТПУ, 1998. – 158 с.
16. Сидоров М. М., Голиков Н. И., Сараев Ю. Н., Тихонов Р. П. Управление уровнем остаточных напряжений в стыковых соединениях труб из низколегированных сталей ударно-механической обработкой // Тяжелое машиностроение. – 2023. – № 10. – С. 23–28.
17. Голиков Н. И., Аммосов А. П. Прочность сварных соединений резервуаров и трубопроводов, эксплуатируемых в условиях Севера. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2002. – 232 с.
18. Ларионов В. П., Касаткин Б. С. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. – Новосибирск, 1986.
19. Ларионов В. П., Филиппов В. В. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: Результаты и перспективы. – Новосибирск, 2005.
20. Орыщенко А. С., Голосиенко С. А., Хлусова Е. И. Новое поколение высокопрочных корпусных сталей // Судостроение. – 2013. – № 4. – С. 73–76.
21. Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Сидоров М.М., Максимова Е.М., Семёнов С.В., Перовская М.В. Поисковые исследования повышения надежности сварных металлоконструкций ответственного назначения, эксплуатируемых в условиях Севера // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 4 (77). – С. 30–42.
22. Сараев Ю.Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. – Новосибирск: Наука, 1994. – 108 с.
23. Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Киселев А.С., Гордынец А.С., Тригуб М.В. Комплекс для исследования процессов тепломассопереноса при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 2018. – № 8. – С. 1–8.
24. Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Семенчук В.М., Непомнящий А.С. Кинетические особенности тепломассопереноса в условиях сварки и наплавки // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т. 62, № 9 (741). – С. 34–40.

25. Saraev Y.N., Lunev A.G., Semenchuk V.M., Nepomnyashchii A.S. Heat and mass transfer kinetics in arc welding process // Russian Physics Journal. – 2020. – V. 62, N 9. – С. 1573–1579.
26. Saraev Y.N., Lunev A.G., Perovskaya M.V., Semenchuk V.M., Gladkovsky S.V. Features of formation of structure and physical and mechanical properties of permanent welded joints of low-alloy steels by methods of adaptive pulse control of energy parameters of welding mode // Materials Science Forum. – 2018. – Т. 938. – P. 124–131.
27. Сараев Ю. Н., Сорокин М. С., Гладковский С. В., Голиков Н. И. Совершенствование технологий сварки и наплавки на основе методов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами сварочной техники инверторного типа, предназначенной для производства и ремонта конструкций ответственного назначения в условиях низких климатических температур // Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «ГАЗПРОМ». Тезисы докладов. VIII Отраслевое совещание. Москва, 2016. – С. 17.
28. Лобанов Л. М., Кирьян В. И., Кныш В. В., Прокопенко Г.И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (обзор) // Автоматическая сварка. – 2006. – № 9. – С. 3–11.
29. Сараев Ю. Н., Каманцев И. С., Кузнецов А. В., Григорьева А. А., Семенчук В. М., Непомнящий А. С. Численная оценка усталостного разрушения сварных соединений, полученных дуговой сваркой с управляемым и неуправляемым переносом тепловложением и ударно-механической обработкой // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. – Томск, 2021. – С. 275–276.
30. Liu C., Bhole S. D. Challenges and developments in pipeline weldability and mechanical properties // Science and Technology of Welding and Joining. – 2013. – V. 18, Is. 2. – P. 169–181.
31. Saraev Yu. N., Kamantsev I. S., Perovskaya M. V., Kuznetsov A. V., Semenchuk V. M., Nepomnyashiy A. S. To the Estimation of Welded Joint Fatigue Fracture // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2020). AIP Conf. Proc. 2315, 040031-1–040031-4. <https://doi.org/10.1063/5.0037091>. Published by AIP Publishing. 978-0-7354-4057-9
32. Горбач В. Д., Суздальев И. В., Кисилевский Ф.Н. Повышение качества и надежности сварных конструкций путем адаптивного управления технологическим процессом сварки // Судостроение. – 2002. – № 1. – С. 46–48.
33. Shiga C. Problems in welded joints and systematic approach to their solution in STX21 project // Science and Technology of Welding and Joining. – 2000. – V. 5, Is. 6. – P. 356–364.
34. Zenitani S., Hayakawa N., Yamamoto J., Hiraoka K., Morikage Y., Kubo T., Yasuda K., Amano T. Development of new Low Transformation-Temperature welding consumable to prevent cold cracking in high strength steel welds // Proceedings of 2002 Symposium for Welded Structures of the Japan Welding Society. – Osaka, 2002. – P. 346–353.

УДК 621.791:669.295

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СВАРКИ ПО НАПЛАВКЕ НА ТИТАНОВОМ ПСЕВДО- β -СПЛАВЕ

В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, Д. М. НЕСТЕРОВ, И. Ю. САХАРОВ, канд. техн. наук, С. В. КУЗНЕЦОВ

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

Поступила в редакцию 10.06.2024

После доработки 5.11.2024

Принята к публикации 5.11.2024

При сварке титановых псевдо- β -сплавов на итоговые характеристики сварного соединения оказывает влияние температурный цикл в связи с вероятностью образования охрупченного малопластичного состояния металла в отдельных зонах термического влияния. С целью предотвращения неблагоприятного термического воздействия на металл конструкции используется сварка через предварительную наплавку. В связи с этим возникает задача экспериментального и расчетного исследования распределения температурного поля в процессе сварки титанового псевдо- β -сплава через наплавку различной толщины. Для расчетного моделирования сварки был использован программный продукт ANSYS Workbench. Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов продемонстрировало хорошее совпадение распределения температурных полей в зоне термического влияния сварного соединения.

Ключевые слова: сварка через наплавку, титановый псевдо- β -сплав, температурный цикл сварки, моделирование, программный продукт ANSYS

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-152-163

ЛИТЕРАТУРА

1. Опыт применения материалов и технологий сварки и наплавки при строительстве корпусов реакторных установок РИТМ-200 универсальных атомных ледоколов проекта 22220 / М. Н. Тимофеев и др // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2023. – № 406, Т. 4. – С. 77–86.
2. Левченко А. М. Книга лекций по сварке в Политехническом университете Петра Великого. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2015. – 394 с.
3. Лукьянов С. И., Бойков Н. П., Сергеева Е. В. Перспективные виды сварки для авиационной и космической отрасли // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2020 г. – Т. 1: Сварка летательных аппаратов и родственные технологии. – С. 471–473.
4. Титановые сплавы для морской техники / И. В. Горынин и др. – СПб.: Политехника, 2007. – 384 с.
5. Козлова И. Р. Влияние термической обработки на формирование структуры и уровень механических свойств высоколегированного сплава титана // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 4 (100). – С. 28–41.
6. Пат. RU 2690257 С1. Сплав на основе титана / Ковальчук М. В., Орыщенко А. С., Леонов В. П. и др. Заявлено 28.11.2018. Оpubл. 31.05.2019.
7. Особенности применения титановой сварочной проволоки при изготовлении конструкций морской техники / А. С. Орыщенко и др. // Технология легких сплавов. – 2021. – № 2. – С. 59–62.
8. Леонов В. П., Марголин Б. З., Злочевский А. Б. Распределение остаточных напряжений в элементах оболочечных конструкций после многослойной сварки и гидравлических испытаний // Автоматическая сварка. – 1987. – № 4. – С. 11–16.
9. Методика определения тепло- и температуропроводности конструкционных материалов методом лазерной вспышки. МВИ №10-2/41-2017/3.2.1. ЦНИИ КМ «Прометей», 2017.
10. Методика определения теплоемкости конструкционных материалов методом лазерной вспышки. МВИ №11-2/41-2017/3.2.1. ЦНИИ КМ «Прометей», 2017.
11. Неровный В. М. Теория сварочных процессов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 702 с.
12. Покровский А. М., Авагимов С. С., Дубовицкий Е. И. Расчет эксплуатационных напряжений в магистральном нефтепроводе с учетом остаточных сварочных напряжений // Наука и образование. – 2016. – № 9. – С. 123–137.
13. Моделирование напряженно-деформированного состояния сварных соединений в ANSYS Mechanical / А. В. Фролов и др. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – № 11. – С. 61–75
14. Леонов В. П., Людмирский Ю. Г., Ассауленко С. С. Повышение долговечности сварных стыковых соединений, работающих при циклических нагрузках в двусосном поле напряжений // Advanced Engineering Research. – 2022. – № 3, Т. 22. – С. 232–241.
15. Паршин С. Г., Нестеров Д. М. Погружной механизм подачи проволоки для подводной сварки в водной среде. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 62–64.
16. Колоколов Е. И., Томилин С. А., Шишов В. В. Обеспечение конструктивной прочности сварных соединений реакторных установок посредством применения новых сварочных материалов и технологий // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 24, Т. 3. – С. 1–14.

УДК 621.791.3:669.295

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ПАЯНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А. И. ИГОЛКИН¹, канд. техн. наук, Н. В. ЛЕБЕДЕВА², канд. техн. наук, И. А. МАКСИМЕНКО³

¹ ПК ЦНТУ «Прометей», 191144, Санкт-Петербург, пр. Бакунина 29, лит. А, пом. 2Н

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

³ АО «НПФ «НевИнтерМаш», 197198, Санкт-Петербург, пр. Добролюбова, д.11Е

Поступила в редакцию 14.10.2024

После доработки 17.10.2024

Принята к публикации 17.10.2024

Исследованы структура и свойства высокопрочных паяных соединений титановых сплавов различного типа (ПТ-3В, ВТ6, ВТ6С, ВТ20 и ВТ22). Определены оптимальные параметры диффузионной пайки для получения неразъемных соединений, равнопрочных основному металлу. На примере титанового ($\alpha+\beta$)-сплава переходного класса ВТ22 описан усовершенствованный способ пайки высоколегированных титановых сплавов через титановую прослойку с применением аморфного припоя ленточного типа, обеспечивающий прочность соединений на уровне 1000 МПа.

Ключевые слова: титановые сплавы, ПТ-3В, ВТ6, ВТ6С, ВТ20, ВТ22, диффузионная пайка, высокопрочные соединения, основной металл, свойства, структура, аморфные припои, зазор, титановая прослойка

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-120-1-164-172

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснопевцев А. Ю. Отличие, преимущества и недостатки пайки по сравнению со сваркой // Сварочное производство. – 2020. – № 8. – С. 39–45.
2. Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении / А. Г. Братухин, Ю. Л. Иванов, Б. Н. Марьин и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 600 с.
3. Радзиевский В. Н., Ткаченко Г. Г. Высокотемпературная вакуумная пайка в компрессоростроении. – Киев: Экотехнология, 2009. – 397 с.
4. Овсянников О. А., Онучин С. В. Оборудование и технология пайки в ПО «Стрела» // Сб. материалов международной научно-технической конференции «Пайка-2021». – Тольятти, Изд-во ТГУ, 2021. – С. 151–152.
5. Лантушенко Л. С., Скольцов В. И., Скольцова М. И., Сторчай Е. И., Шеин Ю. Ф. Микроструктура паяных соединений конструкционных материалов криогенной техники // Сб. материалов международной научно-технической конференции «Пайка-2021». – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2021. – С. 87–96.
6. Денисов П. П., Осипов Е. В., Шевченко В. В., Михайлов А. Ю. Повышение технологичности процесса пайки титана в ракетостроении. – Изд-во Оренбургского государственного университета, 2017. <http://elib.osu.ru/handle/123456789/2275>
7. Федотов В. Т., Сучков А. Н., Калинин Б. А., Севрюков О. Н., Иванников А. А. Припои СТЕМЕТ для пайки материалов современной техники // Цветные металлы. – 2014. – № 312. – С. 32–37.
8. Shapiro A., Rabinkin A. State of the art of Titanium-based brazing filler metals // Welding Journal. – 2003. – V. 82 (10). – P. 36–43.
9. Ko M, Suzumura A., Onzawa T. Brazing of titanium using low melting point titanium-base filler metals // Proc. of Int. Conf. on titanium production and application, Seoul, South Korea. – 1990. – V. 2. – P. 592–601.
10. Иголкин А. И., Лебедева Н. В., Максименко И. А. Структура и свойства тавровых соединений титанового сплава ВТ6С в процессе диффузионной пайки // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 2 (114). – С. 71–79.
11. Строганов Г. Б., Шпигель А. С., Рыльников В. С., Перевезенцев Б. Н., Соколова Н. М. Способ пайки титановых сплавов, SU 1013074 // Бюл. № 15, 23.04.1983 г.
12. Крохина В. А., Арисланов А. А., Пухтырский С. В., Наприенко С. А. Исследование влияния режимов термической обработки в β -области на структуру и механические свойства полуфабрикатов из сплава ВТ22М // Труды ВИАМ. – 2023. – № 8. – С. 25–34.

УДК 621.791.927.5:620.178.165

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C

А. А. АРТЕМЬЕВ, канд. техн. наук, И. В. ЗОРИН, д-р техн. наук,
Д. В. ПРИЯТКИН, канд. техн. наук, В. И. ЛЫСАК, д-р техн. наук, акад. РАН

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 400005, Волгоград, пр. Ленина,
28. E-mail: artspace5@yandex.ru

© 2025

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

Поступила в редакцию 6.09.2024

После доработки 7.10.2024

Принята к публикации 7.10.2024

Изучено влияние ультразвуковых колебаний на структурно-фазовый состав и износостойкость доэвтектического и заэвтектического наплавочных сплавов системы Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C. Колебания вводили в сварочную ванну с помощью присадочной порошковой проволоки в процессе электродуговой наплавки плавящимся электродом. Выполнены металлографические исследования сплавов, микрорентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализы. Образцы сплавов испытаны на стойкость к газоабразивному изнашиванию, а также изнашиванию через абразивную прослойку при нормальной и повышенной до 600°C температуре. Установлено, что акустическая обработка сварочной ванны, по-разному влияя на структуру сплавов рассматриваемой системы легирования, может обуславливать как снижение, так и увеличение износостойкости сплавов.

Ключевые слова: наплавочные сплавы, электродуговая наплавка, ультразвуковые колебания, износостойкость, высокотемпературное газоабразивное изнашивание, аустенит, карбиды

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-173-184

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумилов А. А., Штанько П. К., Гордиенко В. Н. Разработка наплавочных материалов для повышения износостойкости деталей тягодутьевых машин тепловых электростанций // Вестник СевНТУ. – 2010. – № 110. – С. 216–218.
2. Юзвенко Ю. А., Шимановский В. П., Гавриш В. А., Пащенко М. А. Дуговая наплавка деталей засыпного устройства доменной печи // Автоматическая сварка. – 1972. – № 2. – С. 5963.
3. Артемьев А. А., Прияткин Д. В., Лысак В. И., Лойко П. В. Анализ наплавочных сплавов для работы в условиях газоабразивного изнашивания при повышенных температурах // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. – 2020. – № 10 (245). – С. 49–55.
4. Эрозия / Под ред. К. Прис : Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 464 с. [Erosion, New York: Academic Press, 1979, 450 p.]
5. Varga M. High temperature abrasive wear of metallic materials // Wear. – 2017. – V. 376–377, Part A. – P. 443–451. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.042>
6. Veinthal R., Kulu P., Käerdi H. Microstructural aspects of abrasive wear of composite powder materials and coatings // International Journal of Materials and Product Technology. – 2011. – V. 40, Is. 1–2. – P. 92–119. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2011.037208>
7. Кудина А. В., Кураш В. В., Редин И. В., Хроленок В. В. Получение износостойких металлопокрытий электродуговой наплавкой плавящимся электродом при воздействии на него ультразвуком // Агропанорама. – 2013. – № 3. – С. 34–38.
8. Kumar S., Wu Chuansong, Padhy G., Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review / Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – V. 26. – P. 295–322. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027>
9. Пархимович Э. М. Сварка и наплавка в ультразвуковом поле. – Минск: Наука и техника. – 1988. – 206 с.
10. Tiana Y., Shena J. Effects of ultrasonic vibration in the CMT process on welded joints of Al Alloy // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – V. 4. – P. 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.05.004>
11. Минин С. И., Трофимов А. И., Трофимов М. А. Технология термической сварки циркуляционных трубопроводов АЭС с воздействием ультразвука // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 4. – С. 5–9.
12. Watanabe T., Shiroki M., Yanagisawa A., Sasaki T. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – V. 210, Is. 12. – P. 1646–1651. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.015>
13. Liu J., Zhu H., Li Z., Cui W., Shi Y. Effect of ultrasonic power on porosity, microstructure, mechanical properties of the aluminum alloy joint by ultrasonic assisted laser-MIG hybrid welding // Optics and Laser Technology. – 2019. – V. 119. – P. 105619. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105619>

14. Fan Q., Chen C., Fan C., Liu Z., Cai X., Lin S., Yang C. Ultrasonic induces grain refinement in gas tungsten arc cladding Al–CoCrFeNi high-entropy alloy coatings // *Materials Science and Engineering A*. – 2021. – V. 821. – P. 141607. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141607>

15. Zhao G., Wang Z., Hu S., Duan S., Chen Y. Effect of ultrasonic vibration of molten pool on microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V joints prepared via CMT+P welding // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – V. 52. – P. 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.045>

16. Кривоносова Е. А., Щицын Ю. Д., Акулова С. Н., Мышкина А. В., Неулыбин С. Д., Белинин Д. С. Снижение дефектности жаропрочных никелевых сплавов в технологиях наплавки // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 12–19.

17. Шевченко О. И., Трекин Г. Е. Формирование структуры и свойств композиции «наплавленный слой – основной металл» в ультразвуковом поле // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 124–132.

18. Thavamani R., Balusamy V., Nampoothiri J., Subramanian R., Ravi K. R. Mitigation of hot cracking in Inconel 718 superalloy by ultra-sonic vibration during gas tungsten arc welding // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – V. 740. – P. 870–878. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.295>

19. Артемьев А. А., Зорин И. В., Соколов Г. Н., Лысак В. И., Денисевич Д. С., Прияткин Д. В. Диагностика наплавленных сплавов на стойкость к высокотемпературному газоабразивному изнашиванию // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического ун-та (Вестник ПНИПУ). Машиностроение, материаловедение*. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 12–19.

20. Артемьев А. А., Антонов А. А., Соколов Г. Н., Лысак В. И. Методика испытаний наплавленных сплавов на стойкость к высокотемпературному абразивному изнашиванию // *Трение и износ*. – 2017. – Т. 38, № 3. – С. 247–254.

УДК 669.039.531:669.15–194.56:539.42

ОСОБЕННОСТИ КАНАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ.

