

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Салей П. А., Мотовилина Г. Д., Калинин Г. Ю. Особенности формирования структуры в зонах контакта слоев плакированной стали, эксплуатирующейся в условиях Арктики 7

Гежа В. В., Могильников В. А., Мельников П. В. Экспресс-методика определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле 17

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Масайло Д. В., Разумов Н. Г., Волокитина Е. В., Попович А. А. Восстановление и модификация изделий высокоэнтропийным сплавом CoCrFeNiMnW_{0,25} по аддитивным технологиям 23

Лучшеева В. Р., Бакибаев А. А., Марченко Е. С. Разработка биоактивного композиционного материала на основе бамбус[6]урилы и пористого никелида титана 35

Меметова А. Е., Меметов Н. Р., Зеленин А. Д., Бабкин А. В., Чапаксов Н. А., Мкртчян Э. С. Получение углеродных материалов для адсорбции парниковых газов 43

Герашенков Д. А., Ивановский А. А., Макаров А. М., Евдокимов С. Ю. Создание и исследование интерметаллидного покрытия системы Ni–Ti, армированного карбидом вольфрама, для повышения износостойкости титанового сплава 50

ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Александрова Д. С., Комарова М. В., Егоров А. С., Андреичев А. Л., Шумаков А. А. Анализ прочности композитов на основе полиэфирэфиркетона и углеродного волокна с высокотемпературным аппретом 62

Гоголева О. В., Петрова П. Н., Федоров А. Л., Кондаков М. Н., Колесова Е. С. Разработка экструдированных композитов на основе СВМПЭ 77

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Ильин А. В., Мизецкий А. В., Рябов В. В., Веретенникова Ю. В. Связь результатов испытаний на изгиб с критической деформацией испытываемого металла 83

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Шарипов Дж. Х., Алиев Ф. А., Ганиев И. Н., Обидов З. Р. Анодное поведение сплава Zn₂₂Al, легированного галлием, в коррозионно-активных средах 94

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Васильев Н. В., Степанов Ю. В., Зуева М. И., Боркин П. И., Иваненко Е. А., Петров В. А. Влияние сенсбилизации на служебные свойства металла сварных соединений аустенитных трубопроводов в условиях эксплуатации РУ РБМК 1000 102

Кулешова Е. А., Федотова С. В., Мальцев Д. А., Фролов А. С., Сафонов Д. В., Степанов Н. В., Жучков Г. М., Марголин Б. З., Сорокин А. А. Радиационно-индуцированная структура аустенитных сталей с различным содержанием никеля под действием нейтронного облучения в реакторах СМ-3 и БОР-60 121

XIX КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ (КМУС-2022)

Калугина М. С., Жуков С. А., Агамирова Э. Э., Богданов А. В. Исследование стойкости инструмента и процесса поперечно-продольного выдавливания в технологии изготовления полых осесимметричных деталей машиностроения 156

Мишуринская Е. В., Беляев В. А., Голубева М. В., Мотовилина Г. Д. Влияние режимов горячей пластической деформации и термической обработки на структуру и свойства бейнитно-мартенситной стали 164

Куртеева К. Ю., Мотовилина Г. Д., Забавичева Е. В. Изменение структуры и свойств по сечению толстолистового проката бейнитно-мартенситной стали 174

Меркулова М. В., Красиков А. В., Михайлов М. С. Влияние режимов термообработки на структуру и микротвердость наноконпозиционного покрытия Ni–W 182

Бойкова Т. В., Кочнов Ю. О., Мясников С. В., Петрунин Н. В., Терашкевич С. С. Эксплуатационный контроль состояния металла корпусов растворных реакторов в НИЦ «Курчатовский институт» 191

Петровская А. С., Цыганов А. Б., Суров С. В., Блохин Д. А. О теплофизических параметрах технологии ионно-термической плазменной переработки отработанного ядерного топлива 199

ХРОНИКА

Орыщенко А. С., Фомина О. В., Цуканов В. В., Савичев С. А. Отечественные линкоры после Октябрьской революции. Предвоенные проекты линкоров 212

Памяти Александра Марковича Глезера, директора научного центра металловедения и физики металлов ЦНИИчермет им. И. П. Бардина 228

Перечень статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вопросы материаловедения» в 2022 году 230

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов 234

УДК [621.771.8+621.791.3]:669.14.018.8

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ В ЗОНАХ КОНТАКТА СЛОЕВ ПЛАКИРОВАННОЙ СТАЛИ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕЙСЯ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

П. А. САЛЕЙ, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, Г. Ю. КАЛИНИН, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 13.10.2022

После доработки 19.10.2022

Принята к публикации 7.11.2022

Проведены исследования структуры, сформировавшейся в зоне контакта плакирующего и основного слоев стали марок F500WArg-П и E500W-П, изготовленных методами пакетной прокатки и сварки взрывом соответственно. Установлено, что технология нанесения плакирующего слоя определяет структуру и размеры зоны контакта плакирующего и основного слоев.

Ключевые слова: плакированная сталь, пакетная прокатка, сварка взрывом, коррозионно-стойкая сталь, зона контакта плакирующего и основного слоев

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-07-16

ЛИТЕРАТУРА

1. Голованенко С. А., Меандров Л. В. Производство биметаллов. – М.: Металлургия, 1966. – 304 с.

2. Зенин Б. С., Слосман А. И. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 120 с.

3. Чепурко М. И., Пелюхов Б. Д. Биметаллические материалы. – Л.: Судостроение, 1984. – 272 с.

4. ГОСТ Р 52927–2015. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 83 с.

5. ГОСТ 5640–2020. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского. – М.: Изд-во стандартов, 2020. – 24 с.

6. Калинин Г. Ю., Петров С. Н., Харьков О. А., Мотовилина Г. Д. Новая двухслойная сталь 10ХНЗМД+04Х20Н6Г11М2АФБ с равнопрочными основным и плакирующим слоями // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 12. – С. 3–11.

7. Poppmeier W. A. H., Vreugdenburg J. C. The manufacture of stainless clad steels // Journal of the South African Institute of mining and metallurgy. – 1991. – № 12. – P. 435–439.

8. Легостаев Ю. Л., Мотовилина Г. Д., Малышевский В. А., Семичева Т. Г. Высокопрочная плакированная сталь для работы в экстремальных условиях. Особенности строения переходной зоны // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 1998. – Вып. 21. – С. 98–109.

9. Paul H., Faryna M., Prażmowski M., Bański R. Changes in the bonding zone of explosively welded sheets // Archives of Metallurgy and Materials. – 2011. – N 56(2). – 12 с.

УДК 621.791.92:543.272.2:669.788

ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИФфуЗИОННОГО ВОДОРОДА В НАПЛАВЛЕННОМ МЕТАЛЛЕ

В. В. ГЕЖА, канд. техн. наук, В. А. МОГИЛЬНИКОВ, П. В. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 18.10.2022

После доработки 26.10.2022

Принята к публикации 7.11.2022

Разработана экспресс-методика, позволяющая определять в течение 1 ч содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, что является важным для корректировки технологических параметров сварки высокопрочных сталей.

Ключевые слова: высокопрочные стали, погонная энергия сварки, наплавленный металл, диффузионный водород, экспресс-методика

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-17-22

ЛИТЕРАТУРА

1. РД5.90.2362–85. Материалы сварочные. Определение содержания водорода. Методика.
2. Козлов Р. А. Водород при сварке корпусных сталей. – Л.: Судостроение, 1969. – 175 с.
3. РД5.УЕИА.3417–2005. Метод определения содержания диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле при классификации и контрольных испытаниях.
4. ГОСТ34061–2017. Определение содержания водорода в наплавленном металле и металле шва дуговой сварки.
5. ГОСТ 23338–91. Сварка металлов. Методы определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва.
6. DIN 8572-1–1981. Сварка электродуговая ручная. Определение диффундируемого водорода в наплавленном металле.
7. ISO 3690:2000. Welding and allied processes. Determination of hydrogen content in ferritic steel arc weld metall. – 36 p.
8. AWS A4.2 –93 (R2006). Standard methods for determination of the diffusible hydrogen content of martensitic, bainitic, and ferritic steel weld metal produced arc welding. – 19 p.
9. Draft EN ISO 3690:2009. Welding and allied processes. Determination of hydrogen content in arc weld metal. – 28 p.
10. JIS Z 3118:2007 (JWES/JSA). Method for measurement of amount of hydrogen evolved from steel welds. – 22 p.
11. Панченко О. В. К вопросу о методах определения диффузионного водорода // Машиностроение. – 2011. – № 9. – С. 57–61.