Часть 1. Экспериментальные исследования

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук, В. А. ШВЕЦОВА, канд. физ.-мат. наук, Н. Е. ПИРОГОВА, канд. техн. наук, А. А. БУЧАТСКИЙ, канд. техн. наук, Э. А. ЗЕРНОВ

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

Поступила в редакцию 13.11.2024

После доработки 27.01.2025

Принята к публикации 30.01.2025

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик и механизмов разрушения аустенитной стали 10X18H9, облученной при 400°C до повреждающей дозы около 15 сна. В условиях одноосного растяжения гладких цилиндрических образцов и цилиндрических образцов с кольцевым надрезом в диапазоне температур от 20 до 500°C получены характеристики разрушения и выполнен анализ основных мод разрушения испытанных образцов методом сканирующей электронной микроскопии с акцентом на специфический механизм разрушения облученных аустенитных сталей – канальное разрушение. На основании выполненных исследований определен температурный диапазон реализации канального разрушения и установлены основные его особенности. В температурном диапазоне канального разрушения наблюдается значительное уменьшение деформационного упрочнения, что обусловлено канальным (локализованным) деформированием в облученной стали, которое является необходимым условием для реализации канального разрушения. Выполнена оценка вкладов различных мод разрушения в зависимости от трехосности напряженного состояния и температуры испытаний. Показано, что доля площади поверхности канального разрушения относительно площади всей поверхности разрушения увеличивается с увеличением трехосности. Исследован рельеф областей канального разрушения и поверхностей внутризеренных фасеток канального разрушения. На поверхностях этих фасеток выявлены выходы вторичных деформационных каналов, которые расположены регулярно через 1–2 мкм. Полученные результаты использованы для разработки модели и критерия канального разрушения, которые представлены во второй части настоящей работы, а также для верификации предложенного критерия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neustroev V. S., Garner F. A. Very high swelling and embrittlement observed in a Fe–18Cr–10Ni–Ti hexagonal fuel wrapper irradiated in the BOR-60 fast reactor. *Fusion Materials // Semiannual Progress report for Period Ending December 31. – 2007. V. 43. – P. 109–122.*
2. Неустроев В. С., Голованов И. Н., Шамардин В. К. Вызванное распуханием охрупчивание облученных аустенитных сталей // *Вопросы атомной науки и техники. – 2007. – Т. 2. – С. 119–124.*
3. Марголин Б. З., Сорокин А. А. К вопросу о природе влияния радиационного распухания на предел прочности облученных аустенитных материалов // *Вопросы материаловедения. – 2012. – № 1 (69). – С. 148–162.*
4. Марголин Б. З., Сорокин А. А., Швецова В. А., Минкин А. И., Потапова В. А., Смирнов В. И. Влияние радиационного распухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом циклическом нагружении. Часть I. Пластичность и трещиностойкость // *Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3 (87). – С. 159–191.*
5. Марголин Б. З., Швецова В. А., Сорокин А. А., Минкин А. И., Пирогова Н. Е. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после 45 лет эксплуатации. Часть 4. Характеристики прочности и пластичности и механизмы разрушения // *Вопросы материаловедения. – 2021. – № 1 (105). – С. 116–144.*
6. Hunter C. W., Fish R. L., Holmes J. J. Channel Fracture in Irradiated EBR-II Type 304 Stainless Steel // *American Nuclear Society Transactions. – 1972. – V. 15, N 1. – P. 254–255.*
7. Fish R. L., Hunter C. W. Tensile properties of fast reactor irradiated type 304 stainless steel. Irradiation effects on microstructure and properties of metals, ASTM STP 611 // *American Society for Testing and Materials. – 1976. – P. 119–138.*
8. Huang F. H. Comparison of fracture behavior for low-swelling ferritic and austenitic alloys irradiated in the fast flux test facility (FFTF) to 180 dpa // *Engineering Fracture Mechanics. – 1992. – V. 43, N 5. – P. 733–748.*
9. Sharp J. V. Correlation between cleared channels and surface slip steps in neutron irradiated copper crystals // *Radiation Effects: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology. – 1972. – V. 14. – P. 71–75.*
10. Edwards D. J., Singh B. N., Bilde-Sørensen J. B. Initiation and propagation of cleared channels in neutron-irradiated pure copper and a precipitation hardened CuCrZr alloy // *J. Nucl. Mater. – 2005. – V. 342. – P. 164–178.*
11. Byun T. S., Hashimoto N., Farrell K., Lee E. H. Characteristics of microscopic strain localization in irradiated 316 stainless steels and pure vanadium // *J. Nucl. Mater. – 2006. – V. 349. – P. 251–264.*
12. Byun T. S., Hashimoto N., Farrell K. Deformation mode map of irradiated 316 stainless steel in true stress-dose space // *JNM. – 2006. – V. 351. – P. 303–315.*
13. Ananthakrishna G. Chapter 73 Statistical and Dynamical Approaches to Collective Behavior of Dislocations // *Dislocations in Solids. – 2007. – V. 13. – P. 81–223.*
14. Gussev M. N., Field K. G., Busby J. T. Deformation localization and dislocation channel dynamics in neutron-irradiated austenitic stainless steels // *JNM. – 2015. – V. 460. – P. 139–152.*
15. Doyle P. J., Benensky K. M., Zinkle S. J. Modelling of dislocation channel width evolution in irradiated metals // *JNM. – 2017. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.10.063*
16. Barrioz P. O., Hure J., Tanguy B. Effect of dislocation channeling on void growth to coalescence in FCC crystals // *Materials Science & Engineering A. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.115>*
17. Xiao X. Fundamental mechanisms for irradiation-hardening and embrittlement: a review // *Metals 2019. – V. 9. – P. 1132.*
18. Griffiths M. Effect of neutron irradiation on the mechanical properties, swelling and creep of austenitic stainless steels // *Materials. – 2021. – V. 14. – P. 2622.*
19. Griffiths M. Strain localisation and fracture of nuclear reactor core materials // *J. Nucl. Eng. – 2023. – V. 4. – P. 338–374.*

20. Busby J. T., Was G. S., Kenik E. K. Isolating the effect of radiation-induced segregation in irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels // JNM. – 2002. – V. 302. – P. 20–40.
21. Margolin B., Sorokin A., Pirogova N., Toivonen A., Sefta F., Pokor C. Analysis of mechanisms inducing corrosion cracking of irradiated austenitic steels and development of a model for prediction of crack initiation // Engineering Failure Analysis. – 2020. – V. 107. – P. 104235.
22. Chaouadi R. Effect of irradiation-induced plastic flow localization on ductile crack resistance behavior of a 9% Cr tempered martensitic steel // JNM. – 2008. – V. 372. – P. 379–390.
23. Patra A., McDowell D. L. Continuum modelling of localized deformation in irradiated bcc materials // JNM. – 2013. – V. 434. – P. 414–427.
24. Foreman A. J. E., Sharp J. V. A mechanism for the sweeping-up of loops by glide dislocations during deformation // Phil. Mag. – 1969. – V. 19. – P. 931–937.
25. Rodney D. Molecular dynamics simulation of screw dislocations interacting with interstitial frank loops in a model FCC crystal // Acta Materialia. – 2004. – V. 52, Is. 3. – P. 607–614.
26. Марголин Б. З., Сорокин А. А., Бучатский А. А., Швецова В. А., Прокошев О. Ю., Пирогова Н.Е. Характеристики и механизмы разрушения облученных аустенитных сталей в области повышенных температур и формулировка критерия разрушения. Часть 1. Экспериментальные исследования // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 2 (110). – P. 185–202.
27. Nagy E., Mertinger V., Tranta F., Solyom J. Deformation induced martensitic transformation in stainless steels // Mat. Science and Eng. A. – 2004. – V. 378. – P. 308–313.
28. Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel / Y.E. Shen, X.X. Li, X. Sun et al. // Mat. Science and Eng. A. – 2012. – V. 552. – P. 514–555.
29. Gusev M. N., Field K. G., Busby J. T. Strain-induced phase transformation at the surface of an AISI-304 stainless steel irradiated to 4.4 dpa and deformed to 0.8% strain // J. Nucl. Mater. – 2014. – V. 446. – P. 187–192.
30. Вотинов С. Н., Прохоров В. И., Островский З. Е. Облученные нержавеющие стали. – М.: Наука, 1987.
31. Miura T., Fujii K., Fukuya K. Micro-mechanical investigation for effects of helium on grain boundary fracture of austenitic stainless steel // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 457. – P. 279–290.
32. ASM Handbook. V. 12: Fractography. ASM International, The Materials Information Company, 1998.

УДК 669.039.531:669.15–194.56:539.42

ОСОБЕННОСТИ КАНАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ. Часть 2. Модель и критерий канального разрушения

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук,
В. А. ШВЕЦОВА, канд. физ.-мат. наук, Э. А. ЗЕРНОВ, Н. Е. ПИРОГОВА, канд. техн. наук,
А. А. БУЧАТСКИЙ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 13.11.2024

После доработки 27.01.2025

Принята к публикации 30.01.2025

На основе экспериментальных результатов, представленных в первой части настоящей работы, предложена модель и сформулирован критерий канального разрушения облученной аустенитной стали. Предложенная модель и критерий включают механизм зарождения микротрещин в плоскости канального деформирования в результате пересечения с вторичными каналами и механизм роста микротрещин путем сдвига. Предложенная модель и сформулированный критерий зарождения микротрещины в плоскости деформационных каналов объясняет причину канального разрушения в облученных ГЦК-материалах и его отсутствие в облученных ОЦК-материалах, хотя канальное деформирование наблюдается в обоих типах материалов. Предложена процедура определения параметров критерия по результатам испытаний стандартных цилиндрических образцов и цилиндрических образцов с кольцевым надрезом при одной температуре в температурном диапазоне канального раз-

рушения. При использовании экспериментальных результатов, представленных в первой части настоящей работы, получены численные значения параметров критерия. Для облученной аустенитной стали 10X18H9 выполнена верификация критерия канального разрушения путем сопоставления экспериментальных и расчетных значений критической деформации для образцов с различной трехосностью напряженного состояния, а также для образцов, испытанных при различных температурах.

Ключевые слова: модель канального разрушения, критерий канального разрушения, аустенитная хромоникелевая сталь, нейтронное облучение

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-205-224

ЛИТЕРАТУРА

1. Sharp J. V. Correlation between cleared channels and surface slip steps in neutron irradiated copper crystals // *Radiation Effects: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*. – 1972. – V. 14. – P. 71–75.
2. Byun T. S., Hashimoto N., Farrell K. Deformation mode map of irradiated 316 stainless steel in true stress-dose space // *JNM*. – 2006. – V. 351. – P. 303–315.
3. Gussev M. N., Field K. G., Busby J. T. Deformation localization and dislocation channel dynamics in neutron irradiated austenitic stainless steels // *JNM*. – 2015. – V. 460. – P. 139–152.
4. Doyle P. J., Benensky K. M., Zinkle S. J. Modelling of dislocation channel width evolution in irradiated metals // *JNM*. – 2017. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.10.063
5. Barrioz P. O., Hure J., Tanguy B. Effect of dislocation channeling on void growth to coalescence in FCC crystals // *Materials Science & Engineering A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.115>.
6. Griffiths M. Effect of neutron irradiation on the mechanical properties, swelling and creep of austenitic stainless steels // *Materials*. – 2021. – V. 14. – P. 2622.
7. Griffiths M. Strain localisation and fracture of nuclear reactor core materials // *J. Nucl. Eng.* – 2023. – V. 4. – P. 338–374.
8. Fish R. L., Hunter C. W. Tensile properties of fast reactor irradiated type 304 stainless steel. Irradiation effects on microstructure and properties of metals, ASTM STP 611 // *American Society for Testing and Materials*. – 1976. – P. 119–138.
9. Hunter C. W., Fish R. L., Holmes J. J. Channel Fracture in Irradiated EBR-II Type 304 Stainless Steel // *American Nuclear Society Transactions*. – 1972. – V. 15, N 1. – P. 254–255.
10. Huang F. H., Comparison of fracture behavior for low-swelling ferritic and austenitic alloys irradiated in the fast flux test facility (FFTF) to 180 dpa // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1992. – V. 43, N5. – P. 733–748.
11. Fukuya K. Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials // *J. Nuclear Science and Technology*. – 2013. – V. 50, N 3. – P. 213–254.
12. *Fractography: ASM Handbook*. – ASM International, The Materials Information Company, 1998. – V. 12.
13. Рожанский В. Н. О механизме развития зародышевых трещин в кристаллах при их пластическом деформировании // *Докл. АН СССР*. – 1958. – Т. 123, № 4. – С. 648–651.
14. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / В. С. Иванова, Л. К. Городиенко, В. Н. Геминев и др. – М.: Наука, 1965.
15. Foreman A. J. E., Sharp J. V. A mechanism for the sweeping-up of loops by glide dislocations during deformation // *Phil. Mag.* – 1969. – V. 19. – P. 931–937.
16. Си Г., Либовиц Г. Математическая теория хрупкого разрушения // *Разрушение. Т. 2: Математические основы теории разрушения / Под ред. Г. Либовиц*. – М.: Мир, 1975. – С. 84–203.
17. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
18. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Prometey local approach to brittle fracture: development and application // *Eng.Fract.Mech.* – 2008. – V. 75. – P. 3483–3498.
19. Chaouadi R. Effect of irradiation-induced plastic flow localization on ductile crack resistance behavior of a 9% Cr tempered martensitic steel // *JNM*. – 2008. – V. 372. – P. 379–390.

20. Patra A., McDowell D. L. Continuum modelling of localized deformation in irradiated bcc materials // JNM. – 2013. – V. 434. – P. 414–427.

21. Марголин Б. З., Сорокин А. А., Бучатский А. А., Швецова В. А., Прокошев О. Ю., Пирогова Н. Е. Характеристики и механизмы разрушения облученных аустенитных сталей в области повышенных температур и формулировка критерия разрушения. Часть 1. Экспериментальные исследования. Вопросы материаловедения. – 2022. – № 2 (110). – С. 185–202.

22. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955.

23. Chopra O. K., Rao A. S., A Review of irradiation effects on LWR core internal materials – Neutron embrittlement // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – V. 412. – P. 195–208.

24. Effect of neutron irradiation on tensile properties of materials for pressure vessel internals of WWER type reactors / A. A. Sorokin, B. Z. Margolin, I. P. Kursevich et al. // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – V. 444. – P. 373–384.

25. Petrov S. N., Prokoshev O. Yu., Margolin B. Z., Shumko A. M. Carbide forming special features and fracture mechanism under the austenitic chromium-nickel 304 steel post-life ageing // Materials Physics and Mechanics. – 2018. – V. 38, N 1.

CONTENTS

METALS SCIENCE. METALLURGY

Korotovskaya S.V., Melnikov P.V., Khlusova E.I. Influence of heat input level during welding on the formation of structure and properties in the heat-affected zone of high-strength steel with a yield strength of at least 690 MPa 5

Milyuts B.G., Tsukanov V.V. Influence of complex modification on gas content in shipbuilding steel 15

FUNCTIONAL MATERIALS

Nesterova E.D., Bobkova T.I., Goshkoderya M.E., Kashirina A.A., Yakovleva N.V. Microplasma deposition of functional coatings made of mechanically synthesized composite powders of the AlNiCoFeCr equiatomic system 24

Gerashchenkova E.Yu., Barkovskaya E.N., Gerashchenkov D.A., Serdyuk N.A., Farmakovskiy B.V., Vasiliev A.F.† Wear- and corrosion-resistant nanostructured functional coating obtained by high-speed cold gas-dynamic spraying 40

Volokitina E.V., Razumova L.V., Ozerskoy N.E., Borisov E.V., Razumov N.G., Popovich A.A. Production of high-entropy nitrogen-doped CoCrFeNiMn alloy by selective laser melting 47

Zhuravliova O.A., Voeikova T.A., Vlasova A.Yu., Kilochek A.I., Nikulina E.A., Tsiurulnikova N.V., Malakhov S.N., Egorov A.S. Development of new biocidal nanocomposite materials for protecting underwater structures from bio-fouling 59

POLYMER STRUCTURAL MATERIALS

Zlobina I.V., Aleksandrova D.S., Egorov A.S., Anisimov A.V. Changes in the properties of polyetheretherketone and composites based on it under the influence of low temperatures (review) 71

Anisimov A.V., Lishevich I.V., Sargsyan A.S., Lobyntseva I.V., Blyshko I.V., Sobolev M.Yu., Dvoryantsev D.D., Sharko E.A. Development and research of a new hybrid antifriction polymer composite material with dielectric properties 90

Dvoryantsev D.D., Anisimov A.V., Lishevich I.V., Sargsyan A.S., Sorokina E.P., Sharko E.A. Obtaining prepregs by impregnation of thermoplastic polymer with an aqueous suspension 100

Borukaev T.A., Kitieva L.I., Malamатов A.Kh. Composites based on polybutylene terephthalate and secondary polyethylene terephthalate 111

Tyurina S.A., Demin V.L., Golovin V.A.†, Shchelkov V.A., Rashutin N.A. Modern methods of water treatment. Scale formation in thermal engineering equipment 119

WELDING, WELDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES

Saraev Yu.N., Gorbach V.D.†, Golikov N.I. Methodology for improving technologies for production and repair of ship structures based on the integrated use of modern technologies, energy sources and welding materials 135

Leonov V.P., Nesterov D.M., Sakharov I.Yu., Kuznetsov S.V. Computational and experimental research of temperature fields when surfacing on a titanium pseudo-β-alloy 152

Igolkin A.I., Lebedeva N.V., Maksimenko I.A. High-strength brazed joints of titanium alloys 164

Artemiev A.A., Zorin I.V., Priyatkin D.V., Lysak V.I. Study of the influence of acoustic oscillations on the structure and wear resistance of deposited alloys of the Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C system 173

RADIATION MATERIALS SCIENCE

Margolin B.Z., Shvetsova V.A., Sorokin A.A., Pirogova N.E., Buchatsky A.A., Zernov E.A. Features of channel fracture for irradiated austenitic steels. Part 1. Experimental results 185

Margolin B.Z., Shvetsova V.A., Sorokin A.A., Zernov E.A., Pirogova N.E., Buchatsky A.A. Features of channel fracture for irradiated austenitic steels. Part 2. Channel fracture model and criterion 205

Guidelines for authors of the scientific and technical journal “Voprosy Materialovedeniya”. Manuscript requirements 225

INFLUENCE OF HEAT INPUT LEVEL DURING WELDING ON THE FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES IN THE HEAT-AFFECTED ZONE OF HIGH-STRENGTH STEEL WITH A YIELD STRENGTH OF AT LEAST 690 MPa

S.V. KOROTOVSKAYA, Cand Sc. (Eng), P.V. MELNIKOV, Cand Sc. (Eng), E.I. KHLUSOVA, Dr. Sc. (Eng)

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

Received February 12, 2025

Revised February 19, 2025

Accepted February 19, 2025

Abstract—The changes in the structure and properties in the heat-affected zone of high-strength steel grade E690 depending on the level of linear energy during welding are studied. Recommendations are given for the selection of welding modes to prevent degradation of the properties of welded joints.

Keywords: high-strength steel, mechanized and automatic welding, low-alloy welding materials, linear energy, heat-affected zone, structure, impact work, microhardness

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-5-14

REFERENCES

1. Shorshorov, M.Kh., *Metallovedenie svarki stali i splavov titana* [Metallurgy of welding of steel and titanium alloys], Moscow: Nauka, 1965.
2. Shorshorov, M.Kh., Belov, V.V., *Fazovye prevrashcheniya i izmenenie svoystv stali pri svarke* [Phase transformations and changes in steel properties during welding], 1972.
3. Grabin, V.F., Denisenko, A.V., *Metallovedenie i svarka nizko- i srednelegirovannykh staley* [Metal science and welding of low- and medium-alloy steels], Kiev: Naukova dumka, 1978.
4. Livshic, L.S., *Metallovedenie dlya svarshchikov* [Metal science for welders], Moscow: Mashinostroenie, 1979.
5. Rybakov, A.A., Vliyanie khimicheskogo sostava mikrolegirovannoi stali i skorosti okhlazhdeniya metalla ZTV svarnykh soedineniy trub na ego strukturu i udarnuyu vyazkost [The influence of the chemical composition of microalloyed steel and the cooling rate of metal in welded pipe joints on its structure and impact strength], *Avtomaticheskaya svarka*, 2013, No 9, pp. 10–18.
6. Makarov, E.L., *Svarka i svarivaemye materialy* [Welding and weldable materials], Moscow: Metallurgiya, 1991, V.1.
7. Makarov, E.L., *Kholodnye treshchiny pri svarke legirovannykh staley* [Cold cracks during welding of alloy steels], Moscow: Mashinostroenie, 1981.
8. Khlusova, E.I., Orlov, V.V., *Izmenenie struktury i svoystv v zone termicheskogo vliyaniya svarnykh soedineniy iz nizkouglerodistykh sudostroitelnykh i trubnykh staley* [Changes in the structure and properties in the zone of thermal influence of welded joints made of low-carbon shipbuilding and pipe steels], *Metallurg*, 2012, No 9, pp. 63–76.
9. Ardentov, V.V., Malyshevsky, V.A., Pravdina, N.N., Rybin, V.V., Semicheva, T.G., *Struktura i svoystva zony termicheskogo vliyaniya vysokoprochnoi konstruktsionnoi stali* [Structure and properties of the thermal impact zone of high-strength structural steel], *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 1985, No 5, p. 119.
10. Motovilina, G.D., Pazilova, U.A., Khlusova, E.I., *Vliyanie legirovaniya na strukturu i svoystva zony termicheskogo vliyaniya svarnogo soedineniya iz vysokoprochnoi khromonikelmolibdenovoi stali* [The effect of alloying on the structure and properties of the thermal effect zone of a welded joint made of high-strength chromium-nickel-molybdenum steel], *Voprosy Materialovedeniya*, 2006, No 1 (45).
11. Liessem, A., Erdelen-Peppler, M., *A critical view on the significance of HAZ toughness testing*, *Proceedings of IPC2004 International pipeline conference*, Calgary, Alberta, Canada, October 4–8, 2004.
12. State standard GOST R 52927-2023: *Prokat dlya sudostroeniya iz stali normalnoi, povyshennoi i vysokoi prochnosti. Tekhnicheskije usloviya* [Rolled products for shipbuilding made of normal, high-strength and high-strength steel. Technical specifications].
13. ND No 2-020101-174: *Pravila klassifikatsii i postroiiki morskikh sudov* [Rules for the classification and construction of naval vessels], *Rossiisky morskoi registr sudokhodstva*.

14. Pozdnyakov, V.D., Zavdoveev, A.V., Gaivoronsky, A.A., Denisenko, A.M., Maksimenko, A.A., Vliyanie rezhimov impulsno-dugovoi svarki na parametry metala shva i ZTV svarnykh soedineniy, vypolnennykh provolokoi Sv-08H20N9G7T [The influence of pulse-arc welding modes on the parameters of seam metal and welded joints made with Sv-08H20N9G7T wire], *Avtomaticheskaya svarka*, 2018, No 9, pp. 9–15.

UDC 669.14.018.293:669.046.516

INFLUENCE OF COMPLEX MODIFICATION ON GAS CONTENT IN SHIPBUILDING STEEL

V.G. MILYUTS, V.V. TSUKANOV, Dr Sc. (Eng)

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

Received November 5, 2024

Revised November 13, 2024

Accepted November 13, 2024

Abstract—Behavior of gases at the stages of production of high-strength vessel steel made with REM complex material and standard technology of steel modification by ferrocalcium has been investigated. It has been shown that the nitrogen content in steel increases regardless of which of the tested modifying treatment methods was used, from liquid castings to sheet metal rolling. Oxygen content regardless of the modifying method increases in liquid metal including casting, after which it decreases significantly in slab and sheets. Modification of high-strength vessel steel by complex alloys with REM allows to reduce the hydrogen content in the metal.

Keywords: high-strength vessel steel, REM and ferrocalcium modification, hydrogen, nitrogen, oxygen in steel

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-15-23

REFERENCES

1. Morozov, A.N., *Vodorod i azot v stali* [Hydrogen and nitrogen in steel], Moscow: Metallurgiya.
2. *Vodorod v stali* [Hydrogen in steel], Alefeld, G., Felkl, I. (Eds.), V. 1, 2, Moscow: Mir, 1981.
3. Shapovalov, V.I., Trofimenko, V.V., *Flokeny i kontrol vodoroda v stali* [Flocks and hydrogen control in steel], Moscow: Metallurgiya, 1987.
4. Savitsky, E.M., Terekhova, V.F., *Metallovedenie redkozemelnykh metallov* [Metallography of rare earth metals], Moscow: Nauka, 1975.
5. Yakushev, A.M., Kryakovskiy, Yu.V., Tyurin, E.I., et al., Vliyanie redkozemelnykh elementov na flokenochuvstvitelnost konstruktsionnykh legirovannykh staley [The influence of rare earth elements on the flocculation sensitivity of structural alloy steels], *Metallurg*, 1961, No 12, pp. 9–11.
6. Shulte, Yu.A., *Elektrometallurgiya stalnogo litya* [Electrometallurgy of steel casting], Moscow: Metallurgiya, 1970.
7. Milyuts, V.G., Malakhov, N.V., Vladimirov, N.F., Batov, Yu.M., Vliyanie alyuminiya i kaltsiya na plastichnost tolstolistovoi sudostroitelnoi stali v Z-napravlenii [The effect of aluminum and calcium on the ductility of thick-sheet shipbuilding steel in the Z-direction], *Metallurg*, 2011, No 2, pp. 58–60.
8. Milyuts, V.G., Tsukanov, V.V., Malykhina, O.Yu., Nasonovskaya, A.B., Vladimirov, A.G., Golubtsov, V.A., Levagin, E.Yu., Vliyanie kompleksnogo modifitsirovaniya vysokoprochnoi sudostroitelnoi stali na sostav i morfologiyu nemetallicheskih vklucheny [The effect of complex modification of high-strength shipbuilding steel on the composition and morphology of nonmetallic inclusions], *Voprosy Materialovedeniya*, 2013, No 4 (76), pp. 5–14.
9. Milyuts, V.G., Vladimirov, N.F., Batov, Yu.M., Razvitie tekhnologii proizvodstva slitkov vysokoprochnoi korpusnoi stali dlya izgotovleniya tolstykh listov. Ch. 1 [The development of technology for the production of high-strength body steel ingots for the manufacture of thick sheets. Part 1], *Elektrometallurgiya*, 2014, No 9, pp. 16–22.
10. Milyuts, V.G., Tsukanov, V.V., Petrov, S.N., Efimov, S.V., Povyshenie chistoty korpusnoi stali, obrabotannoi kompleksnymi modifikatorami [Improving the purity of body steel treated with complex modifiers], *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, No 3 (87), pp. 14–22.
11. Shub, L.G., Usmanov, R.G., Makarov, V.V., Lyamin, O.P. Vliyanie sostava metalloshikhty na kachestvo stali 25L [The effect of the metal charge composition on the quality of 25L steel], *Liteinoe proizvodstvo*, 2004, No 6, pp. 6–7.
12. Shub, L.G., Makarov, V.V., Lyamin, O.P., Usmanov, R.G., Povedenie azota v kisloi induktsionnoi plavke [Behavior of nitrogen in acid induction melting], *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2003, No 5, pp. 5–6.

MICROPLASMA DEPOSITION OF FUNCTIONAL COATINGS MADE OF MECHANICALLY SYNTHESIZED COMPOSITE POWDERS OF THE AlNiCoFeCr EQUIATOMIC SYSTEM

E.D. NESTEROVA, T.I. BOBKOVA, Cand Sc (Eng), M.E. GOSHKODERYA,
A.A. KASHIRINA, N.V. YAKOVLEVA

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

Received August 14, 2024

Revised September 16, 2024

Accepted September 16, 2024

Abstract—In the presented work, the approach of solid-phase alloying of a multicomponent system is tested for the first time as applied to an equiatomic mixture of single-phase powders of Al, Ni, Co, Fe and Cr and microplasma spraying of coatings based on them. It is established that in the process of mechanochemical synthesis, a composite powder is formed, which is rounded conglomerates of the "5me" system, with a granulometric distribution from 10 to 110 μm . Studies of the structure and properties of coatings showed the formation of gradients of microhardness and elemental composition, but homogeneity increases with an increase in the duration of mechanosynthesis. In the coatings after 15 minutes of mechanochemical synthesis of the composite powder, Fm3m, Im3m and Pm3m phases are formed, the pores are located along the boundaries of the interweavings (porosity 4.8%), in the distribution of microhardness it was possible to identify two areas with microhardness values of 600 HV and 300 HV (less than 10%) with an average deviation of 7%, adhesion to the steel substrate was 54 MPa.

Keywords: functional coatings, microplasma spraying, composite powders, solid-phase alloying, mechanochemical synthesis

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-24-39

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation, project No 21-73-30019.

REFERENCES

1. Yeh, J.W., Chen, S.K., Lin, S.J., et al., Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principle Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes, *Advanced Engineering Materials*, 2004, V. 6, Is. 5, pp. 299–303.
2. Wang, Y.P., Li, B.Sh., Heng, Zh.F., Solid Solution or Intermetallics in a High Entropy Alloy, *Advanced Engineering Materials*, 2009, V. 11, Is. 8, pp. 641–644.
3. Middleburgh, S.C., King, D.M., Lumpkin, G.R., Atomic scale modelling of hexagonal structured metallic fission product alloys, *Royal Society Open Science*, 2015, No 2 (4).
4. Zhang, Y., Zuo, T.T., Tang, Z.G., Michael, C., Dahmen, K.A., Liaw, P.K., Lu, Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys, *Progress in Materials Science*, 2014, No 61, pp. 1–93.
5. Otto, F., Yang, Y., Bei, H., George, E.P., Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloy, *Acta Materialia*, 2013, No 67 (7), pp. 2628–2638.
6. Greer, A.L., Confusion by design, *Nature*, 1993, No 366 (6453), pp. 303–304.
7. Zhang, Y., Zhou, Y.J., Lin, J.P., Chen, G.L., Liaw, P.K., Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys, *Advanced Engineering Materials*, 2008, No 10 (6), pp. 534–538.
8. Takeuchi, A., Inoue, A., Classification of Bulk Metallic Glasses by Atomic Size Difference, Heat of Mixing and Period of Constituent Elements and Its Application to Characterization of the Main Alloying Element, *Materials Transactions*, 2005, No 46 (12), pp. 2817–2829.
9. Yang, X., Zhang, Y., Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys, *Materials Chemistry and Physics*, 2012, No 132 (2–3), pp. 133–138.
10. Li, X., Feng, Y., Liu, B., Yi, D., Yang, X., Zhang, W., Chen, G., Liu, Y., Bai, P., Influence of NbC particles on microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding, *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, No 778 (6), pp. 485–494.

11. Ang, A.S.M., Berndt, C.C., Sesso, M.L., Anupam, A., Kottada, R.S., Murty, B.S., Plasma-sprayed high entropy alloys: microstructure and properties of AlCoCrFeNi and MnCoCrFeNi, *Metallurgical and Materials Transactions*, 2015, No 46, pp. 791–800.

12. Jin, B., Zhang, N., Yin, S., Strengthening behavior of AlCoCrFeNi(TiN) high-entropy alloy coatings fabricated by plasma spraying and laser remelting, *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, No 121, pp. 163–173.

13. Li, C., Li, J., Effect of aluminum contents on microstructure and properties of AlxCoCrFeNi alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, No 504 (1), pp. 515–518.

14. Semikolenov, A., Kuznetsov, P., Shalnovaetal, S., Microstructure Evolution of FeNiCoCrAl1.3Mo0.5 High Entropy Alloy during Powder Preparation, Laser Powder Bed Fusion, and Microplasma Spraying, *Materials*, 2021, No 14.

UDC 621.793.7:621.762.2

WEAR- AND CORROSION-RESISTANT NANOSTRUCTURED FUNCTIONAL COATING OBTAINED BY HIGH-SPEED COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING

E.Yu. GERASHCHENKOVA, E.N. BARKOVSKAYA, D.A. GERASHCHENKOV, Dr Sc (Eng), N.A. SERDYUK, B.V. FARMAKOVSKY, Cand. Sc. (Eng), A.F. VASILIEV†

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

Received November 18, 2024

Revised December 12, 2024

Accepted December 12, 2024

Abstract—The paper presents the results of developing the optimal composition of a precision copper-nickel alloy, from which composite powders, the surface of which is plated with titanium diboride, are obtained by high-speed mechanosynthesis. Functional coatings are made from the composite powders by cold gas-dynamic spraying on a DIMET-3 unit. The resulting coatings are characterized by high microhardness (24–26 GPa) and have a long service life (10,000 hours).

Keywords: composite powder, functional coating, copper-nickel alloy, clad powder

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-40-46

REFERENCES

1. Mettyuz, F., Rolings, R., *Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya* [Composite materials. Mechanics and technology], Moscow: Tekhnosfera, 2004.

2. Zhabrev, V.A., Margolin, V.I., Pavelev, V.S., *Vvedenie v nanotekhnologiyu (obshchie svedeniya, ponyatiya i opredeleniya)* [Introduction to nanotechnology (general information, concepts and definitions)]: study guide, Samara: SGAU, 2007.

3. Patent Ru 2816077: *Sposob polucheniya kompozitsionnogo poroshkovogo materiala dlya nanoseniya funktsionalnykh pokryty s vysokoi iznosostoikostyu* [A method for obtaining a composite powder material for applying functional coatings with high wear resistance], Farmakovskiy, B.V., Gerashchenkov, D.A., Vasiliev, A.F., Bystrov, R.Yu., Samodelkin, E.A., Shakirov, I.V., Korkina, M.A., Bobkova, T.I., 2024.

4. Gerashchenkova, E.Yu., Samodelkin, E.A., Gerashchenkov, D.A., Vasiliev, A.F., Farmakovskiy B.V, *Nanos-trukturirovannye kompozitsionnye poroshki dlya polucheniya zashchitnykh pokryty detalei i uzlov mashinostroeniya* [Nanostructured composite powders for the production of protective coatings for mechanical engineering parts and assemblies], *Voprosy Materialovedeniya*, 2021, No 1 (105), pp. 52–59.

5. Burkhanov, G.S., Dementiev, V.A., *Tugoplavkie monokarbidy i diboridy perekhodnykh metallov – perspektivnye komponenty vysokotemperaturnykh kompozitsionnykh materialov* [Refractory monocarbides and diborides of transition metals as promising components of high-temperature composite materials], *Voprosy Materialovedeniya*, 2017, No 2 (90), pp. 57–67

6. Kosarev, V.F., Alkhimov, A.P., *Gazodinamicheskoe napylenie. Novye tekhnologii i oborudovanie* [Gas dynamic spraying. New technologies and equipment], *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2003, No 3 (19), pp. 28–30.

7. Alkhimov, A.P., Klinkov, S.V., Kosarev, V.F., Fomin, V.M., *Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie: Teoriya i praktika* [Cold gas dynamic spraying: Theory and practice], Moscow: Izdatelskaya firma “Fiziko-matematicheskaya literatura”, 2010.

8. Tushinsky, L.I., Plokhov, A.V., Mochalina, N.S., et al., Structure and properties of aluminum coatings obtained by the cold gas-dynamic spraying method, *Thermophysics and Aeromechanics*, 2006, V. 13, No 1, pp. 125–129. DOI 10.1134/S153186990601014X

9. Kashirin, A.I., Shkodkin, A.V., Metod gazodinamicheskogo napyleniya metallicheskih pokryty: razvitie i sovremennoe sostoyanie [The method of gas dynamic spraying of metal coatings: development and current state], *Up-rochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2007, No 12 (36), pp. 22–33.

10. Gerashchenkov, D.A., Sobolev, M.Yu., Markov, M.A., Gerashchenkova, E.Yu., Bykova, A.D., Krasikov, A.V., Makarov, A.M., Tribotekhnicheskie svoystva metallokeramicheskikh pokryty Al-Sn-Zn-Al₂O₃ dlya par treniya [Tribotechnical properties of Al-Sn-Zn-Al₂O₃ metal-ceramic coatings for friction pairs], *Trenie i iznos*, 2018, V. 39, No 6, pp. 669–675.

11. Makarov, A.M., Gerashchenkov, D.A., Markov, M.A., Gerashchenkova, E.Yu., Belyakov, A.N., Bykova, A.D., Aleksandrov, S.E., Study of the method of obtaining functional interest-metallic coatings based on Ni-Ti reinforced with WC nanoparticles, *Key Engineering Materials*, 2019, V. 822, pp. 760–767.

12. Alekseeva, E., Shishkova, M., Strekalovskaya, D., Shaposhnikov, N., Gerashchenkov, D., Glukhov, P., Performance of Ni-based coatings with various additives fabricated by cold gas spraying, *Metals*, 2022, V. 12, No 2.

13. Bobkova, T.I. Gerashchenkov, D.A., Farmakovskiy, B.V., Klimov, V.N., Osobennosti formirovaniya iznosostoykikh pokryty iz poroshkov, poluchennykh s pomoshchyu mikrometallurgicheskogo protsessa vysokoskorostnoi zakalki rasplava [Features of the formation of wear-resistant coatings from powders obtained using the micrometallurgical process of high-speed melt quenching], *Metallurg*, 2016, No 10, pp. 91–97.

14. GOST 5272-68: *Korroziya metallov*. Terminy [Corrosion of metals. Terms], Last modified 23.06.2009.

15. Patent 2561615 RU: *Sposob polucheniya kompozitsionnogo plakirovannogo poroshka dlya nanoseniya pokryty* [A method for obtaining composite clad powder for coating], Eshmemetieva, E.N., Samodelkin, E.A., Gerashchenkova, E.Yu., Farmakovskiy, B.V., Yurkov, M.A., Klimov, V.N., Nizkaya, A.V., 2014.

16. Marennikov, N.V., Gerashchenkov, D.A., Burkanova, E.Yu., Samodelkin, E.A., Razrabotka tekhnologicheskikh podkhodov polucheniya nanostrukturirovannykh kompozitsionnykh poroshkov metodom sverkhskorostnogo mekhanosinteza [Development of technological approaches for the production of nanostructured composite powders by ultra-high-speed mechanosynthesis], *Voprosy Materialovedeniya*, 2010, No 2 (62), pp. 64–67.

17. Gerashchenkov, D.A., Farmakovskiy, B.V., Samodelkin, E.A., Gerashchenkova, E.Yu., Issledovanie adgezionnoi prochnosti kompozitsionnykh armirovannykh pokryty sistemy metall – nemetall, poluchennykh metodom kholodnogo gazodinamicheskogo napyleniya [Investigation of the adhesive strength of composite reinforced coatings of the metal–nonmetal system obtained by cold gas dynamic spraying], *Voprosy Materialovedeniya*, 2014, No 2 (78), pp. 103–117.

18. Makarov, A.M., Gerashchenkov, D.A., Vasiliev, A.F., Optimizatsiya parametrov protsessa napyleniya pokryty metodom KhGDN primenitelno k usloviyam proizvodstva na primere poroshka alyuminiya [Optimization of the parameters of the coating spraying process by the CGDS method in relation to production conditions using the example of aluminum powder], *Voprosy Materialovedeniya*, 2017, No 2 (90), pp. 116–123.

19. Bely, O.V., et al., *Perspektivnye napravleniya razvitiya nauki v Peterburge* [Promising areas of science development in St. Petersburg], St Petersburg scientific centre RAN, Alferov, Zh.I. et al. (Ed.), St Petersburg, 2015.

UDC 620.1

PRODUCTION OF HIGH-ENTROPY NITROGEN-DOPED CoCrFeNiMn ALLOY BY SELECTIVE LASER MELTING

E.V. VOLOKITINA, L.V. RAZUMOVA, Cand. Sc. (Eng), N.E. OZERSKOY,
E.V. BORISOV, Cand. Sc. (Eng), N.G. RAZUMOV, Dr. Sc. (Eng), A.A. POPOVICH, Dr. Sc. (Eng)

Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 29 Polytekhnicheskaya St, 195251 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: volokitina1606@gmail.com

Received November 14, 2024

Revised December 5, 2024

Accepted December 10, 2024

Abstract—The paper presents the research results on high-entropy CoCrFeNiMnNx alloy obtained by selective laser melting. Powders of high-entropy alloy CoCrFeNiMnNx (with calculated nitrogen content $x = 0.1$ wt.%, 0.2 wt.%, 0.5 wt.%) are manufactured by mechanical alloying followed by plasma spheroidization. Alloys mechanical properties and its compaction by selective laser melting were investigated at room and cryogenic temperatures. Alloys with nitrogen content of 0.1 and 0.2 wt.% show an increase in mechanical properties at decreasing temperature. The conditional yield strength increased by 27.2 and 63.3% , the ultimate strength by 30.8 and 52.7% , respectively. The study was carried

out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant Agreement No 075-03-2024-004).