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ И МОДИФИКАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫМ СПЛАВОМ
CoCrFeNiMnW_{0,25} ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

Д. В. МАСАЙЛО, канд. техн. наук, Н. Г. РАЗУМОВ, канд. техн. наук, Е. В. ВОЛОКИТИНА,
А. А. ПОПОВИЧ, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 10.10.2022

После доработки 21.10.2022

Принята к публикации 7.11.2022

Представлены результаты исследования возможности восстановления и модификации поверхности изделий методом прямого лазерного выращивания с использованием порошка высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMnW_{0,25}. В ходе исследований получен порошок высокоэнтропийного сплава, фазовый состав которого представлен однофазным твердым раствором с ГЦК-решеткой, и исследован процесс прямого лазерного выращивания на прототипе изделия. Нанесенное покрытие характеризуется более высокой твердостью 217,6 HV и меньшей на 22% потерей массы при испытаниях на анодную растворимость, чем материал изделия.

Ключевые слова: прямое лазерное выращивание, высокоэнтропийный сплав, порошковая металлургия, восстановление и модификация, коррозионно-стойкое покрытие

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-23-34

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р. 57558–2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Ч. 1. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2017.
2. 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.
3. Feuerbacher M. Growth of high-entropy alloys. *Crystal Growth of Intermetallics* / Ed. Gille P., Grin Y. – Berlin, Boston: De Gruyter, 2018. – P. 141–172.
4. Yeh J.-W. Recent progress in high-entropy alloys // *Ann. Chim. Sci. des Matériaux.* – 2006. – V. 31, N 6. – P. 633–648.
5. Yeh J.-W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys // *JOM.* – 2013. – V. 65, N 12. – P. 1759–1771.
6. Zhang T., Inoue A. Density, Thermal Stability and Mechanical Properties of Zr–Ti–Al–Cu–Ni Bulk Amorphous Alloys with High Al Plus Ti Concentrations // *Materials Transactions.* – 1998. – V. 39, N 8. – P. 857–862.
7. Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys // *Acta Mater.* – 2000. – V. 48, N 1. – P. 279–306.
8. High Entropy Alloys for Aerospace Applications / M. Dada et al. // *Aerodynamics. Intech Open.* – 2019.
9. Praveen S., Kim H.S. High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview // *Adv. Eng. Mater.* – 2018. – V. 20, N 1. – P. 1–22.
10. Exploration and development of high entropy alloys for structural applications / D. B. Miracle et al. // *Entropy.* – 2014. – V. 16, N 1. – P. 494–525.
11. An as-cast high-entropy alloy with remarkable mechanical properties strengthened by nanometer precipitates / G. Qin et al. // *Nanoscale.* – 2020. – V. 12, N 6. – P. 3965–3976.
12. Combinatorial metallurgical synthesis and processing of high-entropy alloys / Z. Li et al. // *J. Mater. Res.* – 2018. – V. 33, N 19. – P. 3156–3169.
13. Nie X.W., Cai M.D., Cai S. Microstructure and mechanical properties of a novel refractory high entropy alloy HfMoScTaZr // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater. Elsevier Ltd.* – 2021. – V. 98, May. – P. 105568.

14. Ultra-high strength WNbMoTaV high-entropy alloys with fine grain structure fabricated by powder metallurgical process / B. Kang et al. // Mater. Sci. Eng. A. – 2018. - V. 712, September 2017. – P. 616–624.

УДК 669.295 '24

РАЗРАБОТКА БИОАКТИВНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ БАМБУС[6]УРИЛА И ПОРИСТОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА

В. Р. ЛУЧШЕВА, А. А. БАКИБАЕВ, Е. С. МАРЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,
634050, Томск, пр. Ленина, 36. kuscherbaeva_venera@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2022

После доработки 31.10.2022

Принята к публикации 7.11.2022

В настоящем исследовании был разработан композиционный материал на основе пористого никелида титана и бамбус[6]урилла. Бамбус[6]урил был осажден на поверхность пористого никелида титана под действием вакуума. Проведена оценка показателей заселенности бамбус[6]урилом поверхности никелида титана, а также исследован биологический отклик клеток на модифицированные образцы. С помощью сканирующей электронной микроскопии удалось установить, что поверхность пористого никелида титана неравномерно покрыта агломератами бамбус[6]урилла островной формы размером 0,3–3 мкм. Бамбус[6]урил локализуется как на поверхности, так и в порах. Разрабатываемый композиционный материал обладает высокой биосовместимостью *in vitro* и низкой токсичностью.

Ключевые слова: бамбус[6]урил, никелид титана, композиционный материал, биоматериал, МТТ-тест

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-35-42

ЛИТЕРАТУРА

1. Miyazaki S., Otsuka K. Development of shape memory alloys // ISIJ Int. – 1989. – N 29. – P. 353–377.
2. Miyazaki S., Kim H. Y., Hosoda H. Development and characterization of Ni-free Ti-base shape memory and superelastic alloys // Mater. Sci. Eng. – 2006. – P. 18–24.
3. Orapiriyakul W., Young P.S., Damiati L., Tsimbouri P. M. Antibacterial surface modification of titanium implants in orthopaedics // J. Tissue Eng. – 2018. – N. 9. – P. 1–16.
4. Konopatsky A. S., Teplyakova T. O., Popova D. V., Vlasova K. Yu., Prokoshkina S. D., Shtansky D. V. Surface modification and antibacterial properties of superelastic Ti–Zr-based alloys for medical application // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2022. – N 209. – P. 1–8.
5. Yuan Y.G., Peng Q. L., Gurunathan S. Effects of silver nanoparticles on multiple drug-resistant strains of Staphylococcus aureus and Pseudomonas aeruginosa from mastitis-infected goats: an alternative approach for antimicrobial therapy // Int. J. Mol. Sci. – 2017. – N 18. – P. 1–33.
6. Aiad I., Shaban S. M., Tawfik S. M., Khalil M. H., El-Wakeel N. Effect of some prepared surfactants on silver nanoparticles formation and surface solution behavior and their biological activity // J. Mol. Liq. – 2018. – N 266. – P. 381–392.
7. Gitelman P. A., Rapaport H. Peptide coating applied on the spot improves osseo integration of titanium implants // Journal of Materials Chemistry. – 2017. – N 11. – P. 2096–2105.
8. Chen W.-C., Ko C. L. Roughened titanium surfaces with silane and further RGD peptide modification in vitro // Materials Science and Engineering. – 2013. – N 33. – P. 2713–2722.
9. Lutolf M. P., Hubbell J. A Synthetic biomaterials as instructive extracellular microenvironments for morphogenesis in tissue engineering // Biotechnol. – 2005. – N 23. – P. 47–55.
10. Щаницын И. Н., Ульянов В. Ю., Норкин И. А. Современные концепции стимуляции регенерации костной ткани с использованием биологически активных скаффолдов // Цитология. – 2019. – Т. 61, N 1. – С. 16–34.