Keywords: high-entropy alloy, selective laser melting, powder metallurgy, mechanical alloying, additive technologies

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-47-58

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant Agreement No 075-03-2024-004).

REFERENCES

1. Yeh, J.W., et al., Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes, *Adv. Eng. Mater.*, 2004, V. 6, No 5, pp. 299–303.
2. Yeh, J.W., Recent progress in high-entropy alloys, *Annales de Chimie Science des Matériaux*, 2006, V. 31, No 6, pp. 633–648.
3. Cantor, B., et al., Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys, *Materials Science and Engineering A*, 2004, V. 375–377, No 1–2 (Spec. issue), pp. 213–218.
4. Laurent-Brocq, M., et al., Insights into the phase diagram of the CrMnFeCoNi high entropy alloy, *Acta Mater.*, 2015, V. 88, pp. 355–365.
5. Otto, F., et al., The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy, *Acta Mater.*, 2013, V. 61, No 15, pp. 5743–5755.
6. Laplanche, G., et al., Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy, *Acta Mater.*, 2016, V. 118, pp. 152–163.
7. Li, N., et al., Progress in additive manufacturing on new materials: A review, *J Mater Sci Technol.* 2019, V. 35, No 2, pp. 242–269.
8. Li, R., et al., Selective laser melting of an equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloy: Processability, non-equilibrium microstructure and mechanical property, *J Alloys Compd.*, 2018, V. 746, pp. 125–134.
9. Zhu, Z.G., et al., Hierarchical microstructure and strengthening mechanisms of a CoCrFeNiMn high entropy alloy additively manufactured by selective laser melting, *Scr Mater.*, 2018, V. 154, pp. 20–24.
10. Chen, P., et al., Fabricating CoCrFeMnNi high entropy alloy via selective laser melting in-situ alloying, *J. Mater Sci Technol.*, 2020, V. 43, pp. 40–43.
11. Moravcik, I., et al., Interstitial doping enhances the strength-ductility synergy in a CoCrNi medium entropy alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2020, V. 781, p. 139242.
12. Beyramali Kivy, M., Kriewall, C.S., Asle Zaeem, M., Formation of chromium-iron carbide by carbon diffusion in $\text{Al}_x\text{CoCrFeNiCu}$ high-entropy alloys, *Mater Res Lett.*, 2018, V. 6, No 6, pp. 321–326.
13. He, Z.F., et al., The effect of strain rate on mechanical properties and microstructure of a metastable FeMnCoCr high entropy alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2020, V. 776, p. 138982.
14. Chou, Y.L., et al., Pitting corrosion of the high-entropy alloy $\text{Co}_{1.5}\text{CrFeNi}_{1.5}\text{Ti}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}$ in chloride-containing sulphate solutions, *Corros Sci.*, 2010, V. 52, No 10, pp. 3481–3491.
15. Wang, Z., et al., On the mechanism of extraordinary strain hardening in an interstitial high-entropy alloy under cryogenic conditions, *J. Alloys Compd.*, 2019, V. 781, pp.734–743.
16. Lu, E., et al., Enhancement of vacancy diffusion by C and N interstitials in the equiatomic FeMnNiCoCr high entropy alloy, *Acta Mater.*, 2021, V. 215, p. 117093.
17. Ye, Y. X., et al., Effect of interstitial oxygen and nitrogen on incipient plasticity of NbTiZrHf high-entropy alloys, *Acta Mater.*, 2020, V. 199, pp. 413–424.
18. Wang, Z., et al., The effect of interstitial carbon on the mechanical properties and dislocation substructure evolution in $\text{Fe}_{40.4}\text{Ni}_{11.3}\text{Mn}_{34.8}\text{Al}_{7.5}\text{Cr}_6$ high entropy alloys, *Acta Mater.*, 2016, V. 120, pp. 228–239.
19. Song, M., et al., Nitrogen induced heterogeneous structures overcome strength-ductility trade-off in an additively manufactured high-entropy alloy, *Appl Mater Today.*, 2020, V. 18, p. 100498.
20. Klimova, M., et al., Effect of nitrogen on mechanical properties of CoCrFeMnNi high entropy alloy at room and cryogenic temperatures, *J. Alloys Compd.*, 2020, V. 849, p. 156633.

DEVELOPMENT OF NEW BIOCIDAL NANOCOMPOSITE MATERIALS FOR PROTECTING UNDERWATER STRUCTURES FROM BIOFOULING

O.A. ZHURAVLIOVA¹, Cand Sc. (Chem), T.A. VOEIKOVA¹, Cand Sc. (Biol), A.Yu. VLASOVA¹, A.I. KILOCHEK^{1,2}, E.A. NIKULINA³, Cand Sc. (Tech), N.V. TSIRULNIKOVA³, Dr Sc. (Chem), S.N. MALAKHOV¹, Cand Sc. (Chem), A.S. EGOROV³, Cand Sc. (Chem)

¹ *Bioresource Center of the Russian National Collection of Industrial Microorganisms of National Research Center “Kurchatov Institute”, 1 Akademika Kurchatova Sq, 123182 Moscow, Russian Federation. E-mail: zhuravlevaolgga@yandex.ru*

² *Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semionovskaya St, 107023 Moscow, Russian Federation*

³ *IREA of NRC “Kurchatov Institute”, 1 Akademika Kurchatova Sq, 123182 Moscow, Russian Federation*

Received July 31, 2024

Revised January 13, 2025

Accepted January 14, 2025

Abstract—The NRC “Kurchatov Institute” is working on the creation of antimicrobial nanocomposites containing biogenic colloidal nanosilver (NPsAg). Biogenic NPsAg obtained by microbial synthesis using bacterial cells and AgNO₃ solution in liquid and dry preparative forms. To protect underwater objects from biofouling, a composition has been developed that includes complex chelated compounds of transition metals Cu, Zn and biogenic NPsAg. Cu and Zn chelates are synthesized by a complexation reaction, the antimicrobial activity of which increases with the introduction of NPsAg. It has been established that NPsAg keep stability and biocidal effect during prolonged exposure to seawater, which is important for their utilization as part of antifouling coatings. The technology of introducing biocidal NPsAg into the composition of polymer nonwovens and ion exchange resins of various types has been developed.

Keywords: biofouling, transition metal complexes, biogenic synthesis of silver nanoparticles, nanocomposites, nonwovens, ion exchange resins

DOI: 10.22349/1994-6716-2024-120-4-59-70

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to the Bioresource Center of the Russian National Collection of Industrial Microorganisms of National Research Center “Kurchatov Institute” for providing strains of microorganisms.

When performing the work, the equipment of the Resource Center “Optics” of NRC “Kurchatov Institute” was used.

The work was carried out within the state assignment of NRC “Kurchatov Institute”.

REFERENCES

1. Yan, S., Song, G.L., Li, Z., Wang, H., Zheng, D., Cao, F., Khorynova, M., Dargusch, M.S., Zhou, L., A state-of-the-art review on passivation and biofouling of Ti and its alloys in marine environments, *Journal of materials science & technology*, 2018, V. 34, No 3, pp. 421–435. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.11.021>
2. Garibay-Valdez, E., Martínez-Córdova, L.R., Vargas-Albores, F., Emerenciano, M.G., Miranda-Baeza, A., Cortés-Jacinto, E., Ortiz-Estrada, Á.M., Cicala, F., Martínez-Porchas, M., The biofouling process: The science behind a valuable phenomenon for aquaculture, *Reviews in Aquaculture*, 2023, V. 15, No 3, pp. 976–990. URL: <https://doi.org/10.1111/raq.12770>
3. Schultz, M.P., Walker, J.M., Steppe, C.N., Flack, K.A., Impact of diatomaceous biofilms on the frictional drag of fouling-release coatings, *Biofouling*, 2015, V. 31, pp. 759–773. URL: <https://doi.org/10.1080/08927014.2015.1108407>
4. Li, L., Hong, H., Cao, J., Yang, Y., Progress in Marine Antifouling Coatings: Current Status and Prospects, *Coatings*, 2023, V. 13, pp. 1893. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings13111893>
5. Jiang, D., Xue, Q., Liu, Z., Han, J., Wu, X., Novel anti-algal nanocomposite hydrogels based on thiol/acetyl thioester groups chelating with silver nanoparticles, *New J. Chem.*, 2017, V. 41, pp. 271–277. URL: <https://doi.org/10.1039/C6NJ02246D>
6. Miller, R.J., Adeleye, A.S., Page, H.M., Kui, L., Lenihan, H.S., Keller, A.A., Nano and traditional copper and zinc antifouling coatings: Metal release and impact on marine sessile invertebrate communities, *J. Nanopart. Res.*, 2020, V. 22, pp. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1007/s11051-020-04875-x>

7. Nyabadza, A., McCarthy, E., Makhesana, M., Heidarinassab, S., Plouze, A., Vazquez, M., Brabazon, D., A review of physical, chemical and biological synthesis methods of bimetallic nanoparticles and applications in sensing, water treatment, biomedicine, catalysis and hydrogen storage, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2023, p. 103010. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103010>

8. *Natsionalny bioresursny tseñtr* [National Bioresource Center]: All-Russian collection of industrial microorganisms of the National Research Center “Kurchatov Institute”. URL: <https://vkpm.genetika.ru/>

9. Zhuravliova, O.A., Voeikova, T.A., Vlasova, A.Yu., Malakhov, S.N, Patsaev, T.D., Vasiliev, A.L., Bulushova, N.V., Debabov, V.G., Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using the *Shewanella oneidensis* MR-1 Strain. Technological Approaches to Increasing the Production and Creating of Preparative Forms of Biogenic Nanomaterial, *Nanobiotechnology Reports*, 2023, V. 18, No 3, pp. 384–396. URL: <https://doi.org/10.1134/S263516762370026X>

10. Lurie, A.A., *Sorbenty i khromatograficheskie nositeli* [Sorbents and chromatographic media]: handbook, Moscow: Khimiya, 1972.

11. *Opredelenie antimikrobnnoi aktivnosti antibiotikov metodom diffuzii v agar* [Determination of antimicrobial activity of antibiotics by diffusion into agar], OFS. 1.2.4.0010.18 M, Moscow, 2018.

12. Alsharif, S.M., Salem, S.S., Abdel-Rahman, M.A., Fouda, A., Eid, A.M., Hassan, S.E.D., Mohamed, A.A., Awad M. A. Multifunctional properties of spherical silver nanoparticles fabricated by different microbial taxa, *Heliyon*, 2020, V. 6, No 5. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03943>

UDC 678.073:536.485

CHANGES IN THE PROPERTIES OF POLYETHERETHERKETONE AND COMPOSITES BASED ON IT UNDER THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES (REVIEW)

I.V. ZLOBINA^{1,2}, Cand Sc. (Eng), D.S. ALEXANDROVA¹,
A.S. EGOROV¹, Cand Sc. (Chem), A.V. ANISIMOV³, Dr Sc. (Eng).

¹ NRC “Kurchatov Institute”, 1 Akademika Kurchatova Sq, 123182 Moscow,
Russian Federation E-mail: egorov@irea.org.ru

² Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin State Technical University,
77 Polytekhnicheskaya St, 410054 Saratov, Russian Federation.

³ NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,
Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru

Received September 23, 2024

Revised November 7, 2024

Accepted November 7, 2024

Abstract—The present work is devoted to the review of studies considering the influence of low and ultra-low temperatures on the properties of polyetheretherketone (PEEK) and composites based on it. The reviewed studies describe the changes in the physical-mechanical, thermo-mechanical, thermal and tribological properties of PEEK at low temperatures, as well as the influence of different fillers on the changes in these properties. The works presented in this review analyze the opportunities, prospects and limitations of PEEK applications under conditions of permanent or temporary exposure to low temperatures. Understanding the trends described in the presented studies can help in modeling the properties of various PEEK-based composites and designing products intended for low-temperature applications.

Keywords: polyetheretherketone, composite materials, reduced temperatures, physical and mechanical properties

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-71-89

ACKNOWLEDGMENTS

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

REFERENCES

1. Bhong, M., et al., Review of composite materials and applications, *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.10.026

2. Nikonovich, M., et al., Structural, thermal, and mechanical characterisation of PEEK-based composites in cryogenic temperature, *Polymer Testing*, 2023, V. 125, p. 108139. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2023.108139
3. Domininghaus, H., Haim, J., Hyatt, D., *Plastics for Engineers: Materials, Properties, Applications*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 1992.
4. Rae, P.J., Brown, E.N., Orlor, E.B., The mechanical properties of poly (ether-ether-ketone)(PEEK) with emphasis on the large compressive strain response, *Polymer*, 2007, V. 48, No 2, pp. 598–615. DOI: 10.1016/j.polymer.2006.11.032.
5. Wang, Z., et al., *Evaluating the potential of thermoplastic polymers for cryogenic sealing applications: strain rate and temperature effects*, arXiv preprint arXiv: 2406.01165, 2024.
6. El-Qoubaa, Z., Othman, R., Strain rate sensitivity of polyetheretherketone's compressive yield stress at low and high temperatures, *Mechanics of Materials*, 2016, V. 95, pp. 15–27. DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.12.008
7. Chu, X.X., et al., Mechanical and thermal expansion properties of glass fibers reinforced PEEK composites at cryogenic temperatures, *Cryogenics*, 2010, V. 50, No 2, pp. 84–88.
8. Garcia-Gonzalez, D., et al., Low temperature effect on impact energy absorption capability of PEEK composites, *Composite Structures*, 2015, V. 134, pp. 440–449. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.08.090
9. Hohe, J., et al., Effect of cryogenic environments on failure of carbon fiber reinforced composites, *Composites Science and Technology*, 2021, V. 212, p. 108850. DOI: j.compscitech.2021.108850
10. Aoki, T., et al., Cryogenic mechanical properties of CF/polymer composites for tanks of reusable rockets, *Advanced composite materials*, 2001, V. 10, No 4, pp. 349–356. DOI: 10.1163/156855101753415373
11. Adams, R.D., Gaitonde, J.M., Low-temperature flexural dynamic measurements on PEEK, HTA and some of their carbon fibre composites, *Composites science and technology*, 1993, V. 47, No 3, pp. 271–287. DOI: 10.1016/0266-3538(93)90036-G
12. Zhang, Z., Hartwig, G., Low-temperature viscoelastic behavior of unidirectional carbon composites, *Cryogenics*, 1998, V. 38, No 4, pp. 401–405. DOI: 10.1016/S0011-2275(98)00022-8
13. Pheysey, J., et al., Strain rate and temperature dependence of short/unidirectional carbon fibre PEEK hybrid composites, *Composites Part B: Engineering*, 2024, V. 268, p. 111080. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.111080
14. Ahlborn, K., Cryogenic mechanical response of carbon fibre reinforced plastics with thermoplastic matrices to quasi-static loads, *Cryogenics*, 1991, V. 31, No 4, pp. 252–256. DOI: 10.1016/0011-2275(91)90087-D
15. Ahlborn, K., Durability of carbon fibre reinforced plastics with thermoplastic matrices under cyclic mechanical and cyclic thermal loads at cryogenic temperatures, *Cryogenics*, 1991, V. 31, No 4, pp. 257–260. DOI: 10.1016/0011-2275(91)90088-E
16. Nikonovich, M., Ramalho, A., Emami, N., Effect of cryogenic aging and test-environment on the tribological and mechanical properties of PEEK composites, *Tribology International*, 2024, V. 194, p. 109554. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109554
17. Karger-Kocsis, J., Friedrich, K., Temperature and strain-rate effects on the fracture toughness of poly (ether ether ketone) and its short glass-fibre reinforced composite, *Polymer*, 1986, V. 27, No 11, pp. 1753–1760. DOI: 10.1016/0032-3861(86)90272-7
18. Sasuga, T., Hagiwara, M., Mechanical relaxation of crystalline poly (aryl-ether-ether-ketone)(PEEK) and influence of electron beam irradiation, *Polymer*, 1986, V. 27, No 6, pp. 821–826. DOI: 10.1016/0032-3861(86)90288-0
19. Karthikeyan, L., et al., Poly (ether ether ketone) is processed through extrusion-machining and 3D printing: A comparative study on mechanical, thermal and fracture properties at ambient and cryogenic environments, *Journal of Elastomers & Plastics*, 2021, V. 53, No 6, pp. 672–683. DOI: 10.1177/0095244320961830
20. Wang, Q., Zheng, F., Wang, T., Tribological properties of polymers PI, PTFE and PEEK at cryogenic temperature in vacuum, *Cryogenics*, 2016, V. 75, pp. 19–25. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2016.01.001
21. Theiler, G., et al., Friction and wear of carbon fibre filled polymer composites at room and low temperatures, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe*, 2004, V. 35, No 10–11, pp. 683–689. DOI: 10.1002/mawe.200400827
22. Ptak, A., Taciak, P., Wieleba, W., Effect of temperature on the tribological properties of selected thermoplastic materials cooperating with aluminium alloy, *Materials*, 2021, V. 14, No 23, p. 7318. DOI: 10.3390/ma14237318
23. Cui, W., et al., Role of transfer film formation on the tribological properties of polymeric composite materials and spherical plain bearing at low temperatures, *Tribology International*, 2020, V. 152, p. 106569. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106569

24. Farrow, G.J., et al., Thermal expansion of PEEK between 80 and 470K, *Journal of materials science letters*, 1990, V. 9, pp. 743–744. DOI: 10.1007/BF00721820

25. Schwarz, G., Krahn, F., Hartwig, G., Thermal expansion of carbon fibre composites with thermoplastic matrices, *Cryogenics*, 1991, V. 31, No 4, pp. 244–247. DOI: 10.1016/0011-2275(91)90085-B

UDC 678.067: 621.891

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A NEW HYBRID ANTIFRICTION POLYMER COMPOSITE MATERIAL WITH DIELECTRIC PROPERTIES

A.V. ANISIMOV, Dr Sc. (Eng), I.V. LISHEVICH, Cand Sc. (Eng), A.S. SARGSYAN, Cand Sc. (Eng),
I.V. LOBYNTSEVA, I.V. BLYSHKO, M.Yu. SOBOLEV, D.D. DVORYANTSEV,
E.A. SHARKO

*NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg,
Russian Federation. E-mail: npk11@crism.ru*

Received November 12, 2024

Revised January 16, 2025

Accepted January 16, 2025

Abstract—The work is devoted to the study of physical and mechanical properties and tribotechnical characteristics of new hybrid antifriction polymer composite materials (PCM). The influence of hybrid fabric composition on physical-mechanical properties and tribotechnical characteristics of hybrid PCMs has been investigated. It is shown that new hybrid antifriction materials are not inferior to antifriction carbon plastics and surpass them by some characteristics.