11. Kolesnichenko I. V., Anslyn E. V. Practical applications of supramolecular chemistry // Chem. Soc. Rev. – 2017. – N 46. – P. 2385–2390.
12. Lizal T., Sindelar V. Bambusuril Anion Receptors // Isr. J. Chem. – 2017. – N 57. – P. 1–9.
13. Yawer M. A., Havel V., Sindelar V. Bambusuril Macrocycle that Binds Anions in Water with High Affinity and Selectivity // Angew. Chem. Int. Ed. – 2015. – N 54. – P. 276–279.
14. Havel V., Sindelar V. Anion Binding Inside a Bambusuril[6] Macrocycle in Chloroform // Chem Plus Chem. – 2015. – N 80. – P. 1601–1606.
15. Formation of pores and amorphous-nanocrystalline phases in porous TiNi alloys made by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) / Gunther V. E., Yasenchuk Yu. F., Chekalkin T. L., Marchenko E. S. et al. // Advanced Powder Technology. – 2019. – V. 30, N 2. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.apt.2018.12.011
16. Marchenko E. S., Baigonakova, G. A., Yasenchuk Y. F., Chekalkin T. L., Volinsky A. A. Structure, biocompatibility and corrosion resistance of the ceramic-metal surface of porous nitinol // Ceramics International. – 2022. – N 48(22). – P. 33514–33523.
17. Havel V., Sindelar V., Necas M., Kaifer A. E. Water-mediated inclusion of benzoates and tosylates inside the bambusuril macrocycle // Chem. Commun. – 2014. – N 50. – P. 1372–1374.
18. Lizal T., Sindelar V. Bambusuril anion receptors // Isr. J. Chem. – 2018. – N 58. – P. 326–333.

УДК 661.183:539.217.1

ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АДСОРБЦИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

А. Е. МЕМЕТОВА¹, канд. техн. наук, Н. Р. МЕМЕТОВ¹, канд. техн. наук, А. Д. ЗЕЛЕНИН¹,
А. В. БАБКИН², канд. техн. наук, Н. А. ЧАПАКСОВ¹, Э. С. МКРТЧЯН¹

¹ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 392000, Тамбов,
Советская ул., д. 106/5, помещение 2

² ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: anastasia.90k@mail.ru

Поступила в редакцию 25.10.2022

После доработки 7.11.2022

Принята к публикации 11.11.2022

Углеродные адсорбенты, полученные на основе отработанной кофейной гущи, являются перспективными адсорбентами парниковых газов, в частности метана, ввиду возможности создания прецизионной пористой структуры. Получены микропористые и мезопористые образцы с узким (до 7 нм) распределением пор по размерам. Проведено исследование адсорбции метана в углеродных адсорбентах, полученных с помощью химической активации при различном соотношении гидроксида калия к кофейному прекурзору. Наивысшая адсорбция парникового газа метана, равная ~18 ммоль/г при 100 бар и температуре 298 К, достигается на образце с отношением активирующего агента к карбонизированному прекурзору 6:1 (6АКП).

Ключевые слова: пористая структура, активация, парниковый газ, адсорбция, метан, углеродный адсорбент

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-43-49

ЛИТЕРАТУРА

1. Torres-Valenzuela L. S., Serna-Jiménez J. A., Martínez K. Coffee by-products: nowadays and perspectives // Coffee-Prod. – 2019. – P. 1–18. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89508>
2. Alshareef S. A., Alqadami A. A., Khan M. A., Alanazi H. S., Siddiqui M. R., Jeon B.-H. Simultaneous co-hydrothermal carbonization and chemical activation of food wastes to develop hydrochar for aquatic environmental remediation // Bioresource Technology. – 2022. – V. 347. – P. 126363. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126363>
3. Адсорбционные системы аккумуляции метана на основе углеродных пористых структур / А. Ю. Цивадзе, О. Е. Аксютин, А. Г. Ишков и др. // Успехи химии. – 2018. – Т. 87. – № 10. – С. 950–983.

4. Hu B., Liu J.-T., Chen C.-J., Zhao Z., Chang S.J., Kang P.-L. Ultra-low charge transfer resistance carbons by one-pot hydrothermal method for glucose sensing // *Science China Materials*. – 2017. – V. 60. – P. 1234–1244, <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9104-9>

5. Zhang Y., Kang X., Tan J., Frost R.L. Influence of calcination and acidification on structural characterization of Anyang anthracites // *Energy Fuels*. – 2013. – V. 27, N 11. – P. 7191–7197. <https://doi.org/10.1021/ef401658p>

6. Juan Y., Ke-qiang Q. Preparation of activated carbon by chemical activation under vacuum // *Environmental Science & Technology*. – 2009. – V. 43. – № 9. – P. 3385–3390. <https://doi.org/10.1021/es8036115>

7. Demir-Cakan R., Baccile N., Antonietti M., Titirici M.-M. Carboxylate-rich carbonaceous materials via one-step hydrothermal carbonization of glucose in the presence of acrylic acid // *Chemistry of Materials*. – 2009. – V. 21. – P. 484–490. <https://doi.org/10.1021/cm802141h>

8. Coates J., Meyers R.A. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. *Encyclopedia of Analytical Chemistry* // Copyrights John Wiley & Sons Ltd. – 2019. – P. 1–23. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.A5606>

УДК 621.793.7:669.295 '24:539.538

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Ni–Ti, АРМИРОВАННОГО КАРБИДОМ ВОЛЬФРАМА, ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ¹, канд. техн. наук, А. А. ИВАНОВСКИЙ², А. М. МАКАРОВ¹,
С. Ю. ЕВДОКИМОВ²

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

²АО «Силловые машины», 195009. Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3, лит. 2

Поступила в редакцию 28.10.2022

После доработки 9.11.2022

Принята к публикации 11.11.2022

Представлены результаты исследования интерметаллидного покрытия системы Ni–Ti с добавлением карбида вольфрама. Покрытие синтезировано на поверхности титанового сплава ВТ6 с применением комплексного подхода – предварительного нанесения прекурсорного покрытия из монометаллического никеля методом холодного газодинамического напыления и последующей лазерной обработки. Показано, что введение карбида вольфрама в интерметаллидную матрицу обеспечивает повышение твердости в три раза и более, а также снижение интенсивности изнашивания в 80 раз по сравнению с износостойкостью титанового сплава ВТ6. Разработана технология и изготовлена партия рабочих лопаток паровой турбины с износостойким покрытием на поверхности бандажных полок.

Ключевые слова: титановый сплав, интерметаллидное покрытие, сплав TiNi, армирование, карбид вольфрама, износостойкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-50-61

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumar P., Lagoudas D. C. Introduction to Shape Memory Alloys. – *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*, 2008. – P. 1–51.

2. Farhat Z., Zhang C. On the Deformation of Superelastic TiNi Alloy // *Tribol. Lett.* – 2010. – V. 37. – P. 169–173.

3. Zhang C., Farhat Z. Sliding wear of superelastic TiNi alloy // *Wear*. – 2009. – V. 267. – P. 394–400.

4. Li D. Development of novel wear-resistant materials: TiNi-based pseudoelastic tribomaterials // *Mater. Des.* – 2000. – V. 21. – P. 551–555.

5. Li D. Y. A new type of wear-resistant material: pseudo-elastic TiNi alloy // *Wear*. – 1998. – V. 221, N 2. – P. 116–123.

6. Хохлов В. А., Потекаев А. И., Табаченко А. Н., Галсанов С. В. Исследование триботехнических свойств никелида титана // Изв. Томского политехнического ун-та. – 2012. – Т. 2, № 321. – С. 112–116.
7. Harooni M., Shamanian M., Tehrani A. Wear Behavior of TiNi and TiNi–TiC Clads Deposited by TIG Surfacing // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). V. 3, 2012.
8. Neupane R., Farhat Z. Wear and dent resistance of superelastic TiNi alloy // Wear. – 2013. – V. 301. – P. 682–687.
9. Farhat Z., Zhang C. A. N. The Role of Reversible Martensitic Transformation in the Wear Process of TiNi Shape Memory Alloy // Tribol. Trans. – 2010. – V. 53. – P. 917–926.
10. Influence of Strain Rate on Mechanical Properties of Shape Memory Alloy / Z. Wang et al. // Key Eng. Mater. – 2011. – V. 467–469. – P. 585–588.
11. Takeda K., Tobushi H. Superelastic Deformation of TiNi Shape Memory Alloy Subjected to Stress Variation // Proc. Mech. Eng. Congr. Japan, 2012, J044053-1.
12. Liu Y., Li Y., Ramesh K. T. Rate dependence of deformation mechanisms in a shape memory alloy // Philos. Mag. – 2002. – V. 82. – P. 2461–2473.
13. Saletti D., Pattofatto S., Zhao H. Evolution of the martensitic transformation in shape memory alloys under high strain rates // EPJ Web of Conferences. V. 6, 29008, 2010. <http://doi: 10.1051/epjconf/20100629008>.
14. Shahirnia M., Farhat Z., Jarjoura G. Effects of temperature and loading rate on the deformation characteristics of superelastic TiNi shape memory alloys under localized compressive loads // Mater. Sci. Eng. A-structural Mater. Prop. Microstruct. Process. V. 530, 2011.
15. Pat. WO9966102 USA. Method for forming a nickel-titanium plating, 1998.
16. Pat. JP2006016671 USA. Ni-based alloy member, manufacturing method therefor, turbine engine parts, welding material and manufacturing method therefor, 2004.
17. Pat. US2005207896 USA. Erosion and wear resistant protective structures for turbine engine components, 2004.
18. Weng F., Chen C., Yu H. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review // Mater. Des. – 2014. – V. 58. – P. 412–425.
19. Microstructure evolution of Fe-based nanostructured bainite coating by laser cladding / Y. Guo et al. // Mater. Des. – 2014. – V. 63. – P. 100–108.
20. Li Q., Lei Y., Fu H. Laser cladding in-situ NbC particle reinforced Fe-based composite coatings with rare earth oxide addition // Surf. Coatings Technol. – 2014. – V. 239. – P. 102–107.