Keywords: PCM, hybrid antifriction PCM, carbon plastics, friction coefficient, strength

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-90-99

REFERENCES

1. Bakhareva, V.E., *Sovremennye mashinostroitelnye materialy. Nemetallicheskie materialy* [Modern engineering materials. Non-metallic materials]: reference book, Gorynin, I.V. (Ed.), St Petersburg: Professional, 2014, pp. 79–133.
2. Bondaletova, L.I., *Polimernye kompozitsionnye materialy* [Polymer composite materials]: study guide, Tomsk: Izd-vo TPU, 2013.
3. 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.
4. Kryzhanovsky, V.K., Kerber, M.L., Burlov, V.V., *Proizvodstvo izdeliy iz polimernykh materialov* [Production of products from polymeric materials], St Petersburg: Professiya, 2004.
5. Tochilnikov, D.G., Ginzburg, B.M., *Metodika ekspresnykh tribotekhnicheskikh ispytany antifriktsionnykh polimerov* [The methodology of express tribotechnical tests of antifriction polymers], *Voprosy Materialovedeniya*, 2002, No 3 (31), pp. 39–48.
6. Mikhailin, Yu.A., *Sverkhvysokomolekulyarny polietilen* [Ultra-high molecular weight polyethylene], *Polimernye materialy, izdeliya, oborudovanie, tekhnologii*, 2003, No 3 (46), 4 (47), 6 (49), 7 (50), 11 (54).
7. Mikhailin, Yu.A., *Konstruksionnye polimernye kompozitsionnye materialy* [Structural polymer composite materials], St Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2008.
8. Mashkov, Yu.K., *Tribologiya konstruksionnykh materialov* [Tribology of structural materials]: study guide, Omsk: OmGTU, 1996.
9. Mikhailin, Yu.A., *Termoustoichivye polimery i polimernye materialy* [Heat-resistant polymers and polymeric materials], St Petersburg: Professiya, 2006.
10. Gofman, I.V., Yudin, V.E., Orell, O., Vuorinen, J., Grigoriev, A.Ya., Kovaleva, I.N., Svetlichny, V.M., *Vliyanie stepeni uporyadochennosti nadmolekulyarnoi struktury teplostoikikh termoplastov konstruksionnogo naznacheniya na ikh mekhanicheskie i tribologicheskie kharakteristiki v diapazone temperatur 20–250°C* [The influence of the degree of ordering of the supramolecular structure of heat-resistant thermoplastics for structural purposes on their mechanical and tribological characteristics in the temperature range of 20–250°C], *Voprosy Materialovedeniya*, 2012, No 4 (72), pp. 150–159.

11. Myshkin, N.K., Petrokopets, M.I., *Tribologiya. Printsipy i prilozheniya* [Tribology. Principles and applications], Gomel: IMMS NANB, 2002.
12. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies]. URL: <https://top-technologies.ru/ru> (date of reference: 24.09.2022)
13. Tkachenko, E.V., *Razrabotka armirovannykh kompozitov na osnove poliamida 6 i fenilona S-1* [Development of reinforced composites based on polyamide 6 and phenylene C-1]: Thesis for the degree of Candidate of Sciences (Eng), Sevastopol, 2018.
14. Morokov, A.A., Smirnov, G.P., Tsybizova, N.S., *Tekhnologiya pryadeniya, tkachestva i netkanykh materialov* [Technology of spinning, weaving and nonwovens]: study guide, St Petersburg: SPGUTD, 2013.
15. *Materialy dlya sudostroeniya i morskoi tekhniki* [Materials for shipbuilding and marine engineering]: reference book, Gorynin, I.V. (Ed.), St Petersburg: Professional, 2009, V. 2, pp. 381–433.
16. Valueva, M.I., Kolobkov, A.S., Malakhovsky, S.S., *Sverkhvysokomolekulyarny polietilen: rynek, svoistva, napravleniya primeneniya* [Ultrahigh molecular weight polyethylene: market, properties, applications]: review, *Trudy VIAM: Promyshlennye biotekhnologii*, 2020, pp. 49–54.
17. Anisimov, A.V., Barakhtin, B.K., Bakhareva, V.E., Petrov, S.N., Rybin, V.V., *Issledovanie mikrostruktury i mekhanizma iznashivaniya poverkhnostei par treniya ugleplastiki – medsoedzha-shchie splavy* [Investigation of the microstructure and mechanism of wear of surfaces of friction pairs of carbon fiber – copper-containing alloys], *Voprosy Materialovedeniya*, 2006, No 2 (46), pp. 44–51.
18. Lysenkov, M.P., *Sposobnost nekotorykh nemetallicheskih materialov formirovat binarnuyu poverkhnost treniya* [The ability of some non-metallic materials to form a binary friction surface], *Voprosy Materialovedeniya*, 2006, No 2 (46), pp. 136–139.
19. Tochilnikov, D.G., Ginzburg, B.M., *Metodika ekspresnykh tribotekhnicheskikh ispytany antifriktsionnykh polimerov* [Methods of rapid tribotechnical testing of antifriction polymers], *Voprosy Materialovedeniya*, 2002, No 3 (31), pp. 39–48.
20. Bakhareva, V.E., Nikolaev, G.I., Anisimov, A.V., *Antifriktsionnye nemetallicheskie materialy dlya uzlov treniya skolzheniya* [Antifriction non-metallic materials for sliding friction units], *Voprosy Materialovedeniya*, 2011, No 1 (65), pp. 75–88.

UDC 678.073:678.026.2

OBTAINING PREPREGS BY IMPREGNATION OF THERMOPLASTIC POLYMER WITH AN AQUEOUS SUSPENSION

D.D. DVORYANTSEV, A.V. ANISIMOV, Dr Sc. (Eng), I.V. LISHEVICH, Cand Sc. (Eng),
A.S. SARGSYAN, Cand Sc. (Eng), E.P. SOROKINA, E.A. SHARKO

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

Received November 22, 2024

Revised January 16, 2025

Accepted January 16, 2025

Abstract—The article presents a method for producing thermoplastic prepreg tapes based on unidirectional carbon fiber with a low modulus of elasticity of the brand. UMT42S-3K-EP by impregnation in an aqueous polymer slurry. The granulometric composition of the initial fine components and their mixtures after the grinding and mixing stage was studied, as well as their structure was studied by SEM microscopy and PCMA analysis. Based on the theory of particle interaction on the solid-liquid surface, samples of suspensions based on polyetheretherketone (PEEK) stabilized with anionic and cationic surfactants were prepared. To implement the technology of impregnating carbon fiber with a polymer suspension with constant maintenance of the polymer suspension, a laboratory UPS-5-50-2L unit has been developed and incorporated into a TMA-600 impregnating device. The obtained laboratory samples of thermoplastic tapes were examined by SEM microscopy and PCMA analysis, and the ratio of polymer to reinforcing material was determined. The study shows that the use of surfactants can significantly reduce the hydrophobicity of PEEK to stabilize it in aqueous solution. The developed impregnation unit as part of the TMA-600 line makes it possible to implement the technology of producing thin unidirectional prepreg tapes with a polymer content in fiber of up to 46.8%. It was found that the concentration of cationic surfactant up to 2 wt% is sufficient to ensure the wettability of the PEEK surface.

Keywords: thermoplastic prepreg, impregnation from polymer suspension, surfactant

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out within the framework of the Foundation for Scientific and Technical Development of the Kurchatov Institute Research Center for 2023–2027.

REFERENCES

1. Beyder, E.Ya., Petrova, G.N., Termoplastichnye svyazuyushchie dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov [Thermoplastic binders for polymer composite materials], *Trudy VIAM*, 2015, pp. 40–49.
2. Nozdrina, L.V., Korotkova, V.I., Beyder, E.Ya., Termoplastichnye polimery dlya konstruksionnykh materialov [Thermoplastic polymers for structural materials]: review, *Tekhnologiya. Ser. Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov*, 1991, No 1, pp. 3–10.
3. Perov, B.V., Termoplasty, napolnennye voloknami [Fiber-filled thermoplastics], *Termoplasty konstruksionnogo naznacheniya*, Trostyanskaya, E.B. (Ed.), Moscow: Khimiya, 1975, pp. 187–216.
4. *Termoplasty konstruksionnogo naznacheniya* [Thermoplastics for structural purposes], Trostyanskaya, E.B. (Ed.), Moscow: Khimiya, 1975.
5. Bakhareva, V.E., *Sovremennye mashinostroitelnye materialy. Nemetallicheskie materialy* [Modern engineering materials. Non-metallic materials]: reference book, Gorynin, I.V. (Ed.), St Petersburg: Professional, 2014, pp. 79–133.
6. Zelensky, E.S., Kuperman, A.M., Lebedeva, O.V., Armirovannye plastiki na osnove termoplastichnykh svyazuyushchikh [Reinforced plastics based on thermoplastic binders], *Tekhnologiya. Ser. Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov*, 1991, No 1, pp. 10–21.
7. Dvoryantsev, D.D., Sargsyan, A.S., Anisimov, A.V., Lishevich, I.V., Poluchenie vysokoprochnogo ugleplastika na osnove polifenilensulfida s pomoshchyu metoda ATL s lazernym nagrevom [Production of high-strength carbon fiber based on polyphenylene sulfide using the ATL method with laser heating], *Voprosy Materialovedeniya*, 2023, V. 114, No 2, pp. 125–135.
8. Ho, K.K.C., Shamsuddin, S.-R., Riaz, S., Lamorinere, S., Wet impregnation as route to unidirectional carbon fibre reinforced thermoplastic composites manufacturing, *Plastics, Rubber and Composites*, 2011, No 2, V. 40, pp. 102–103.
9. Mettuz, F., Rolings, R., *Kompozitsionnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya* [Composite materials. Mechanics and technology], Moscow: Tekhnosfera, 2004.
10. Kobykhno, I.A., *Poluchenie i primenenie novykh mnogourovnevnykh termoplastichnykh kompozitsionnykh materialov s uglerodnymi nanochastitsami* [Preparation and application of new multilevel thermoplastic composite materials with carbon nanoparticles]: Thesis for the degree of Candidate of Sciences, St Petersburg Politechnic University, St Petersburg, 2022.
11. Kirkin, B.S., Kuznetsova, K.R., Petrova, G.N., Sorokin, A.E., Sravnitelny analiz svoystv poliefirefirketonov otechestvennogo i zarubezhnogo proizvodstva [Comparative analysis of the properties of polyesteresterketones of domestic and foreign production], *Trudy VIAM*, 2018. DOI 10.18577/2307-6046-2018-0-5-34-43
12. Zhang, H.Y., Yuan, L.L., Hong, W.J., Yang, S.Y., Improved Melt Processabilities of Thermosetting Polyimide Matrix Resins for High Temperature, *Polymers*, 2022, V.14, No 965.
13. Kung, H.K., Effects of Surface Roughness on High-temperature Oxidation of Carbon-fiber-reinforced Polyimide Composites, *Journal of Composite Materials*, 2005, V. 39, Is.18, pp. 1677–1687.
14. Ma, Y., Yan, C., Xu, H., Liu, D., Shi, P., Zhu, Y., Liu, J., Enhanced interfacial powder spray impregnated thermoplastic tows by pultrusion, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1996, V. 27, pp. 567–574.

UDC 678.74

COMPOSITES BASED ON POLYBUTYLENE TEREPHTHALATE AND SECONDARY POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

T.A. BORUKAEV¹, Dr Sc. (Chem), L.I. KITIEVA², Cand Sc. (Chem), A.Kh. MALAMATOV¹ Dr Sc. (Chem)

¹ Berbekov Kabardino-Balkar State University, 173 Chernyshevsky St, 360004 Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russian Federation. E-mail: akhmed_malamatov@mail.ru

² Ingush State University, 7 Zyazikova Street, 386001 Magas, Republic of Ingushetia, Russian Federation

Abstract—Composite materials based on industrial polybutylene terephthalate and secondary polyethylene terephthalate were obtained, and their basic physical and mechanical properties are investigated. It was found that these polymers combine and form a homogeneous system at certain ratios. The optimal amount of secondary polyethylene terephthalate has been determined, which can be introduced into polybutylene terephthalate while preserving its basic physical and mechanical properties.

Keywords: polybutylene terephthalate, secondary polyethylene terephthalate, composites, production, properties.

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-120-1-111-118

REFERENCES

1. *Itogi konferentsii PETF 2018* [Results of the PETF 2018 conference]. URL: <https://mplast.by/novosti/2018-03-06-itogi-konferentsii-petf-2018/>
2. Kozlov, A., Kupite kurtku, i budet PETF [Buy a jacket, and there will be a PET], *The Chemical Journal*, 2017, No 9, pp. 62–65.
3. Filimonov, O.I., Osobennosti PET-tary kak vtorichnogo antropogennogo syr'ya i tsenoobrazovanie v sfere ee pererabotki [Features of PET packaging as a secondary anthropogenic raw material and pricing in the field of its processing]: Part 2, *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, No 2.
4. Bedanokov, A.Yu., Beshtoev, B.Z., Mikitaev, M.A., Mikitaev, A.K., Sazonov, B.B., Polietilentereftalat: novye napravleniya retsiklinga [Polyethylene terephthalate: new directions of processing], *Plasticheskie massy*, 2009, No 6, pp. 18–21.
5. Belov, D.V., Belyaev, S.N., Perspektivy pererabotki plastikovykh otkhodov na osnove polietilenglikoltereftalata s primeneniem zhivykh sistem [Prospects for processing plastic waste based on polyethylene glycol terephthalate using living systems]: review, *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2022, V. 12, No 2, pp. 238–252.
6. Chuprova, L.V., Mullina, E.R., Mishurina, O.A., Ershova, O.V., Issledovanie vozmozhnosti polucheniya kompozitsionnykh materialov na osnove vtorichnykh polimerov [Investigation of the possibility of obtaining composite materials based on secondary polymers], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, No 4.
7. Kormiltseva K.A., Pererabotka plastikovykh otkhodov: polietilentereftalat [Recycling of plastic waste: polyethylene terephthalate], *Molodoi ucheny*, 2022, No 22 (417), pp. 611–614.
8. Lavrov, N.A., Belukhichev, E.V., Teoreticheskie osnovy i mekhanizmy sovmeshcheniya polimerov [Theoretical foundations and mechanisms of polymer alignment], *Plasticheskie massy*, 2023, No 5–6, pp. 8–11.
9. Borukaev, T.A., Mashukova, B.S., Mashukov, N.I., Tlenkopachev, M.A., Mikitaev, A.K., Fiziko-mekhanicheskie svoystva polibutilentereftalata, modifitsirovannogo poliazometinami [Physico-mechanical properties of polybutylene terephthalate modified with polyazomethines], *Plasticheskie massy*, 2004, No 4, pp. 18–19.
10. Katsapova, O.V., Lapkovsky, V.V., Izuchenie fiziko-khimicheskikh svoystv voloknistykh materialov na osnove smesei poliialkiltereftalata i izotakticheskikh poliolefinov [Study of physico-chemical properties of fibrous materials based on mixtures of polyalkylene terephthalates and isotactic polyolefins], *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2008, V. 22, No 5 (85), pp. 13–15.
11. Chang, B.P., Mohanty, A.K., Misraab, M., Tuning the compatibility to achieve toughened biobased poly(lactic acid)/poly(butylene terephthalate) blends, *RSC Adv.*, 2018, No 8, pp. 27709–27724.
12. Wu Ting, Hu Hui Lian, Du Yi Ping, Jiang Dong, Discrimination of Thermoplastic Polyesters by MALDI-TOF MS and Py-GC/MS, *Int. J. of Polym. Analysis and Characterization*, 2014, V. 19, No 5, pp. 441–452.
13. Blythe, A.R., Bloor, D., *Electrical Properties of Polymers*, Cambridge University Press, 2005.
14. Kitieva, L.I., Poluchenie polibutilentereftalata [Production of polybutylene terephthalate], *Innovatsionnye podkhody v reshenii problem sovremennogo obshchestva*, Penza: Nauka i prosveshchenie, 2018, pp. 294–302.
15. Makarova, V.V., Avdeev, V.N., Strelets, B.Kh., Smirnova, N.M., Akulin, Yu.A., Kulichikhin, V.G., Nekotorye puti khimicheskoi i fizicheskoi modifikatsii polyetilentereftalata [Some ways of chemical and physical modification of polyethylene terephthalate], *Vysokomolek. soed. Ser. A*, 2005, V. 47, No 7, pp. 1140–1152.

MODERN METHODS OF WATER TREATMENT. SCALE FORMATION IN THERMAL ENGINEERING EQUIPMENT

S.A. TYURINA¹, Cand Sc. (Eng), V.L. DEMIN^{1,2}, Cand Sc. (Eng), V.A. GOLOVIN^{†2}, Dr Sc. (Eng),
V.A. SHCHELKOV², Cand Sc. (Eng), N.A. RASHUTIN¹

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 RAS, 31/4 Leninsky Ave, 119071 Moscow,
Russian Federation

Received October 14, 2024
Revised December 19, 2024
Accepted December 26, 2024

Abstract—The paper considers the existing methods of desalination of water with a high content of minerals, as well as the problem of scale formation and corrosion in thermal engineering equipment. Such water is often used for technical water supply of heating equipment, where the salts contained in it lead to a decrease in efficiency, as well as equipment failure. In addition, the problem of desalination of seawater is relevant for countries located in arid regions of the globe, limited by low rainfall and countries with a shortage of freshwater sources.

An express method of scale formation is presented, which allows evaluating the effect of modifying additives on the anti-scale properties of a protective polymer coating. The process of sediment formation in real devices with real media is quite long, and it may take a considerable time to obtain a result suitable for evaluation, which is unacceptable, since the selection and optimization of the composition will take years. In the proposed installation, the formation of scale deposits on the substrate occurs in 2 hours. The method consists in exposing a brass plate with a protective polymer coating in an experimental laboratory installation that provides conditions similar to the operating condition of heat exchange equipment with unchanged composition of the mineral solution and experimental conditions, and subsequent analysis of the coating and carbonate deposits. The analysis consists in determining the thickness of the formed scale layer on the modified and unmodified coating, determining the elemental composition of these deposits, as well as evaluating the uniformity of their distribution.

Keywords: desalination, demineralizing, composition, structure, corrosion, thermal power equipment

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-119-134

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out on the equipment of the Center for Collective Use of the MIREA – Russian Technical University with the support of the Ministry of Education and Science of Russian Federation. We would like to express our special gratitude to A.N. Khrustalev for carrying out the X-ray phase analysis.

REFERENCES

1. Talalaeva, V.F., Obzor metodov i tekhnologij opresneniya vody dlya tselei pitievogo vodosnabzheniya. [Review of methods and technologies of desalination of water for drinking water supply purposes], *Ekologiya i vodnoe hozyaistvo*, 2022, No 4, pp. 84–100. DOI: 10.31774/2658-7890-2022-4-4-84-100
2. Yakutseni, S.P., Voda: resursy, zapasy, rynki [Water: resources, reserves, markets], *Gornaya promysh-lennost*, 2022, No 4, pp. 120–128. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-4-120-128
3. Alekin, O.A., *Khimiya okeana* [Ocean chemistry], Leningrad: Nauka, 1966, pp. 32–34.
4. Feofanov, Y.A., Rol retsirkulyatsii zhidkosti pri rabote sooruzheny biologicheskoi ochistki stochnykh vod [The role of liquid recycling in the operation of biological wastewater treatment plants], *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2019, No 4 (80), pp. 79–87. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.79-87
5. Akhmedova, D.A., Tekhnologicheskaya skhema termicheskogo opresneniya morskoy vody s absorbcionnym teplovym nasosom kak sredstvo povysheniya effektivnosti [Technological scheme of thermal desalination of seawater with an absorption heat pump as a means of increasing efficiency], *Deutsche Internationale Zeitschrift für zeitgenössische Wissenschaft*, 2021, No 23, pp. 43–46. DOI: 10.24412/2701-8369-2021-23-43-46
6. Alieva, O.O., Tekhnologiya utilizatsionnogo opresneniya morskoi vody [Technology of utilization desalination of seawater], *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2022, No 1–1 (121), pp. 36–41.

7. Milyutin, Yu.V., Miftakhov, P.M., Sidelnikov, A.A., Rebets, M.V., Rudenko, I.A., *Primenenie titanovykh splavov v kozhukhotrubnykh teploobmennyykh apparatakh dlya morskoy vody* [Application of titanium alloys in shell-and-tube heat exchangers for seawater], *Vestnik MAKh*, 2006, No 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-titanovykh-splavov-v-kozhukhotrubnykh-teploobmennyykh-apparatakh-dlya-morskoy-vody> (date of reference: 12/21/2023)
8. Mironov, V.V., Mironov, D.V., Maksimov, L.I., Yakimov, V.V., *Sposob opresneniya morskoy vody* [Method of desalination of seawater], Russian Patent No 2,667,766 C1, Publ. 09/24/2018, Bul. No 27
9. Alieva, O.O., *Tekhnologiya utilizatsionnogo opresneniya morskoy vody* [Technology of utilization desalination of seawater], *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2022, No 1–1 (121), pp. 36–41.
10. Blagin, E.V., Gorshkalev, A.A., Korneev, S.S., Uralapkin, V.V., *Issledovanie vozmozhnosti povysheniya effektivnosti distillatsionnoy opresnitelnoy ustanovki* [Investigation of the possibility of increasing the efficiency of a distillation desalination plant], *MNIZh*, 2018, No 11–1 (77), pp. 63–69.
11. Safina, D.Z., *Ispolzovanie ionoobmennyykh metodov dlya vodopodgotovki energeticheskikh predpriyaty* [The use of ion exchange methods for water treatment of energy enterprises], *Vestnik magistratury*, 2013, No 5 (20), pp. 26–27.
12. Lin Maung Maung, Shitova, V.O., Kagramanov, G. G., *Ochistka stochnykh vod ot tyazhelykh metallov metodom ionnogo obmena* [Wastewater treatment from heavy metals by ion exchange method], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2016, No 2 (171), pp. 109–110.
13. Dymnikova, O.V., Krivoblotskaya, D.A., Dorzhderem, B., *Analiz effektivnosti ionnogo obmena s uchetom stepeni zagryaznennosti stochnykh vod* [Analysis of the efficiency of ion exchange, taking into account the degree of contamination of wastewater], *Bezopasnost tekhnogennykh i prirodnykh sistem*, 2017, No 3, pp. 23–32.
14. Rashutin, N.A., Tyurina, S.A., *Metody modifikatsii zashchitnykh polimernykh pokryty. Innova-tсионnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii* [Methods of modification of protective polymer coatings. Innovative technologies in electronics and instrumentation]: A collection of reports of the Russian Scientific and Technical Conference with international participation, Moscow, MIREA – Russian University of Technology, 2021, pp. 364–368.
15. Cherkinsky, S.N., Shtannikov, E.V., *Gigienicheskie aspekty opresneniya vody* [Hygienic aspects of water desalination], *Gigiena i sanitariya*, 1970, No 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gigienicheskie-aspekty-opresneniya-vody> (date of reference: 12/21/2023)
16. Smirnova, E.E., *Metody opresneniya morskoy vody* [Methods of desalination of sea water], *Vestnik nauki*, 2020, V. 2, No 1 (22), pp. 249–252.
17. Seryshevsky, A.F., *Strukturny analiz zhidkostey v amorfnykh telakh* [Structural analysis of liquids in amorphous bodies]: study guide for universities, Moscow: Vysh. Shkola, 1980, 2nd ed.
18. Albagachieva, M.M., Nagibina, I.Y., *Analiz metodov ochistki vody ot khloridov* [Analysis of water purification methods from chlorides], *Materials of the 8th International Scientific and Practical Conference*, Omsk, 2021
19. Bon, A.I., Dzyubenko, V.G., Shishova, I.I., *O nekotorykh protsessakh sozdaniya asimmetrichnykh i kompozitnykh obratnoosmoticheskikh membran* [On some processes of creating asymmetric and composite reverse osmotic membranes], *VMS. Seriya B*, 1993, No 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nekotorykh-protsessakh-sozdaniya-asimmetrichnykh-i-kompozitnykh-obratnoosmoticheskikh-membran> (date of reference: 12/21/2023)
20. Khokhryakova, E.A., Reznik, Ya.E., *Vodopodgotovka* [Water treatment]: reference book, Belikov S.E. (Ed.), Moscow: Aqua-Term, 2007.
21. Orlov, N.S., *Ultra- i mikrofiltratsiya* [Ultra- and microfiltration]: reference book, Moscow: RHTU im. Mendeleeva, 2014.
22. Gil, J.D., Ruiz-Aguirre, A., Roca, L., Zaragoza, G., Berenguel, M., *Prediction models to analyse the performance of a commercial-scale membrane distillation unit for desalting brines from RO plants*, *Desalination*, 2018, No 445, pp. 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.022>
23. Yunes, M.S., *Opresnenie morskoy vody metodom membrannoy distillyatsii – primenitelno k usloviyam selskogo hozyaistva Sirii* [Desalination of seawater by membrane distillation – in relation to the conditions of agriculture in Syria]: Thesis on the topic of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation 05.20.01, 2004.
24. Staudt-Bikel, K., Lichtenthaler, R.N., *Pervaporatsiya – termodinamicheskie svoystva i vybor polimerov dlya membran*. [Pervaporation – thermodynamic properties and choice of polymers for membranes], *VMS. Seriya A*, 1994, No 11, pp. 1924–1945.
25. Mona Naim, Mahmoud Elewa, Ahmed El-Shafei, Abeer Moneer, *Desalination of simulated seawater by purge-air pervaporation using an innovative fabricated membrane*, *Water Science & Technology*, 2015, No 72 (5), pp. 785–793. URL: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.022>
26. Mosin, O.V., Ignatov, I., *Sovremennye tekhnologii opresneniya morskoy vody* [Modern technologies of seawater desalination], *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2012, No 4 (78), pp. 13–19.

27. Rashutin, N.A., Tyurina, S.A., Demin, V.L., Sidorova, S.A., Podkhody k izmeneniyu zashchitnykh svoystv polimernykh pokryty 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. ROI: jbc-01/23-76-12-42

28. Martínez Moya, S., Boluda Botella, N., Review of Techniques to Reduce and Prevent Carbonate Scale. Prospecting in Water Treatment by Magnetism and Electromagnetism, *Water*, 2021, No 13, Art.2365. <https://doi.org/10.3390/w13172365>

29. Andreeva, S.A., Tyurina, S.A., Dalskaya, G.Y., Izuchenie kinetiki vysvobozhdeniya funktsionalnykh dobavok iz mikrokapsul [Study of the kinetics of the release of functional additives from microcapsules]: *Collection of reports of the conference on promising materials and technologies (PMT-2023)*, 2023, V. 1, pp. 319–325.

30. Teplykh, S.Yu., Bochkov, D.S., Bazarova, A.O., Issledovanie sposobov udaleniya fosfatov iz bytovykh stochnykh vod [Investigation of methods for removing phosphates from domestic wastewater], *Gradostroitelstvo i arkhitektura*, 2020, V. 10, No 4, pp. 69–77. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.9

31. Zimnyakov, A. M., Naumov, R. V., Analiz khimicheskikh otlozheny teplovogo oborudovaniya i sposoby ikh ochistki [Analysis of chemical deposits of thermal equipment and methods of their purification], *Izvestiya PGU im. V. G. Belinskogo*, 2010. No 21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-himicheskikh-otlozheniy-teplovogo-oborudovaniya-i-sposoby-ih-ochistki> (date of reference: 12/23/2023)

32. Pudova, N.E., Kakurkin, N.P., Byvaltsev, E.A., Otsenka effektivnosti antiskalantov po predotvrashcheniyu osazhdeniya malorastvorimykh soedineniy [Evaluation of the effectiveness of antiscalants to prevent the deposition of poorly soluble compounds], *Voda: khimiya i ekologiya*, 2018, No 1–3 (114), pp. 120–126.

33. Golovin, V.A., Shchelkov, V.A., Rashutin, N.A., Tyurina, S.A., Demin, V.L., Mikrokapulirovannyye i aktivnyye dobavki dlya povysheniya antinakupnykh svoystv polimernykh protivokorroziionnykh pokryty [Microcapsulated and active additives to enhance the anti-scale properties of polymer anticorrosive 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>

UDC 621.791:629.5

METHODOLOGY FOR IMPROVING TECHNOLOGIES FOR PRODUCTION AND REPAIR OF SHIP STRUCTURES BASED ON THE INTEGRATED USE OF MODERN TECHNOLOGIES, ENERGY SOURCES AND WELDING MATERIALS

Yu.N. SARAЕV¹, Dr Sc (Eng), V.D. GORBACH†², Dr Sc (Eng), N.I. GOLIKOV¹, Dr Sc (Eng)

¹ Yakut Scientific Center, Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Oktyabrskaya St, 677980 Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

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

Received June 4, 2024

Revised October 22, 2024

Accepted February 17, 2025

Abstract—The paper presents the methodology of scientifically substantiated concept of production improvement and repair technologies for ship structures based on the integrated application of modern technologies, power sources and promising domestic welding and surfacing materials. The proposed methodological approach is formed in accordance with the adopted strategy of scientific and technological development of the Russian Federation, which is aimed at the realization of tasks and national priorities in ensuring the country’s ability to effectively respond to great challenges. The direction associated with increasing the efficiency of domestic industrial production is inextricably linked with the development of welding, related processes and technologies, as fundamental technologies for obtaining high-strength permanent joints in the production and repair of wearable products and structures for critical purposes. Research objective: Justification of the most effective ways to improve production technologies, repair of ship structures and port infrastructure equipment on the basis of complex application of advanced technologies of its production, repair and strengthening treatments of highly loaded products, modern power sources and domestic welding and surfacing materials. Achievement of the above formulated goal is based on the complex application of positive results in the performance of fundamental, oriented and applied research aimed at the creation of a new generation of shipbuilding steels and technologies of their application, organization of production of welding and surfacing materials, modern power supply systems.

Keywords: welding, production, repair, welded joints, ship structures, reliability, performance, pulse technologies, impact mechanical processing, methodology

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-135-151

ACKNOWLEDGMENTS

The work is carried out at the expense of the Federal budget, project FWRS-2024-0034.

REFERENCES

1. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii, utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 28.02.2024* [The Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation, approved by the Decree of the President of the Russian Federation dated February 28, 2024], No 145.
2. Larionov, V.P., Slepcev, O.I., Saraev, Yu.N., Bezborodov, V.P., *Novye podkhody k razrabotke sovremennykh tekhnologii svarki i naneseniya pokryty dlya obespecheniya ekspluatatsionnoi nadezhnosti metallokonstruktsy i izdely, ekspluatiruemykh v usloviyakh Sibiri i Krainego Severa* [New approaches to the development of modern welding and coating technologies to ensure the operational reliability of metal structures and products operated in Siberia and the Far North]: *Proceedings of the IV Eurasian Symposium on the problems of strength of materials and machines for cold climate regions. Plenary reports*, Yakutsk, 2008, pp. 26–30.
3. Sleptsov, O.I., Mihailov, V.E., Petushkov, V.G., Yakovlev, G.P., Yakovleva, S.P., *Povyshenie prochnosti svarnykh konstruktsy dlya Severa* [Increasing the strength of welded structures for the North], Novosibirsk: Nauka, 1989.
4. Gorynin, I.V., Rybin, V.V., Malyshevsky, V.A., Khlusova, E.I., Khladostoihie stali dlya tekhnicheskikh sredstv osvoeniya arkticheskogo shelfa [Cold-resistant steels for technical means of Arctic shelf development], *Voprosy materialovedeniya*, 2009, No 3, pp. 108–126.
5. Moskvichev, V.V., Chernyaev, A.P., Chernyakova, N.A., Volokhov, G.M., Oganyan, E.S., Knyazev, D.A., Makhutov, N.A., Reznikov, D.O., Sleptsov, O.I., *Raschetno-eksperimentalnye metody i tekhnologii obespecheniya prochnosti i zhivuchesti tekhniki Krainego Severa i Arktiki* [Computational and experimental methods and technologies for ensuring the strength and survivability of equipment in the Far North and the Arctic]: *Proceedings of the laureates of the international competition of scientific, technical and innovative developments aimed at the development of the Arctic and the continental shelf 2020*, Ministerstvo energetiki Rossiiskoi Federatsii, Moscow, 2020, pp. 78–81.
6. Sleptsov, O.I., *Tekhnologicheskaya prochnost'svarnykh soedineny pri nizkikh temperaturakh* [Technological strength of welded joints at low temperatures], Larionova V. P., (Ed.), Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1984.
7. Saraev, Yu.N., Golikov, N.I., Sleptsov, O.I., Sidorov, M.M., Semenov, S.V., *Razrabotka konceptsii sozdaniya i funktsionirovaniya regionalnykh tsentrov proizvodstva, vosstanovitel'nogo remonta i uprochnyayushchej obrabotki resursoopredelyayushchih detalej i izdeliy tekhniki, rabotayushchej v usloviyakh Krainego Severa i Arktiki* [Development of a concept for the creation and operation of regional production centers, restoration repairs and reinforcing processing of resource-determining parts and products of machinery operating in the Far North and the Arctic], *Proceedings of the XI Eurasian Symposium on Strength and Resource in conditions of climatically low temperatures, dedicated to the 85th anniversary of the birth of Academician V. P. Larionov (September 11–15, 2023, Yakutsk)*, EURASTRENCOLD-2023, Kirov: Izd-vo MCITO, 2023, pp. 531–537.
8. Saraev, Yu.N., Larionov, V.P., Sleptsov, O.I., Sivtsev, M.N., Bezborodov, V.P., Muratov, A.A., *Obespechenie ekspluatatsionnoi nadezhnosti i ekologicheskoi bezopasnosti vysokootvetstvennykh konstruktsy, rabotayushchikh v usloviyakh Sibiri i Krainego Severa, ispolzovaniem adaptivnykh impulsnykh tekhnologii svarki* [Ensuring operational reliability and environmental safety of highly responsible structures operating in Siberia and the Far North using adaptive pulse welding technologies]: *Proceedings of the 2nd Eurasian Symposium on the problems of strength of materials and machines for cold climate regions EURASTRENCOLD-2004, Plenarnye doklady*, 2004, pp. 147–158.
9. Saraev, Yu.N., Gladkovsky, S.V., Golikov, N.I., et al., *Poiskovye issledovaniya povysheniya nadezhnosti metallokonstruktsy otvetstvennogo naznacheniya, rabotayushchikh v usloviyakh ekstremalnykh nagruzok i nizkikh klimaticheskikh temperatur* [Exploratory research to improve the reliability of critical metal structures operating under extreme loads and low climatic temperatures], *Naukoemkie tekhnologii v proektakh RNF. Sibir*, Tomsk, 2017, pp. 134–202.
10. Karkhin, V.A., *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding], St Petersburg: Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2015.
11. Saraev, Yu.N., *Obosnovanie konceptsii povysheniya bezopasnosti i zhivuchesti tekhnicheskikh sistem, ekspluatiruemykh v regionakh Sibiri i Krainego Severa, na osnove primeneniya adaptivnykh impulsnykh tekhnologii svarki* [Substantiation of the concept of improving the safety and survivability of technical systems operated in the regions of Siberia and the Far North, based on the use of adaptive pulse welding technologies], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2010, No 8, pp. 14–19.
12. Saraev, Yu.N., Poletika, I.M., Kozlov, A.V., Khomchenko, E.G., *Formirovanie struktury i svoystv svarnykh soedineny v usloviyakh reguliruemogo teplotvoreniya pri impulsno-dugovoi svarke* [Formation of the structure and

properties of welded joints under conditions of controlled heat input during pulse arc welding], *Fizicheskaya mezhmekhanika*, 2005, V. 8, No S, pp. 137–140.

13. Saraev, Yu.N., Bezborodov, V.P., Gladkovsky, S.V., Golikov, N.I., Povyshenie nadezhnosti metallicheskih konstruktsiy pri ekspluatatsii v usloviyakh nizkikh klimaticheskikh temperatur posredstvom kompleksnogo primeneniya sovremennykh metodov modifitsirovaniya zony svarnogo soedineniya [Improving the reliability of metal structures during operation at low climatic temperatures through the integrated application of modern methods for modifying the weld zone], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2016, No 9, pp. 3–9.

14. Saraev, Yu.N., Adaptivnye impulsno-dugovye metody mekhanizirovannoi svarki pri stroitelstve magistralnykh truboprovodov [Improving the reliability of metal structures during operation at low climatic temperatures through the integrated application of modern methods for modifying the weld zone], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2002, No 1, pp. 4–11.

15. Loos, A.V., Lukutin, A.V., Saraev, Yu.N., *Istochniki pitaniya dlya impulsnykh tekhnologicheskikh protsessov* [Power supplies for pulsed technological processes], Tomsk: Izdatelskaya poligraficheskaya firma TPU, 1998.

16. Sidorov, M.M., Golikov, N.I., Saraev, Yu.N., Tikhonov, R.P., Upravlenie urovnem ostatochnykh napryazhenii v stykovykh soedineniyakh trub iz nizkolegirovannykh staley udarno-mekhanicheskoi obrabotkoi [Control of the level of residual stresses in butt joints of pipes made of low-alloy steels by impact machining], *Tyazheloe mashinostroenie*, 2023, No 10, pp. 23–28.

17. Golikov, N.I., Ammosov, A.P., *Prochnost svarnykh soedineniy rezervuarov i truboprovodov, ekspluatiruemykh v usloviyakh Severa* [The strength of welded joints of tanks and pipelines operated in the conditions of the North], Yakutsk: Izdatelsky dom SVFU, 2002.

18. Larionov, V.P., Kasatkin, B.S., *Elektrodugovaya svarka konstruktsiy v severnom ispolnenii* [Electric arc welding of structures in the northern version], Novosibirsk, 1986.

19. Larionov, V.P., Filippov, V.V., *Khladostojkost materialov i elementov konstruktsiy: Rezultaty i perspektivy* [Cold resistance of materials and structural elements: Results and prospects], Novosibirsk, 2005.

20. Oryshchenko, A.S., Golosienko, S.A., Khlusova, E.I., Novoe pokolenie vysokoprochnykh korpusnykh staley [A new generation of high-strength body steels], *Sudostroenie*, 2013, No 4, pp. 73–76.

21. Saraev, Yu.N., Golikov, N.I., Sidorov, M.M., Maksimova, E.M., Semyonov, S.V., Perovskaya, M.V., Poiskovye issledovaniya povysheniya nadezhnosti svarnykh metallokonstruktsiy otvetstvennogo naznacheniya, ekspluatiruemykh v usloviyakh Severa [Exploratory research to improve the reliability of welded metal structures for responsible purposes operated in the North], *Obrabotka metallov (tekhnolo-giya, oborudovanie, instrumenty)*, 2017, No 4 (77), pp. 30–42.

22. Saraev, Yu.N., *Impulsnye tekhnologicheskie protsessy svarki i naplavki* [Pulse welding and surfacing processes], Novosibirsk: Nauka, 1994.

23. Saraev, Yu.N., Lunev, A.G., Kiselev, A.S., Gordynets, A.S., Trigub, M.V., Kompleks dlya issledovaniya protsessov teplomassoperenosa pri dugovoj svarke [Complex for the study of heat and mass transfer processes in arc welding], *Avtomaticheskaya svarka*, 2018, No 8, pp. 1–8.

24. Saraev, Yu.N., Lunev, A.G., Semenchuk, V.M., Nepomnyashchij, A.S., Kineticheskie osobennosti teplomassoperenosa v usloviyakh svarki i naplavki [Kinetic features of heat and mass transfer in welding and surfacing conditions], *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2019, V. 62, No 9 (741), pp. 34–40.