УДК 677.494:678.764.5

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА И УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ АППРЕТОМ

Д. С. АЛЕКСАНДРОВА^{1,2}, М. В. КОМАРОВА^{1,2}, А. С. ЕГОРОВ^{1,2}, канд. хим. наук, А. Л. АНДРЕИЧЕВ³, А. А. ШУМАКОВ³

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

²Институт химических реактивов и особо чистых химических веществ НИЦ «Курчатовский институт», 107076, Москва, ул. Богородский вал, д. 3.

³Департамент исследований и разработок АО «Юматекс», 109316, Москва, Волгоградский пр., д. 42, корп. 13.

Поступила в редакцию 10.10.2022

После доработки 31.10.2022

Принята к публикации 7.11.2022

Рассмотрено влияние введения нано- и микроразмерных добавок в аппретирующие композиции на основе полиамидокислот на прочность межфазного взаимодействия в композитных мате-

риалах на основе углеродного волокна. По методу Оуэнса – Вендта (Owens – Wendt method) была рассчитана удельная свободная поверхностная энергия предложенных аппретирующих композиций. Вычисленные значения использовали для расчета работы адгезии на границе раздела аппретированное волокно – полиэфир-эфиркетон. Адгезионная прочность в композитах на основе аппретированного волокна и полиэфирэфиркетона была определена экспериментально при помощи метода *pull-out* (вытягивание волокна из блока матрицы). Образцы волокна с наиболее перспективными аппретами были использованы для получения композитных материалов и определения их физико-механических свойств. Результаты испытаний показали, что экспериментальные образцы сопоставимы по прочности с композитами, которые получены на основе волокна, обработанного коммерчески доступными аппретирующими составами.

Ключевые слова: углеродное волокно, аппретирующие композиции, полиэфирэфиркетон, композиты на основе непрерывного углеродного волокна

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-62-76

ЛИТЕРАТУРА

1. Beaumont P.W.R., Soutis C., Hodzic A. The structural integrity of carbon fiber composites: fifty years of progress and achievement of the science, development and applications // Springer. – 2016. – P. 969.
2. Tang S., Hu C. Design, Preparation and Properties of Carbon Fiber Reinforced Ultra-High Temperature Ceramic Composites for Aerospace Applications: A Review // Journal of Materials Science & Technology. – 2017. – V. 33, N 2. – P. 117. DOI 10.1016/j.jmst.2016.08.004
3. Das T. K., Ghosh P., Das N. Ch. Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review // Adv Compos Hybrid Mater. – 2019. – V. 2, N 2. – P. 214. DOI 10.1007/s42114-018-0072-z
4. Goh G.D., Dikshit V., Nagalingam A.P., Goh G.L., Agarwala S., Sing S.L., Wei J., Yeong W.Y. Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics // Materials & Design. – 2018. – V. 137. – P. 79. DOI 10.1016/j.matdes.2017.10.021
5. Parandoush P., Zhou C., Lin D. 3D Printing of Ultrahigh Strength Continuous Carbon Fiber Composites // Advanced Engineering Materials. – 2019. – V. 21, N 2. – P. 1800622. DOI 10.1002/adem.201800622
6. Wu G. M., Schultz J. M. Processing and properties of solution impregnated carbon fiber reinforced polyethersulfone composites // Polym. Compos. – 2000. – V. 21, N 2. – P. 223. DOI 10.1002/pc.10179
7. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction // Prog. Aerosp. Sci. – 2005. – V. 41, N 2. – P. 143. DOI 10.1016/j.paerosci.2005.02.004
8. Holmes M. Aerospace looks to composites for solutions // Reinf. Plast. – 2017. – V.61, N 4. – P. 237. DOI 10.1016/j.repl.2017.06.079
9. Sudhin AU, Remanan M., Ajeesh G., Jayanarayanan K. Comparison of Properties of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic and Thermosetting Composites for Aerospace Applications // Materials Today: Proceedings. – 2020. – V. 24, N 2. – P. 453–462. DOI 10.1016/j.matpr.2020.04.297
10. Veazey D., Hsu T., Gomez E. D. Next generation high-performance carbon fiber thermoplastic composites based on polyaryletherketones // J. Appl. Polym. Sci. – 2017. – V. 134, N 6. – P. 44441. DOI 10.1002/app.44441
11. Phillips R., Glauser T., Manson J.-A. E. Thermal stability of PEEK/carbon fiber in air and its influence on consolidation // Polym. Compos. – 1997. – V. 18, N 4. – P. 500. DOI 10.1002/pc.10302
12. Barile C., Casavola C., De Cillis F. Mechanical comparison of new composite materials for aerospace applications // Composites Part B. – 2019. – V. 162. – P. 122. DOI 10.1016/j.compositesb.2018.10.101
13. Dilsiz N., Wightman J.P. Surface analysis of unsized and sized carbon fibers // Carbon. – 1999. – V. 37, N 7. – P. 1105. DOI 10.1016/S0008-6223(98)00300-5

14. Chen J., Wang K., Zhao Y. Enhanced interfacial interactions of carbon fiber reinforced PEEK composites by regulating PEI and graphene oxide complex sizing at the interface // *Compos. Sci. Technol.* – 2018. – V. 154. – P. 175. [https:// DOI.org/10.1016/j.compscitech.2017.11.005](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.11.005)
15. Giraud I., Franceschi S., Perez E., Lacabanne C., Dantras E. Influence of new thermoplastic sizing agents on the mechanical behavior of poly(ether ketone ketone)/carbon fiber composites // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2015. – V.132, N 38. – P. 42550. doi 10.1002/app.42550
16. Chuang S.L., Chu Ning-Jo, Whang W.T. Effect of polyamic acids on interfacial shear strength in carbon fiber/aromatic thermoplastics // *J. Appl. Polym. Sci.* – 1990. – V. 41, N 1–2. – P. 373. DOI 10.1002/app.1990.070410129
17. Yuan C., Li D., Yuan X., Liu L., Huang Y. Preparation of semi-aliphatic polyimide for organic-solvent-free sizing agent in CF/PEEK composites // *Compos. Sci. Technol.* – 2021. – V. 201. – P. 108490. DOI 10.1016/j.compscitech.2020.108490
18. Yuan H., Zhang S., Lu C., He S., An F. Improved interfacial adhesion in carbon fiber/polyether sulfone composites through an organic solvent-free polyamic acid sizing // *Appl. Surf. Sci.* – 2013. – V. 279. – P. 279. DOI 10.1016/j.apsusc.2013.04.085
19. Toray Cetex® TC1200 PEEK Product data sheet TC1200_PDS_v3_2019-11-13, P. 4
20. Пат. RU2687447C1. Способ получения легированных йодом углеродных нанотрубок / Егоров А. С., Иванов В. С., Богдановская М. В., 2019.
21. Okassa L. N., Marchais H., Douziech-Eyrolles L., Cohen-Jonathan S., Souce M., Dubois P., Chourpa I. Development and characterization of sub-micron poly(d,l-lactide-co-glycolide) particles loaded with magnetite/maghemite nanoparticles // *Int. J. Pharm.* – 2005. – V. 302, N 1–2. – P. 187. DOI 10.1016/j.ijpharm.2005.06.024
22. Fowkes F.M. Attractive forces at interfaces // *Ind. Engr. Chem.* – 1964. – V. 56, N 12. – P. 40. DOI 10.1021/ie50660a008
23. Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers // *J. Appl. Polym. Sci.* – 1969. – V. 13, N 8. – P. 1741. DOI 10.1002/app.1969.070130815
24. Kozbial A., Li Z., Conaway C., McGinley R., Dhingra S., Vahdat V., Zhou F., D'Urso B., Liu H., Li L. Study on the Surface Energy of Graphene by Contact Angle Measurements // *Langmuir.* – 2014. – V. 30, N 28. – P. 8598. DOI 10.1021/la5018328

УДК 678.742.2:621.777.4

РАЗРАБОТКА ЭКСТРУДИРУЕМЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ

О. В. ГОГОЛЕВА, канд. техн. наук, П. Н. ПЕТРОВА, канд. техн. наук,
А. Л. ФЕДОРОВ, канд. техн. наук, М. Н. КОНДАКОВ, канд. техн. наук, Е. С. КОЛЕСОВА

*«Институт проблем нефти и газа СО РАН» – обособленное подразделения ФГБУН
Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН», 677007,
Якутск, ул. Автомоторная, 20. ipog.ipng@ysn.ru*

Поступила в редакцию 19.10.2022

После доработки 7.11.2022

Принята к публикации 17.11.2022

Проведен сравнительный анализ способов получения полимерных композиционных материалов на основе СВМПЭ: метода горячего прессования и метода экструзии. Физико-механические и триботехнические исследования разработанных композиционных материалов показали, что образцы, полученные методом экструзии, имеют значительно более высокий уровень деформационно-прочностных свойств – относительное удлинение при разрыве выше в 1,8–3,2 раза, а модуль упругости – на 20–48% по сравнению со свойствами образцов, полученных горячим прессованием. На основании проведенных исследований показана возможность переработки композитов на основе СВМПЭ методом экструзии путем добавления низковязкой марки полиэтилена и стеариновой кислоты.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, экструзия, полиэтилен низкого давления, стеариновая кислота, физико-механические свойства, коэффициент трения, износостойкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-77-82

ЛИТЕРАТУРА

1. Валуева М. И., Железина Г. Ф., Гуляев И. Н. Полимерные композиционные материалы повышенной износостойкости на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2017. – № 6. – С. 23–29.
2. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования / Е. Г. Селютин, Ю. Ю. Гаврилов, Е. Н. Воскресенская и др. // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – № 18. – С. 375–388.
3. Валуева М. И., Колобков А. С., Малаховский С. С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 3 (97). – С. 49–57.
4. Галибеев С. С., Хайруллин Р. З., Архиреев В. П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы // Вестник Казанского технологического университета. – 2008. – № 2. – С. 50–55.
5. Трение нанокompозитов серебросодержащего сверхвысокомолекулярного полиэтилена / А. П. Краснов, В. А. Мить, О. В. Афоничева и др. // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 1 (57). – С. 161–169.
6. Тихонов Н. Н., Краснов А. П., Клабукова Л. Ф., Афоничева О. В. Исследование свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного а-токоферолом и ацетатом а-токоферола // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – № 3 (119). – С. 49–55.
7. Сенатов Ф. С. Микроструктура и свойства композитов медицинского назначения на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: дис. ...канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. – М., 2013. – 158 с.
8. Панин С. В., Корниенко Л. А., Алексенко В. О., Буслович Д. Г., Донцов Ю. В. Экструдированные полимер-полимерные композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2018. – № 19 (1). – С. 16–23.
9. Бочкарева С. А., Гришаева Н. Ю., Буслович Д. Г., Корниенко Л. А., Люкшин Б. А., Панин С. В., Панов И. Л., Донцов Ю. В. Разработка износостойкого экструдированного композитного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с заранее заданными свойствами // Механика композитных материалов. – 2020. – № 56 (1). – С. 27–43.
10. Developing Triboengineering Composites Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene / E. S. Kolesova, O. V. Gogoleva, P. N. Petrova et al. // Inorganic Materials. Applied research. – 2021. – V. 12, N 4. – P. 885–888.
11. Gogoleva O. V., Petrova P. N., Kolesova E. S., Okhlopkova A. A. Influence of Component-Mixing Methods on the Properties and Structure of UHMWPE-Based Composites // Journal of Friction and Wear. – 2020. – V. 41, N 1. – P. 50–54.
12. Гоголева О. В., Петрова П. Н. Исследование влияния разных технологий получения на свойства композитов на основе СВМПЭ // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 3 (91). – С. 121–126.

УДК 620.174:539.384

СВЯЗЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗГИБ С КРИТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ ИСПЫТЫВАЕМОГО МЕТАЛЛА

А. В. ИЛЫН, д-р техн. наук, А. В. МИЗЕЦКИЙ, В. В. РЯБОВ, канд. техн. наук,
Ю. В. ВЕРЕТЕННИКОВА

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

Поступила в редакцию 2.11.2022

После доработки 29.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

Рассмотрены особенности деформации образца при испытании на изгиб с помощью численных методов исследования – МКЭ. Представлены формулы для определения критической деформации металла по результатам разрушения пробы на изгиб. Применение формул позволяет прогнозировать минимальный диаметр оправки, обеспечивающий получение удовлетворительного результата в зависимости от способности материала к деформационному упрочнению.

Ключевые слова: испытание на изгиб, деформационная способность, диаграмма деформирования, пластическое деформирование, критическая деформация, деформационное упрочнение

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-83-93

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 14019–2003. Материалы металлические. Методы испытаний на изгиб. Дата введения 01.09.2004. – М.: Стандартиформ, 2006. – 8 с.
2. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. – М.: Мир, 1970. – 444 с.
3. Карзов, Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
4. Канфор С. С. Корпусная сталь. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 375 с.
5. ГОСТ Р 52927–2015. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия. Дата введения 01.04.2016. – М.: Стандартиформ, 2017 – 82 с.
6. Рябов В. В., Хлусова Е. И., Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д. Новые стали для сельскохозяйственного машиностроения // *Металлург.* – 2015. – № 6. – С. 59–65.

УДК 669.5'71: 620.193

АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА Zn22Al, ЛЕГИРОВАННОГО ГАЛЛИЕМ, В КОРРОЗИОННО-АКТИВНЫХ СРЕДАХ

Дж. Х. ШАРИПОВ, Ф. А. АЛИЕВ, И. Н. ГАНИЕВ, д-р хим. наук, З. Р. ОБИДОВ, д-р хим. наук

Институт химии им. В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, 734063, Душанбе, ул. Айни, 299/2. E-mail: obidovzr@gmail.com

Поступила в редакцию 6.09.2022

После доработки 3.11.2022

Принята к публикации 7.11.2022

Приведены результаты экспериментального исследования анодного поведения сплава Zn22Al, легированного галлием, в коррозионно-активных средах HCl, NaCl и NaOH. Электрохимические потенциалы коррозии, питтингообразования и репассивации легированных галлием сплавов по сравнению с базовым сплавом Zn22Al смещены в область положительных значений. Сплавы, содержащие по 0,01–1,0 мас.% галлия, в диапазоне pH от 3 до 9 наиболее устойчивы к питтинговой коррозии. Скорость коррозии микролегированных (0,01–0,1%) галлием сплавов в 1,5–2,5 раза ниже, чем базового сплава Zn22Al. Продукты коррозии изученных сплавов состоят из защитных оксидных пленок ZnO, Ga₂O₃, ZnAl₂O₄, Al₂O₃·Ga₂O₃.

Ключевые слова: сплав Zn22Al, легирование, галлий, коррозионно-активные среды, потенциалы и скорость коррозии, анодное поведение

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-94-101

ЛИТЕРАТУРА

1. Кечин В. А., Люблинский Е. Я. Цинковые сплавы. – М.: Metallurgy, 1986. – 247 с.
2. Виткин А. И., Тейндл И. И. Металлические покрытия листовой и полосовой стали. – М.: Metallurgy, 1971. – 493 с.
3. Lin K. L., Yang C. F., Lee J. T. Correlation of microstructure with corrosion and electrochemical behaviours of the batch-type hot-dip Al–Zn coatings: Part 1. Zn and 5% Al–Zn coatings // *Corrosion.* – 1991. – V. 47, N 4. – P. 9–13.