25. Saraev, Y.N., Lunev, A.G., Semenchuk, V.M., Nepomnyashchy, A.S., Heat and mass transfer kinetics in arc welding process, *Russian Physics Journal*, 2020, V. 62, No 9, pp. 1573–1579.

26. Saraev, Y.N., Lunev, A.G., Perovskaya, M.V., Semenchuk, V.M., Gladkovsky, S.V., Features of formation of structure and physical and mechanical properties of permanent welded joints of low-alloy steels by methods of adaptive pulse control of energy parameters of welding mode, *Materials Science Forum*, 2018, V. 938, pp. 124–131.

27. Saraev, Yu.N., Sorokin, M.S., Gladkovskij, S.V., Golikov, N.I., *Sovershenstvovanie tekhnologii svarki i naplavki na osnove metodov adaptivnogo impulsnogo upravleniya energeticheskimi parametrami svarochnoi tekhniki invertornogo tipa, prednaznachennoi dlya proizvodstva i remonta konstruktsiy otvetstvennogo naznacheniya v usloviyakh nizkikh klimaticheskikh temperatur* [Improvement of welding and surfacing technologies based on methods of adaptive pulse control of energy parameters of inverter-type welding equipment designed for the production and repair of critical structures at low climatic temperatures], *Sostoyanie i osnovnye napravleniya razvitiya svarochnogo proizvodstva GAZ-PROM: Summaries, VIII Otrasleye soveshchanie*, Moscow, 2016.

28. Lobanov, L.M., Kiryan, V.I., Knysh, V.V., Prokopenko, G.I., Povyshenie soprotivleniya ustalosti svarnykh soedinenii metallokonstruktsiy vysokochastotnoi mekhanicheskoi prokovkoi [Increasing the fatigue resistance of welded joints of metal structures by high-frequency mechanical forging]: review, *Avtomati-cheskaya svarka*, 2006, No 9, pp. 3–11.

29. Saraev, Yu.N., Kamantsev, I.S., Kuznetsov, A.V., Grigorieva, A.A., Semenchuk, V.M., Nepomnyashchy, A.S., Chislennaya otsenka ustalostnogo razrusheniya svarnykh soedinenii, poluchennykh dugovoi svarkoi s upravlyaemym i neupravlyaemym perenosom teplovlozheniem i udarno-mekhanicheskoi obrabotkoi [Numerical evaluation of fatigue

failure of welded joints obtained by arc welding with controlled and uncontrolled transfer of heat input and impact machining], *Fizicheskaya mezhmekhanika. Materialy s mnogourovnevnoy ierarhicheskiy organizovannoy strukturoy i intelektualnyye proizvodstvennyye tekhnologii*, Tomsk, 2021, pp. 275–276.

30. Liu, C., Bhole, S.D., Challenges and developments in pipeline weldability and mechanical properties, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, V. 18, Is. 2, pp. 169–181.

31. Saraev, Yu.N., Kamantsev, I.S., Perovskaya, M.V., Kuznetsov, A.V., Semenchuk, V.M., Nepomnyashchy, A.S., To the Estimation of Welded Joint Fatigue Fracture, *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2020)*, AIP Conf. Proc. 2315, 040031-1–040031-4. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0037091>, Published by AIP Publishing. 978-0-7354-4057-9

32. Gorbach, V.D., Suzdalev, I.V., Kisilevsky, F.N., Povyshenie kachestva i nadezhnosti svarykh konstruktsiy putem adaptivnogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami svarki [Improving the quality and reliability of welded structures through adaptive control of the welding process], *Sudostroenie*, 2002, No 1, pp. 46–48.

33. Shiga, C., Problems in welded joints and systematic approach to their solution in STX21 project, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2000, V. 5, Is. 6, pp. 356–364.

34. Zenitani, S., Hayakawa, N., Yamamoto, J., Hiraoka, K., Morikage, Y., Kubo, T., Yasuda, K., Amano, T., Development of new Low Transformation-Temperature welding consumable to prevent cold cracking in high strength steel welds, *Proceedings of 2002 Symposium for Welded Structures of the Japan Welding Society*, Osaka, 2002, pp. 346–353.

UDC 621.791:669.295

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF TEMPERATURE FIELDS WHEN SURFACING ON A TITANIUM PSEUDO- β -ALLOY

V.P. LEONOV, Dr Sc. (Eng), D.M. NESTEROV, I.Yu. SAKHAROV, Cand Sc. (Eng), S.V. KUZNETZOV

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

Received June 6, 2024

Revised November 5, 2024

Accepted November 5, 2024

Abstract—The temperature cycle in the welding of near- β -titanium alloys has an effect on the final characteristics of the welded joint in connection with the possibility of forming an enlarged low-plastic state of individual zones. In order to prevent the occurrence of adverse thermal effects on the metal of the structure, welding through pre-surfacing is often used. In this regard, the problem arises of experimental and computational study of the distribution of the temperature field in the process of welding titanium near- β -alloy through surfacing of various thickness. The ANSYS Workbench software product was used for the calculated welding simulation. Comparison of experimental and calculated results showed a good coincidence of the distribution of temperature fields in the welded joint zone.

Ключевые слова: welding through pre-surfacing, near- β -titanium alloys, simulation, ANSYS workbench software product

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-152-163

REFERENCES

1. Timofeev, M.N., et al., Opyt primeneniya materialov i tekhnologiy svarki i naplavki pri stroitelstve korpusov reaktornykh ustanovok RITM-200 universalnykh atomnykh ledokolov proekta 22220 [Experience in the application of welding and surfacing materials and technologies in the construction of the RITM-200 reactor plant housings for universal nuclear icebreakers of project 22220]: *Proceedings of the Krylov State Scientific Center*, 2023, No 406, V. 4, pp. 77–86.

2. Levchenko, A.M., *Kniga lektsiy po svarke v Politekhničeskoy universitete Petra Velikogo* [A book of lectures on welding at Peter the Great Polytechnic University], St Petersburg: Izd-vo Politekhničeskogo universiteta, 2015.

3. Lukyanov, S.I., Boikov, N.P., Sergeeva, E.V., Perspektivnyye vidy svarki dlya aviatsionnoy i kosmicheskoy otrasli [Promising types of welding for the aviation and space industry], *Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavtiki. Svarka letatelnykh apparatov i rodstvennyye tekhnologii*, 2020, V. 1, pp. 471–473.

4. Gorynin, I.V., et al., *Titanovyye splavy dlya morskoy tekhniki* [Titanium alloys for marine equipment], St Petersburg: Politekhnika, 2007.

5. Kozlova, I.R., Vliyanie termicheskoi obrabotki na formirovanie struktury i uroven mekhanicheskikh svoystv vysokolegirovannogo splava titana [The effect of heat treatment on the formation of the structure and the level of mechanical properties of a high-alloy titanium alloy], *Voprosy Materialovedeniya*, 2019, No 4 (100), pp. 28–41.
6. Patent RU 2690257 C1: *Splav na osnove titana* [Titanium-based alloy], Kovalchuk, M.V., Oryshchenko, A.S., Leonov, V.P., Applied 28.11.2018, Publ. 31.05.2019.
7. Oryshchenko, A.S., et al., Osobennosti primeneniya titanovoi svarochnoi provoloki pri izgotovlenii konstruktsy morskoi tekhniki [Features of titanium welding wire application in the manufacture of marine engineering structures], *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2021, No 2, pp. 59–62.
8. Leonov, V.P., Margolin, B.Z., Zlochevsky, A.B., Raspredelenie ostatochnykh napryazheny v elementakh obolocheknykh konstruktsy posle mnogoslainoi svarki i gidravlicheskikh ispytany [Distribution of residual stresses in shell structural elements after multilayer welding and hydraulic testing], *Avtomaticeskaya svarka*, 1987, No 4, pp. 11–16.
9. *Metodika opredeleniya teplo- i temperaturoprovodnosti konstruktsionnykh materialov metodom lazernoi vspyshki* [A method for determining the thermal and thermal conductivity of structural materials using a laser flash], MVI No 10-2/41-2017/3.2.1, CRISM Prometey, 2017.
10. *Metodika opredeleniya teploemkosti konstruktsionnykh materialov metodom lazernoi vspyshki* [The method of determining the heat capacity of structural materials by the laser flash method], MVI No 11-2/41-2017/3.2.1, CRISM Prometey, 2017.
11. Nerovny, V.M., *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes], Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2016.
12. Pokrovsky, A.M., Avagimov, S.S., Dubovitsky, E.I., Raschet ekspluatatsionnykh napryazheny v magistralnom nefteprovode s uchetom ostatochnykh svarochnykh napryazheny [Calculation of operational stresses in the main oil pipeline, taking into account residual welding stresses], *Nauka i obrazovanie*, 2016, No 9, pp. 123–137.
13. Frolov, A.V., et al., Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarynykh soedineny v ANSYS Mechanical [Modeling of the stress-strain state of welded joints in ANSYS Mechanical], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2022, No 11, pp. 61–75.
14. Leonov, V.P., Lyudmirsky, Yu.G., Assaulenko, S.S., Povyshenie dolgovechnosti svarynykh stykovykh soedineny, rabotayushchikh pri tsiklicheskikh nagruzkakh v dvuosnom pole napryazheny [Improving the durability of welded butt joints operating under cyclic loads in a biaxial stress field], *Advanced Engineering Research*, 2022, No 3, V. 22, pp. 232–241.
15. Parshin, S.G., Nesterov, D.M., *Pogruzhnoi mekhanizm podachi provoloki dlya podvodnoi svarki v vodnoi srede* [Submersible wire feeding mechanism for underwater welding in an aquatic environment], St Petersburg: Izd-vo Politekh. universiteta, 2015, pp. 62–64.
16. Kolokolov, E.I., Tomilin, S.A., Shishov, V.V., Obespechenie konstruktivnoi prochnosti svarynykh soedineny reaktornykh ustanovok posredstvom primeneniya novykh svarochnykh materialov i tekhnologii [Ensuring the structural strength of welded joints of reactor installations through the use of new welding materials and technologies], *Globalnaya yadernaya bezopasnost*, 2017, No 24, V. 3, pp. 1–14.

UDC 621.791.3:669.295

HIGH-STRENGTH BRAZED JOINTS OF TITANIUM ALLOYS

A.I. IGOLKIN¹, Cand Sc. (Eng), N.V. LEBEDEVA², Cand Sc. (Eng), I.A. MAKSIMENKO³

¹ *Scientific and Technical Services Center “Prometey”, 2N-29 A, Bakunin Ave, 191144 St Petersburg, Russian Federation*

² *NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”, 49 Shpalernaya St, 191015 St Petersburg, Russian Federation. E-mail: mail@crism.ru*

³ *JSC NPF “NevInterMash”, 11E Dobrolyubova Ave, 197198 St Petersburg, Russian Federation*

Received October 14, 2024

Revised October 17, 2024

Accepted October 17, 2024

Abstract—The structure and properties of diffusion brazed titanium alloys joints of the various titanium alloys (PT-3V, VT6, VT6S, VT20 and VT22) are investigated. The optimal technological parameters to produce the joints of the equal to the base metals strength are proposed. The effect of plasticization of the two-phase titanium alloys (VT6S) after high temperature annealing near the polymorphous transformation temperature (during brazing) is shown. An improved method for brazing high-alloyed titanium alloys is considered using the example of ($\alpha+\beta$)-titanium alloy of the transition

class VT22. Brazing was carried out through a titanium interlayer using an amorphous tape filler, providing a joint strength of 1000 MPa.

Keywords: titanium alloys, diffusion brazing, PT-3V, VT6, VT6S, VT20, VT22, amorphous filler metals, high strength, properties, structure, brazing gap, base metal, titanium interlayer

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-164-172

ACKNOWLEDGMENTS

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

REFERENCES

1. Krasnopevtsev, A.Yu., Otlichie, preimushchestva i nedostatki paiki po sravneniyu so svarkoi [Differences, advantages and disadvantages of soldering compared to welding], *Svarochnoe proizvodstvo*, 2020, No 8, pp. 39–45.
2. Bratukhin, A.G., Ivanov, Yu.L., Maryin, B.N., et al., *Shtampovka, svarka, paika i termoobrabotka titana i ego splavov v aviastroenii* [Stamping, welding, soldering and heat treatment of titanium and its alloys in the aircraft industry], Moscow: Mashinostroenie, 1997.
3. Radzievsky, V.N., Tkachenko, G.G., *Vysokotemperaturnaya vakuumnaya paika v kompressorostroenii* [High-temperature vacuum soldering in compressor engineering], Kiev: Ekotekhnologiya, 2009.
4. Ovsyannikov, O.A., Onuchin, S.V., Oborudovanie i tekhnologiya paiki v PO Strela [Soldering equipment and technology in Strela software]: *Collection of materials of the international scientific and technical conference “Soldering-2021”*, Tolyatti: Izd-vo TGU, 2021, pp. 151–152.
5. Lantushenko, L.S., Skoltsov, V.I., Skoltsova, M.I., Storchai, E.I., Shein, Yu.F., Mikrostruktura payanykh soedineny konstruksionnykh materialov kriogennoi tekhniki [Microstructure of soldered joints of structural materials of cryogenic equipment]: *Collection of materials of the international scientific and technical conference Soldering-2021*, Tolyatti: Izd-vo TGU, 2021, pp. 87–96.
6. Denisov, P.P., Osipov, E.V., Shevchenko, V.V., Mihailov, A.Yu., *Povyshenie tekhnologichnosti protsessa paiki titana v raketostroenii* [Improving the manufacturability of the titanium soldering process in rocket engineering], Izd-vo Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017. URL: <http://elib.osu.ru/handle/123456789/2275>.
7. Fedotov, V.T., Suchkov, A.N., Kalin, B.A., Sevryukov, O.N., Ivannikov, A.A., Pripoi STEMET dlya paiki materialov sovremennoi tekhniki [STEMET solders for soldering materials of modern technology], *Tsvetnye metally*, 2014, No 312, pp. 32–37.
8. Shapiro, A., Rabinkin, A. State of the art of Titanium-based brazing filler metals, *Welding Journal*, 2003, V. 82 (10), pp. 36–43.
9. Ko, M, Suzumura, A., Onzawa, T., Brazing of titanium using low melting point titanium-base filler metals, *Proc. of Int. Conf. on titanium production and application*, Seoul, South Korea, 1990, V. 2, pp. 592–601.
10. Igolkin, A.I., Lebedeva, N.V., Maksimenko, I.A., Struktura i svoistva tavrovyykh soedineny titanovogo splava VT6S v protsesse diffuzionnoi paiki [Structure and properties of titanium alloy VT6C brand joints in the process of diffusion soldering], *Voprosy Materialovedeniya*, 2023, No 2 (114), pp. 71–79.
11. Stroganov, G.B., Shpigel, A.S., Ryl'nikov, V.S., Perevezentsev, B.N., Sokolova, N.M., *Sposob paiki titanovykh splavov* [The method of soldering titanium alloys], SU 1013074, Bul.No 15, 23.04.1983.
12. Krokhnina, V.A., Arislanov, A.A., Puhhtyrsky, S.V., Naprienko, S.A., Issledovanie vliyaniya rezhimov termicheskoi obrabotki v β -oblasti na strukturu i mekhanicheskie svoistva polufabrikatov iz splava VT22M [Investigation of the effect of heat treatment modes in the β -region on the structure and mechanical properties of semi-finished products made of VT22M alloy], *Trudy VIAM*, 2023, No 8, pp. 25–34.

UDC 621.791.927.5:620.178.165

STUDY OF THE INFLUENCE OF ACOUSTIC OSCILLATIONS ON THE STRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF DEPOSITED ALLOYS OF THE Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C SYSTEM

A.A. ARTEMIEV, Cand Sc. (Eng), I.V. ZORIN, Dr Sc. (Eng), D.V. PRIYATKIN, Cand Sc. (Eng),
V.I. LYSAK, Dr Sc. (Eng), acad. RAS

Volgograd State Technical University, 28 Lenina Ave, Volgograd, 400005 Volgograd, Russian Federation.

E-mail: artspace5@yandex.ru

Abstract—The effect of ultrasonic vibrations on the structural-phase composition and wear resistance of hypoeutectic and hypereutectic surfacing alloys of the Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C system was studied. Vibrations were introduced into the weld pool using a filler flux-cored wire during electric arc surfacing with a consumable electrode. Metallographic studies of the alloys, micro-X-ray spectral and X-ray structural analyses were performed. Alloy samples were tested for resistance to gas-abrasive wear, as well as wear through an abrasive layer at normal and elevated temperatures up to 600°C. It was found that acoustic treatment of the weld pool, differently affecting the structure of the alloys of the alloying system under consideration, can cause both a decrease and an increase in the wear resistance of the alloys.

Keywords: surfacing alloys, electric arc surfacing, ultrasonic oscillations, wear resistance, high-temperature gas-abrasive wear, austenite, carbides

DOI: 10.22349/1994-6716-2025-120-1-173-184

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was supported by Russian Science Foundation, grant No 24-23-20068, <https://rscf.ru/project/24-23-20068/> and grant from Administration of the Volgograd region under agreement No 7 dated May 31, 2024.

REFERENCES

1. Shumilov, A.A., Shtanko, P.K., Gordienko, V.N., Razrabotka naplavochnykh materialov dlya povysheniya iznosostoikosti detalei tyagodontivnykh mashin teplovykh elektrostantsy [Development of surfacing materials to increase wear resistance of parts of thermal power plant draft machines], *Vestnik SevNTU*, 2010, No 110, pp. 216–218.
2. Yuzvenko, Yu.A., Shimanovsky, V.P., Gavrish, V.A., Pashchenko, M.A., Dugovaya naplavka detalei zaypnogo ustroystva domennoi pechi [Arc surfacing of blast furnace charging device parts], *Avtomati-cheskaya svarka*, 1972, No 2, pp. 59–63.
3. Artemiev, A.A., Priyatkin, D.V., Lysak, V.I., Loyko, P.V., Analiz naplavochnykh splavov dlya raboty v usloviyakh gazoabrazivnogo iznashivaniya pri povyshennykh temperaturakh [Analysis of surfacing alloys for work under conditions of gas-abrasive wear at elevated temperatures], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroenii*, 2020, No 10 (245), pp. 49–55.
4. *Eroziya* [Erosion], Preese C. (Ed.), New York, 1979.
5. Varga, M., High temperature abrasive wear of metallic materials, *Wear*, 2017, V. 376–377, Part A, pp. 443–451. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.042>
6. Veinthal, R., Kulu, P., Käerdi, H., Microstructural aspects of abrasive wear of composite powder materials and coatings, *International Journal of Materials and Product Technology*, 2011, V. 40, Is. 1–2, pp. 92–119. URL: <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2011.037208>
7. Kudina, A.V., Kurash, V. V., Redin, I.V., Hrolenok, V.V., Poluchenie iznosostoikikh metallopokryty elektrodugovoi naplavkoi plavyashchimsya elektrodom pri vozdeistvii na nego ultrazvukom [Obtaining wear-resistant metal coatings by electric arc surfacing with a consumable electrode under the influence of ultrasound], *Agropanorama*, 2013, No 3, pp. 34–38.
8. Kumar, S., Wu, C., Padhy, G., Ding, W., Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, V. 26, pp. 295–322. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027>
9. Parkhimovich, E.M., *Svarka i naplavka v ultrazvukovom pole* [Welding and surfacing in an ultrasonic field], Minsk: Nauka i tekhnika, 1988.
10. Tiana, Y., Shena, J., Effects of ultrasonic vibration in the CMT process on welded joints of Al Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, V. 4, pp. 282–291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.05.004>
11. Minin, S.I., Trofimov, A.I., Trofimov, M.A., Tekhnologiya termicheskoi svarki tsirkulyatsionnykh truboprovodov AES s vozdeistviem ultrazvuka [Technology of thermal welding of NPP circulation pipelines using ultrasound], *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2016, No 4, pp. 5–9.
12. Watanabe, T., Shiroki, M., Yanagisawa, A., Sasaki, T., Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, V. 210, Is. 12, pp. 1646–1651. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.015>

13. Liu, J., Zhu, H., Li, Z., Cui, W., Shi, Y., Effect of ultrasonic power on porosity, microstructure, mechanical properties of the aluminum alloy joint by ultrasonic assisted laser-MIG hybrid welding, *Optics and Laser Technology*, 2019, V. 119, p. 105619. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105619>

14. Fan, Q., Chen, C., Fan, C., Liu, Z., Cai, X., Lin, S., Yang, C., Ultrasonic induces grain refinement in gas tungsten arc cladding Al-CoCrFeNi high-entropy alloy coatings, *Materials Science and Engineering A*, 2021, V. 821, p. 141607. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141607>

15. Zhao, G., Wang, Z., Hu, S., Duan, S., Chen, Y., Effect of ultrasonic vibration of molten pool on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V joints prepared via CMT+P welding, *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, V. 52, pp. 193–202, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.045>

16. Krivonosova, E.A., Shchitsyn, Yu.D., Akulova, S.N., Myshkina, A.V., Neulybin, S.D., Belinin, D.S., Snizhenie defektnosti zharoprochnykh nikelovykh splavov v tekhnologiyakh naplavki [Reducing defects of heat-resistant nickel alloys in surfacing technologies], *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2018, V. 20, No 2, pp. 12–19.