4. Lin K. L., Yang C. F., Lee J. T. Correlation of microstructure with corrosion and electrochemical behaviours of the batch-type hot-dip Al–Zn coatings: Part 2. 55% Al–Zn coatings // *Corrosion*. – 1991. – V. 47, N 4. – P. 17–30.
5. Mazilkin A. A., Straumal B. B., Borodachenkova M. V., Valiev R. Z., Kogtenkova O. A., Baretzky B. Gradual softening of Al–Zn alloys during high-pressure torsion // *Materials Letters*. – 2012. – V. 84. – P. 63–65.
6. Amini R.N., Irani M., Ganiev I.N., Obidov Z.R. Galfan I and Galfan II Doped with Calcium, Corrosion Resistant Alloys // *Oriental Journal of Chemistry*. – 2014. – V. 30, N 3. – P. 969–973.
7. Obidov Z.R. Effect of pH on the Anodic Behavior of Beryllium and Magnesium Doped Alloy Zn55Al // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2015. – V. 88, N 9. – P. 1451–1457.
8. Uesugi T., Takigawa Y., Kawasaki M., Higashi K. Achieving room-temperature superplasticity in an ultrafin-grainer Zn–22% Al alloy // *Letters on materials*. – 2015. – N 5(3). – P. 269–275.
9. Obidov Z.R. Anodic Behavior and Oxidation of Strontium-Doped Zn5Al and Zn55Al Alloys // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2012. – V. 48, N 3. – P. 352–355.
10. Maniram S.G., Singh G.M., Dehiya S., Sharma N.C. Effect of fly ash articles on the mechanical properties of Zn–22% Al alloy via stir casting method // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. – 2013. – V. 10, N 2. – P. 39–42.
11. Obidov Z.R. Thermophysical Properties and Thermodynamic Functions of the Beryllium, Magnesium and Praseodymium Alloyed Zn–55Al Alloy // *High Temperature*. – 2017. – V. 55, N 1. – P. 150–153.
12. Колотыркин Я.М. *Металл и коррозия*. – М.: *Металлургия*, 1985. – 88 с.

УДК 621.781.019:669.15–194.56:620.196.2:621.039.534

ВЛИЯНИЕ СЕНСИБИЛИЗАЦИИ НА СЛУЖЕБНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АУСТЕНИТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ РУ РБМК 1000

Н. В. ВАСИЛЬЕВ, канд. техн. наук, Ю. В. СТЕПАНОВ, канд. техн. наук, М. И. ЗУЕВА, П. И. БОРКИН,
Е. А. ИВАНЕНКО, В. А. ПЕТРОВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 30.08.2022

После доработки 14.10.2022

Принята к публикации 7.11.2022

С целью оценки влияния сенсibilизации металла сварных соединений трубопроводов Ду300 из аустенитной стали на их служебные характеристики в условиях эксплуатации РУ РБМК 1000 проведены испытания образцов из стали марки 08X18H10T с постоянной скоростью деформирования от 10^{-7} до 10^{-3} с^{-1} в воде высоких параметров и выполнен анализ изменения их свойств.

Ключевые слова: аустенитная сталь, трубопроводы РУ РБМК 1000, сварные соединения, сенсibilизация, скорость деформирования, служебные характеристики

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-102-120

ЛИТЕРАТУРА

1. Малинин Н. Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. – М.: *Машиностроение*, 1975.
2. РД ЭО1.1.2.05.0330–2012. *Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы*.
3. Kilian R., Brummer C. Ergebnisse des VGB-Forschungsverhabens zur Absicherung des Betriebsverhaltens austenitischer Stahle in SWR-Rohrleitungen. Results of VGB Research Work with Respect to Operation of BWB Pipers Made of Austenitic SS. 23. MPA-Seminar, Stuttgart, 1 und 2 October, 1997.

4. Назаров А. А. Количественная оценка коррозионного разрушения стали типа X18H10 при ее пластической деформации // Судостроительная промышленность. Серия: Металловедение. Металлургия. – 1986. – Вып. 3.

5. Ford F. P, Silverman M. Effect of Loading Rate on Environmentally Controlled Cracking of Sensitized 304 Stainless in High Purity Water // National Association of Corrosion Engineers. – 1980. – V. 36, N 11.

6. Andresen P. L. Effect of temperature on crack growth rate in sensitized type 304 stainless steel and alloy 600. – NACE International, 1993.

7. Scott P. M. Environment-assisted cracking in austenitic components. – Paris La Defense, France, 1995.

8. Васильев Н. В. Разработка и совершенствование методов и средств неразрушающего эксплуатационного контроля степени сенсibilизации металла сварных соединений трубопроводов АЭС из стали 08X18H10T // Дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2017.

УДК 621.039.531:669.15–194.56:620.187

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННАЯ СТРУКТУРА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРАХ СМ-3 И БОР-60

Е. А. КУЛЕШОВА^{1,2}, д-р техн. наук, С. В. ФЕДОТОВА¹, канд. техн. наук,
Д. А. МАЛЬЦЕВ¹, канд. техн. наук, А. С. ФРОЛОВ¹, канд. техн. наук,
Д. В. САФОНОВ¹, канд. техн. наук, Н. В. СТЕПАНОВ¹, Г. М. ЖУЧКОВ¹,
Б. З. МАРГОЛИН³, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН³, канд. техн. наук

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

²НИЯУ «МИФИ», 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

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

Поступила в редакцию 1.09.2022

После доработки 31.10.2022

Принята к публикации 8.11.2022

Проведены сравнительные исследования радиационно-индуцированной структуры образцов аустенитных нержавеющей сталей с содержанием никеля 10, 20 и 25 мас.%, облученных последовательно в реакторах СМ-3 и БОР-60, а также до более высоких повреждающих доз – в реакторе БОР-60. Фазовый состав, дислокационная структура, поры и радиационно-индуцированные сегрегации на границах зерен были исследованы высокоразрешающими аналитическими методами просвечивающей электронной микроскопии, растровой электронной микроскопии, атомно-зондовой томографии. Установлено образование радиационно-индуцированных фазовых выделений на основе никеля, объемная доля которых коррелирует с уровнем радиационно-индуцированных сегрегаций и тем выше, чем выше содержание никеля в стали. Расчетно-экспериментальным путем скорректированы значения коэффициентов прочности барьеров для радиационно-индуцированных структурных элементов в исследованных сталях, что позволяет определить их вклад в радиационное упрочнение. Показано, что наибольший вклад в радиационное упрочнение в результате нейтронного облучения в БОР-60 при повышенной температуре облучения до 29 снв вносят крупные радиационно-индуцированные выделения (G + γ')-фаз. Показано, что с увеличением повреждающей дозы основным фактором, ограничивающим работоспособность изделий внутрикорпусных устройств, будет радиационное распухание, поскольку вклад в изменение свойств от радиационно-индуцированных фаз и радиационных дефектов не будет увеличиваться вследствие выхода их плотности на насыщение. Сталь с 25 мас.% Ni демонстрирует наименьший уровень распухания при высоких дозах облучения, что позволяет рассматривать ее в качестве кандидатного материала внутрикорпусных устройств для перспективных реакторов ВВЭР с более высокими температурами и более длительными сроками эксплуатации.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь, нейтронное облучение, пористость, распухание, фазовый состав, радиационно-индуцированные сегрегации, растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, атомно-зондовая томография

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-121-155

ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин Б. З., Курсевич И. П., Сорокин А. А., Васина Н. К., Неустроев В. С. К вопросу о радиационном распухании и радиационном охрупчивании аустенитных сталей. Часть II. Физические и механические закономерности охрупчивания // Вопросы материаловедения. – 2009. – №2(58). – С. 99–111.
2. Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет. Часть 3. Микроструктура и фазовый состав / Е. А. Кулешова, С. В. Федотова и др. // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3 (103). – С. 157–180.
3. Курсевич И. П., Карзов Г. П., Марголин Б. З., Сорокин А. А., Теплухина И. В. Принципы легирования новой радиационно-стойкой аустенитной стали для ВКУ ВВЭР-1200, обеспечивающей их безопасную эксплуатацию не менее 60 лет // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 3 (71). – С. 146–160.
4. Карзов Г. П., Марголин Б. З. Основные механизмы радиационного повреждения материалов ВКУ и материаловедческие проблемы их длительной эксплуатации // Росэнергоатом. – 2015. – № 2. – С. 8–15.
5. Investigation of high temperature annealing effectiveness for recovery of radiation-induced structural changes and properties of 18Cr–10Ni–Ti austenitic stainless steels / B. A. Gurovich, E. A. Kuleshova, A. S. Frolov et al. // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 465. – P. 565–581.
6. Пиминов В. А., Евдокименко В. В. Надежность на весь срок эксплуатации // Росэнергоатом. – 2015. – № 2. – С. 16–19.
7. Analysis of mechanisms inducing corrosion cracking of irradiated austenitic steels and development of a model for prediction of crack initiation / B. Margolin, A. Sorokin, N. Pirogova et al. // Engineering Failure analysis. – 2020. – V. 107. – P. 104235.
8. Determination of the time to failure curve as a function of stress for a highly irradiated AISI 304 stainless steel after constant load tests in simulated PWR water environment / C. Pokor, J. -P. Massound, A. Toivonen et al. // Proceedings of Fontevraud 7 Conference "Contribution of Materials Investigations to improve the safety and performance of LWRs", France, 2011, Report Number [INIS-FR-11-0585](#).
9. Bosch R. W., Vankeerberghen M., Gérard R., Somville F. Crack initiation testing of thimble tube material under PWR conditions to determine a stress threshold for IASCC. // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 461. – P. 112–121.
10. Physical and mechanical modelling of neutron irradiation effect on ductile fracture. Part 1. Prediction of fracture strain and fracture toughness of austenitic steels // B. Margolin, A. Sorokin, V. Smirnov et al. // J. Nucl. Mater. Elsevier B.V. – 2014. – V. 452, N 1–3. – P. 595–606.
11. The radiation swelling effect on fracture properties and fracture mechanisms of irradiated austenitic steels. Part I. Ductility and fracture toughness / B. Margolin, A. Sorokin, V. Shvetsova et al. // J. Nucl. Mater. – 2016. – V. 480. – P. 52–68.
12. Garner F. A. Radiation damage in austenitic steels // Comprehensive Nuclear Materials. – 2012. – V. 4. – P. 33–95.
13. Voyevodin V. N., Neklyudov I. M. Evolution of the structure phase state and radiation resistance of structural materials. – Kiev: Naukova Dumka. – 2006. – P. 375.
14. Margolin B., Pirogova N., Sorokin A., Morozov A. Correlation between grain boundary strength determined by impact test of miniature specimen and stress corrosion cracking resistance of irradiated austenitic steels used for the internals of WWER-type and PWR-type nuclear reactors // Engineering Failure analysis. – 2021. – V. 127. – P. 105544.
15. Kurata H., Isoda S., Kobayashi T. Chemical Mapping by Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy // J. Electron Microsc. (Tokyo). – 1996. – V. 45, N 4. – P. 317–320.

16. Lavergne J.-L., Martin J.-M., Belin M. Interactive electron energy-loss elemental mapping by the Imaging-Spectrum method // *Microsc. Microanal. Microstruct.* – 1992. – V. 3 (6). – P. 517–528.
17. Williams D. B., Carter C. B. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*, 2009.
18. . Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis // J. I. Goldstein et al. / 3rd ed. – New York: Springer, 2003. – P. 690.
19. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. – М.: Техносфера, 2006. – 256 с.
20. Thickness measurements with electron energy loss spectroscopy / K. Iakoubovskii et al. // *Microsc. Res. Tech.* – 2008. – V. 71, N 8. – P. 626–631.
21. Frolov A. S., Krikun E. V., Prikhodko K. E., Kuleshova E. A. Development of the DIFFRACALC program for analyzing the phase composition of alloys // *Crystallogr. Reports.* – 2017. – V. 62, N 5. – P. 809–815.
22. Miller M. K., Forbes R. G. *Atom-Probe Tomography.* – Boston, MA: Springer US, 2014.
23. *Local Electrode Atom Probe Tomography* / D. J. Larson et al. – 2013.
24. Marquis E. A., Hyde J. M. Applications of atom-probe tomography to the characterisation of solute behaviours // *Mater. Sci. Eng. R Reports.* – 2010. – V. 69, N 4–5. – P. 37–62.
25. A sensitivity analysis of the maximum separation method for the characterisation of solute clusters / J. M. Hyde, E. A. Marquis, K. Wilford et al. // *Ultramicroscopy.* – 2011. – V. 111, N 6. – P. 440–447.
26. X. Li. The Effect of the Stacking Fault Energy on the Post-Irradiation Behavior of Austenitic Stainless Steels Under Pressurized Water Reactor Conditions. – 2009.
27. Microstructure degradation of austenitic stainless steels after 45 years of operation as VVER-440 reactor internals / E. Kuleshova, S. Fedotova, B. Gurovich et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2020. – V. 533.
28. Определение изменения геометрии выгородки реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации. Расчет и измерение / Б. З. Марголин, А. Я. Варовин, А. И. Минкин и др. // *Вопросы материаловедения.* – 2015. – № 3(83). – С. 182–196.
29. Kenik E. A., Busby J. T. Radiation-induced degradation of stainless steel light water reactor internals // *Mater. Sci. Eng. R Reports.* – 2012. – V. 73, № 7–8. – P. 67–83.
30. Марголин Б. З., Пирогова Н. Е., Потапова В. А. Исследование механизмов коррозионного растрескивания стали для ВКУ ВВЭР на основе имитационных испытаний // *Вопросы материаловедения.* – 2017. – № 4(92). – С. 193–218.
31. Радиационно-индуцированная сегрегация и свойства конструкционных материалов под облучением / В. А. Печенкин, А. Д. Чернова, В. Л. Молодцов и др. // *Ядерная физика и инжиниринг.* – 2013. – Т. 4, № 5. – С. 443–461.
32. ГОСТ Р59429–2021 Устройства внутрикорпусные водо-водяного энергетического реактора. Расчет на прочность на стадии проектирования.
33. Zinkle S. J., Maziasz P. J., Stoller R. E. Dose dependence of the microstructural evolution in neutron-irradiated austenitic stainless steel // *J. Nucl. Mater.* – 1993. – V. 206, N 2–3. – P. 266–286.
34. Modeling precipitation thermodynamics and kinetics in type 316 austenitic stainless steels with varying composition as an initial step toward predicting phase stability during irradiation / J.-H. Shim, E. Povoden-Karadeniz, E. Kozeschnik et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2015. – V. 462. – P. 250–257.
35. Pechenkin V. A., Eпов G. A. The influence of radiation-induced segregation on precipitate stability in austenitic steels // *J. Nucl. Mater.* – 1993. – V. 207. – P. 303–312.
36. Integrated modeling of second phase precipitation in cold-worked 316 stainless steels under irradiation / M. Mamivand, Y. Yang, J. Busby et al. // *Acta Mater. Elsevier Ltd.* – 2017. – V. 130. – P. 94–110.
37. Precipitation kinetics of radiation-induced Ni–Mn–Si phases in VVER-1000 reactor pressure vessel steels under low and high flux irradiation / E. A. Kuleshova et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2021. – P. 153091.
38. Thermodynamic and kinetic modeling of Mn–Ni–Si precipitates in low-Cu reactor pressure vessel steels / H. Ke, P. Wells, P. D. Edmondson et al. // *Acta Mater. Elsevier Ltd.* – 2017. – V. 138. – P. 10–26.

39. On the correlation between irradiation-induced microstructural features and the hardening of reactor pressure vessel steels / M. Lambrecht, E. Meslin, L. Malerba et al. // J. Nucl. Mater. – 2010. – V. 406, N 1. – P. 84–89.