17. Shevchenko, O.I., Trekin, G.E., Formirovanie struktury i svoystv kompozitsii naplavlennyy sloy – osnovnoi metall v ultrazvukovom pole [Formation of the structure and properties of the composition “welded layer – base metal” in an ultrasonic field], *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2014, V. 16, No 4, pp. 124–132.

18. Thavamani, R., Balusamy, V., Nampoothiri, J., Subramanian, R., Ravi, K.R., Mitigation of hot cracking in Inconel 718 superalloy by ultra-sonic vibration during gas tungsten arc welding, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, V. 740, pp. 870–878. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.295>

19. Artemiev, A.A., Zorin, I.V., Sokolov, G.N., Lysak, V.I., Denisevich, D.S., Priyatkin, D.V., Diagnostika naplavlennykh splavov na stoikost k vysokotemperaturnomu gazoabrazivnomu iznashivaniyu, [Diagnostics of deposited alloys for resistance to high-temperature gas abrasive wear], *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2019, V. 21, No 1, pp. 12–19.

20. Artemiev, A.A., Antonov, A.A., Sokolov, G.N., Lysak, V.I., Metodika ispytany naplavlennykh splavov na stoikost k vysokotemperaturnomu abrazivnomu iznashivaniyu [Testing Methodology for Welded Alloys for Resistance to High-Temperature Abrasive Wear], *Trenie i iznos*, 2017, V. 38, No 3, pp. 247–254.

UDC 669.039.531:669.15–194.56:539.42

FEATURES OF CHANNEL FRACTURE FOR IRRADIATED AUSTENITIC STEELS. Part 1. Experimental results

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), V.A. SHVETSOVA, Cand Sc. (Phys-Math), A.A. SOROKIN, Cand Sc. (Eng),
N.E. PIROGOVA, Cand Sc. (Eng), A.A. BUCHATSKY, Cand Sc. (Eng), E.A. ZERNOV

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

Received November 13, 2024

Revised January 27, 2025

Accepted January 30, 2025

Abstract—The experimental study results of the fracture properties and mechanisms are represented for austenitic 18Cr–9Ni steel irradiated at 400°C up to damage dose of 15 dpa. The fracture properties have been obtained for cylindrical smooth and notched specimens under uniaxial tension over temperature range from 20° up to 500°C, and the fracture surfaces have been examined by SEM to analyze the main fracture modes with emphasis on specific fracture mechanism of irradiated austenitic steels – channel fracture. Basing on the performed study results the temperature range and the main features of channel fracture are found. It is shown that the strain hardening decreases over the temperature range of channel fracture that is caused by channel (localized) deformation in the irradiated steel being necessary condition for channel fracture. Shares of various fracture modes are estimated depending on stress triaxiality and test temperature. It is shown that the channel fracture area share relative to total fracture surface area increases when stress triaxiality increases. The relief of channel fracture area and channel fracture facets surface is studied. Secondary deformation channels exits are revealed on the channel fracture facets surface that locate regularly on the distance of 1–2 μm each other. The obtained results are used for elaboration of channel fracture model and formulation of channel fracture criterion and for the proposed criterion verification that are considered in the second part of the paper.

Keywords: fracture mechanisms, channel fracture, neutron irradiation, chromium-nickel steel

REFERENCES

1. Neustroev, V.S., Garner, F.A., Very high swelling and embrittlement observed in a Fe–18Cr–10Ni–Ti hexagonal fuel wrapper irradiated in the BOR-60 fast reactor, *Fusion Materials: Semiannual Progress report for Period Ending December 31, 2007*, V. 43, pp. 109–122.
2. Neustroev, V.S., Golovanov, I.N., Shamardin, V.K., Vyzvanoe raspukhaniem okhrupchivanie obluchennykh austenitnykh stali [Swelling-induced embrittlement of irradiated austenitic steels], *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*, 2007, No 2, pp. 119–124.
3. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., K voprosu o prirode vliyaniya radiatsionnogo raspukhaniya na predel prochnosti obluchennykh austenitnykh materialov [On the nature of the effect of radiation swelling on the tensile strength of irradiated austenitic materials], *Voprosy Materialovedeniya*, 2012, No 1 (69), pp. 148–162.
4. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Shvetsova, V.A., Minkin, A.I., Potapova, V.A., Smirnov, V.I., Vliyanie radiatsionnogo raspukhaniya i osobennosti deformirovaniya na protsessy razrusheniya obluchennykh austenitnykh stali pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhении. Ch. I. Plastichnost i treshchinostoikost [The effect of radiation swelling and deformation features on the fracture processes of irradiated austenitic steels under static cyclic loading. Part 1: Ductility and crack resistance], *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, No 3 (87), pp. 159–191.
5. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Sorokin, A.A., Minkin, A.I., Pirogova, N.E., Issledovanie sostoyaniya metalla vnutrikorpusnykh ustroystv reaktora VVER posle 45 let ekspluatatsii. Soobshchenie 4. Kha-rakteristiki prochnosti i plastichnosti i mekhanizmy razrusheniya [Investigation of the metal condition of the internal VVER reactor devices after 45 years of operation. Report 4. Strength and ductility characteristics and fracture mechanisms], *Voprosy Materialovedeniya*, 2021, No 1 (105), pp. 116–144.
6. Hunter, C.W., Fish, R.L., Holmes, J.J., Channel Fracture in Irradiated EBR-II Type 304 Stainless Steel, *American Nuclear Society Transactions*, 1972, V. 15, No 1, pp. 254–255.
7. Fish, R.L., Hunter, C.W., Tensile properties of fast reactor irradiated type 304 stainless steel. Irradiation effects on microstructure and properties of metals, ASTM STP 611, *American Society for Testing and Materials*, 1976, pp. 119–138.
8. Huang, F.H., Comparison of fracture behavior for low-swelling ferritic and austenitic alloys irradiated in the fast flux test facility (FFTF) to 180 dpa, *Engineering Fracture Mechanics*, 1992, V. 43, No 5, pp. 733–748.
9. Sharp, J.V., Correlation between cleared channels and surface slip steps in neutron irradiated copper crystals, *Radiation Effects: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*, 1972, V. 14, pp. 71–75.
10. Edwards, D.J., Singh, B.N., Bilde-Sørensen, J.B., Initiation and propagation of cleared channels in neutron-irradiated pure copper and a precipitation hardened CuCrZr alloy, *J. Nucl. Mater.*, 2005, V. 342, pp. 164–178.
11. Byun, T.S., Hashimoto, N., Farrell, K., Lee, E.H., Characteristics of microscopic strain localization in irradiated 316 stainless steels and pure vanadium, *J. Nucl. Mater.*, 2006, V. 349, pp. 251–264.
12. Byun, T.S., Hashimoto, N., Farrell, K., Deformation mode map of irradiated 316 stainless steel in true stress-dose space, *JNM*, 2006, V. 351, pp. 303–315.
13. Ananthakrishna G. Chapter 73 Statistical and Dynamical Approaches to Collective Behavior of Dislocations, *Dislocations in Solids*, 2007, V. 13, pp. 81–223.
14. Gussev, M.N., Field, K.G., Busby, J.T., Deformation localization and dislocation channel dynamics in neutron-irradiated austenitic stainless steels, *JNM*, 2015, V. 460, pp. 139–152.
15. Doyle, P.J., Benensky, K.M., Zinkle, S.J., Modelling of dislocation channel width evolution in irradiated metals, *JNM*, 2017. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.10.063
16. Barrioz, P.O., Hure, J., Tanguy, B., Effect of dislocation channeling on void growth to coalescence in FCC crystals, *Materials Science & Engineering A*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.115>
17. Xiao, X. Fundamental mechanisms for irradiation-hardening and embrittlement: a review. *Metals*, 2019, V. 9, p. 1132.
18. Griffiths, M., Effect of neutron irradiation on the mechanical properties, swelling and creep of austenitic stainless steels, *Materials*, 2021, V. 14, p. 2622.
19. Griffiths, M., Strain localisation and fracture of nuclear reactor core materials, *J. Nucl. Eng.*, 2023, V. 4, pp. 338–374.
20. Busby, J.T., Was, G.S., Kenik, E.K., Isolating the effect of radiation-induced segregation in irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels, *JNM*, 2002, V. 302, pp. 20–40.

21. Margolin, B., Sorokin, A., Pirogova, N., Toivonen, A., Sefta, F., Pokor, C., Analysis of mechanisms inducing corrosion cracking of irradiated austenitic steels and development of a model for prediction of crack initiation, *Engineering Failure Analysis*, 2020, V. 107, p. 104235.

22. Chaouadi, R., Effect of irradiation-induced plastic flow localization on ductile crack resistance behavior of a 9% Cr tempered martensitic steel, *JNM*, 2008, V. 372, pp. 379–390.

23. Patra, A., McDowell, D.L., Continuum modelling of localized deformation in irradiated bcc materials, *JNM*, 2013, V. 432, pp. 414–427.

24. Foreman, A.J.E., Sharp, J.V., A mechanism for the sweeping-up of loops by glide dislocations during deformation, *Phil. Mag.*, 1969, V. 19, pp. 931–937.

25. Rodney, D., Molecular dynamics simulation of screw dislocations interacting with interstitial frank loops in a model FCC crystal, *Acta Materialia*, 2004, V. 52, Is. 3, pp. 607–614.

26. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Buchatsky, A.A., Shvetsova, V.A., Prokoshev, O.Yu., Pirogova, N.E., Kharakteristiki i mekhanizmy razrusheniya obluchennykh austenitnykh staley v oblasti povyshennykh temperatur i formulirovka kriteriya razrusheniya. Ch. 1. Eksperimentalnye issledovaniya [Characteristics and mechanisms of destruction of irradiated austenitic steels in the field of elevated temperatures and formulation of the criterion of destruction. Part 1: Experimental research], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, No 2 (110), pp. 185–202.

27. Nagy, E., Mertinger, V., Tranta, F., Solyom, J., Deformation induced martensitic transformation in stainless steels, *Mat. Science and Eng. A*, 2004, V. 378, pp. 308–313.

28. Shen Y.E., Li X.X., Sun X., et al., Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel, *Mat. Science and Eng. A*, 2012, V. 552, pp. 514–555.

29. Gusev, M.N., Field, K.G., Busby, J.T., Strain-induced phase transformation at the surface of an AISI-304 stainless steel irradiated to 4.4 dpa and deformed to 0.8% strain, *J. Nucl. Mater.*, 2014, V. 446, pp. 187–192.

30. Votinov, S.N., Prokhorov, V.I., Ostrovskiy, Z.E., *Obluchennyye nerzhavayushchie stali* [Irradiated stainless steels], Moscow: Nauka, 1987.

31. Miura, T., Fujii, K., Fukuya, K., Micro-mechanical investigation for effects of helium on grain boundary fracture of austenitic stainless steel, *J. Nucl. Mater.*, 2015, V. 457, pp. 279–290.

32. *Fractography*, ASM Handbook, ASM International, The Materials Information Company, 1998, V. 12.

UDC 669.039.531:669.15–194.56:539.42

FEATURES OF CHANNEL FRACTURE FOR IRRADIATED AUSTENITIC STEELS

Part 2. Channel fracture model and criterion

B.Z. MARGOLIN, Dr Sc. (Eng), V.A. SHVETSOVA, Cand Sc. (Phys-Math), A.A. SOROKIN, Cand Sc. (Eng),
E.A. ZERNOV, N.E. PIROGOVA, Cand Sc. (Eng), A.A. BUCHATSKY, Cand Sc. (Eng)

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

Received November 13, 2024

Revised January 27, 2025

Accepted January 30, 2025

Abstract—On the basis of experimental data considered in the first part of the paper the channel fracture model is represented and channel fracture criterion is formulated for irradiated austenitic steels. The model and criterion are based on the initiation of microcracks in channel deformation plane due to intersection with secondary channels and on the microcracks growth by shear. The proposed model and criterion of the microcracks initiation in channel deformation plane explain why channel fracture is observed in irradiated FCC metals and never observed in irradiated BCC metals although channel deformation being necessary condition for channel fracture occurs in the both metals. Procedure for the criterion parameter determination is proposed on the basis of the test results of standard tensile cylindrical specimen and cylindrical specimen with circular notch tested at one temperature over the channel fracture temperature range. Numerical values of the criterion parameters are found when using the test results represented in the first part of the paper. The proposed channel fracture criterion has been verified as applied to irradiated 18Cr–9Ni steel by comparison of the experimental and calculated values of the fracture strain for specimens with various stress triaxialities and for specimens tested at different temperatures.

REFERENCES

1. Sharp, J.V., Correlation between cleared channels and surface slip steps in neutron irradiated copper crystals, *Radiation Effects: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*, 1972, V. 14, pp. 71–75.
2. Byun, T.S., Hashimoto, N., Farrell, K., Deformation mode map of irradiated 316 stainless steel in true stress-dose space, *JNM*, 2006, V. 351, pp. 303–315.
3. Gussev, M.N., Field, K.G., Busby, J.T., Deformation localization and dislocation channel dynamics in neutron-irradiated austenitic stainless steels, *JNM*, 2015, V. 460, pp. 139–152.
4. Doyle, P.J., Benensky, K.M., Zinkle, S.J., Modelling of dislocation channel width evolution in irradiated metals, *JNM*, 2017. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.10.063
5. Barrioz, P.O., Hure, J., Tanguy, B., Effect of dislocation channeling on void growth to coalescence in FCC crystals, *Materials Science & Engineering: A*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.115>
6. Griffiths, M., Effect of neutron irradiation on the mechanical properties, swelling and creep of austenitic stainless steels, *Materials*, 2021, V. 14.
7. Griffiths, M., Strain localisation and fracture of nuclear reactor core materials, *J. Nucl. Eng.*, 2023, V. 4, pp. 338–374.
8. Fish, R.L., Hunter, C.W., Tensile properties of fast reactor irradiated type 304 stainless steel. Irradiation effects on microstructure and properties of metals, ASTM STP 611, *American Society for Testing and Materials*, 1976, pp. 119–138.
9. Hunter, C.W., Fish, R.L., Holmes, J.J., Channel Fracture in Irradiated EBR-II Type 304 Stainless Steel, *American Nuclear Society Transactions*, 1972, V. 15, No 1, pp. 254–255.
10. Huang, F.H., Comparison of fracture behavior for low-swelling ferritic and austenitic alloys irradiated in the fast flux test facility (FFTF) to 180 dpa, *Engineering Fracture Mechanics*, 1992, V. 43, No 5, pp. 733–748.
11. Fukuya, K., Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials, *J. Nuclear Science and Technology*, 2013, V. 50, No 3, pp. 213–254.
12. *Fractography*, ASM Handbook, ASM International, The Materials Information Company, 1998, V. 12.
13. Rozhansky, V.N., *O mekhanizme razvitiya zarodyshevykh treshchin v kristallakh pri ikh plasticheskom deformirovaniy* [On the mechanism of development of nucleus cracks in crystals during their plastic deformation]: Reports of the Academy of Sciences of the USSR, 1958, V. 123, No 4, pp. 648–651.
14. Ivanova, V.S., Gorodienko, L.K., Geminov, V.N., et al., *Rol dislokatsy v uprochnenii i razrushenii metallov* [The role of dislocations in the hardening and fracture of metals], Moscow: Nauka, 1965.
15. Foreman, A.J.E., Sharp, J.V., A mechanism for the sweeping-up of loops by glide dislocations during deformation, *Phil. Mag.*, 1969, V. 19, pp. 931–937.
16. Si, G., Libovits, G., *Matematicheskaya teoriya khрупkogo razrusheniya* [Mathematical theory of brittle fracture], *Razrushenie. Matematicheskie osnovy teorii razrusheniya*, Moscow: Mir, 1975, V 2, pp. 84–203.
17. Malinin, N.N., *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied theory of plasticity and creep], Moscow: Mashinostroenie, 1975.
18. Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A., Gulenko, A.G., Kostylev, V.I., Prometey local approach to brittle fracture: development and application, *Eng. Fract. Mech.*, 2008, V. 75, pp. 3483–3498.
19. Chaouadi, R., Effect of irradiation-induced plastic flow localization on ductile crack resistance behavior of a 9% Cr tempered martensitic steel, *JNM*, 2008, V. 372, pp. 379–390.
20. Patra, A., McDowell, D.L., Continuum modelling of localized deformation in irradiated bcc materials, *JNM*, 2013, V. 434, pp. 414–427.
21. Margolin, B.Z., Sorokin, A.A., Buchatsky, A.A., Shvetsova, V.A., Prokoshev, O.Yu., Pirogova, N.E., *Kharakteristiki i mekhanizmy razrusheniya obluchennykh austenitnykh stalei v oblasti povyshennykh temperatur i formulirovka kriteriya razrusheniya. Ch. 1: Eksperimentalnye issledovaniya* [Characteristics and mechanisms of fracture of irradiated austenitic steels in the range of elevated temperatures and formulation of the fracture criterion. Part 1: Experimental research], *Voprosy Materialovedeniya*, 2022, No 2 (110), pp. 185–202.

22. Bridzhmen, P., *Issledovanie bolshikh plasticheskikh deformatsy i razryva* [Investigation of large plastic deformations and rupture], Moscow: Izd-vo inostr. lit, 1955.
23. Chopra, O.K., Rao, A.S., A review of irradiation effects on LWR core internal materials – Neutron embrittlement, *Journal of Nuclear Materials*, 2011, V. 412, pp. 195–208.
24. Sorokin, A.A., Margolin, B.Z., Kursevich, I.P., et al., Effect of neutron irradiation on tensile properties of materials for pressure vessel internals of WWER type reactors, *Journal of Nuclear Materials*, 2014, V. 444, pp. 373–384.
25. Petrov, S.N., Prokoshev, O.Yu., Margolin, B.Z., Shumko, A.M., Carbide forming special features and fracture mechanism under the austenitic chromium-nickel 304 steel post-life ageing, *Materials Physics and Mechanics*, 2018, V. 38, No 1.