40. Lucas G. E. The evolution of mechanical property change in irradiated austenitic stainless steels // J. Nucl. Mater. – 1993. – V. 206, N 2–3. – P. 287–305.

41. Tan L., Busby T. J. Formulating the strength factor α for improved predictability of radiation hardening // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 465. – P. 724–730.

42. Vliyanie plotnosti dislokatsii na soprotivlenie vysokoskorostnoy deformatsii i razrusheniyu v medi M1 i austenitnoy nerzhavyushchey stali. Fizicheskaya mezomekhanika / S. V. Razorenov, G. V. Garkushin, E. G. Astafurova et al. – 2017. – N 20 (4). – P. 43–51.

43. Kocks U. F. The relation between polycrystal deformation and single-crystal deformation // Metall. Mater. Trans. – 1970. – V. 1. – P. 1121–1143.

44. ПНАЭ G-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

45. Патент РФ RU 2633408C1. Радиационно-стойкая аустенитная сталь для внутрикорпусной выгородки ВВЭР / Б. З. Марголин, А. Г. Гуленко, А. А. Сорокин и др., 2019.

УДК 621.777.4

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА И ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНО-ПРОДОЛЬНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

М. С. КАЛУГИНА^{1,2}, С. А. ЖУКОВ², Э. Э. АГАМИРОВА³, А. В. БОГДАНОВ²

¹АО Концерн «Океанприбор», 197376, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., д.46

²ФГАОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1

³Дагестанский государственный технический университет, 367026, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70

Поступила в редакцию 17.10.2022

После доработки 31.10.2022

Принята к публикации 7.11.2022

Исследована принципиальная возможность использования схемы поперечно-продольного выдавливания для совершенствования технологии изготовления полых осесимметричных деталей из прутковой заготовки.

Ключевые слова: полые осесимметричные детали, поперечно-продольное выдавливание, напряженно-деформированное состояние, подвижный пуансон, стальные матрицы, стойкость инструмента

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-156-163

ЛИТЕРАТУРА

1. Еськова Е. А., Ремшев Е. Ю., Гусев А. С., Афимьин Г. О. Разработка технологического процесса изготовления стальной гильзы клб. 57 мм // Сб. трудов 13-ой общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», Сер. Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». – 2021. – № 76. – С. 276–279.

2. Remshev E. Yu., Lobov V. A., Rasulov Z. N., Frolova E. O. Use of graphene-based lubricants to reduce friction inside the units of construction equipment // AIP Conference Proceedings. 1. Ser. "I International Conference "Applied Science and Engineering" ASE-I 2021" 2021. – С. 070005.

3. Маликов В. Н., Ишков А. В., Войнаш С. А., Соколова В. А., Ремшев Е. Ю. Исследование процессов упрочнения стальных деталей методом индукционной наплавки // Металлург. – 2021. – № 11. – С. 69–75.

4. Иванов К. М., Олехвер А. И., Винник П. М., Ремшев Е. Ю. Вопросы механики сплошных сред применительно к общепромышленным технологическим проблемам // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 4 (112). – С. 62–69.

5. Затеруха Е. В., Лобов В. А., Ремшев Е. Ю. Исследование технологических возможностей процесса подштамповки гильз // Труды XII общероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения». Сер. «Библиотека журнала Военмех. Вестник БГТУ», 2020. – С. 40–44.

УДК 669.14.018.295:621.771.237:621.785.6

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА БЕЙНИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

Е. В. МИШУРИНСКАЯ, В. А. БЕЛЯЕВ, М. В. ГОЛУБЕВА, канд. техн. наук,
Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 17.10.2022

После доработки 6.12.2022

Принята к публикации 9.12.2022

Выполнено моделирование технологии производства высокопрочной бейнитно-мартенситной стали: режимов горячей пластической деформации, закалки и высокотемпературного отпуска. Установлена зависимость структуры и свойств стали от режимов горячей пластической деформации и термической обработки.

Ключевые слова: моделирование на пластометре Gleeble-3800, низкоуглеродистая хромоникельмолибденовая сталь, прокатка, закалка и отпуск, структура, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-164-173

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Высокопрочные свариваемые улучшаемые стали. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 212 с.

2. Ковальчук М. В., Орыщенко А. С., Малышевский В. А., Петров С. Н., Шумилов Е. А. К вопросу об унификации химического состава высокопрочных сталей для судостроения // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 1(93). – С. 7–14.

3. Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние структуры, сформированной при закалке, на свойства высокопрочной хладостойкой стали после отпуска // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 1(53). – С. 32–44.

4. Голубева М. В. Хладостойкая свариваемая сталь класса прочности 690 МПа для тяжело-нагруженной техники // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб. – 2019. – С. 12–14.

5. Изменение структуры высокопрочной экономнолегированной стали марки 09ХГН2МД при отпуске / М. В. Голубева, О. В. Сыч, Е. И. Хлусова и др. // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 1(93). – С. 15–26.

УДК 621.771.237:669.14.018.41

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПО СЕЧЕНИЮ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА БЕЙНИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

К. Ю. КУРТЕВА, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, Е. В. ЗАБАВИЧЕВА

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

Поступила в редакцию 27.10.2022

После доработки 27.11.2022

Принята к публикации 2.12.2022

Для расширения сортамента листового проката из низкоуглеродистой низколегированной стали хромоникельмолибденовой композиции легирования, изготовленного с применением закалки с печного нагрева с последующим высоким отпускком, выполнен анализ изменения механических свойств и структуры при увеличении толщины листов от 15 до 60 мм.

Ключевые слова: низкоуглеродистая низколегированная хладостойкая сталь, толстолистовой прокат, микроструктура, термообработка, механические свойства, дислокационный реечный мартенсит, гранулярный бейнит, реечный бейнит

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-174-181

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Высокопрочные свариваемые улучшаемые стали. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 212 с.
2. Орыщенко А. С., Хлусова Е. И., Шарапов М. Г. Металловедение конструкционных свариваемых сталей: Уч. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 66 с.
3. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Легостаев Ю. Л., Семичева Т. Г. Основные аспекты создания и применения высокопрочной конструкционной стали // Вопросы материаловедения. – 1999. – № 3 (19). – С. 7–20.
4. Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние структуры, сформированной при закалке на свойства высокопрочной хладостойкой стали после отпуска // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 1(53). – С. 32–44.

УДК 621.793.3:669.24 '27:621.357:621.785.3

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ НАНОКОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ Ni–W

М. В. МЕРКУЛОВА^{1,2}, А. В. КРАСИКОВ¹, канд. хим. наук, М. С. МИХАЙЛОВ¹

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

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Поступила в редакцию 2.11.2022

После доработки 10.11.2022

Принята к публикации 11.11.2022

Исследовано влияние термической обработки (температуры и продолжительности отжига) на структуру и свойства покрытий системы Ni–W, полученных методом электроосаждения. Установлено, что в результате отжига происходит повышение микротвердости за счет упрочнения матрицы сплава и выделения интерметаллидных фаз Ni₄W и NiW. Выбран режим термической обработки, обеспечивающий максимальную микротвердость 1350 HV для покрытий Ni–W с содержанием вольфрама 44 мас. %.

Ключевые слова: электроосажденные покрытия системы Ni–W, термическая обработка, микротвердость, интерметаллид, твердый раствор вольфрама в никеле

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-182-190

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковенский И. М. Отжиг электроосажденных металлов и сплавов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1995. – 92 с.
2. Tsyntaru N., Cesiulis H., Donten M., Sort J., Pellicer E., Podlaha-Murphy E. J. Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2012. – V. 48, N 6. – P. 491–520.

© 2022

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

3. Eliaz N., Gileadi E. Induced Codeposition of Alloys of Tungsten, Molybdenum and Rhenium with Transition Metals // *Morden Aspects of Electrochemistry*. – 2008. – N 42. – P. 191–301.
4. Yamasaki T., Tomohira R., Ogino Y., Schloßmacher P., Ehrlich Y. Formation of ductile amorphous & nanocrystalline Ni–W alloys by electrodeposition // *Plating & surface finishing*. – 2000. – N 87. – P. 148–152.
5. Oue S., Nakano H., Kobayashi S., Fukushima H. Structure and Codeposition Behavior of Ni–W Alloys Electrodeposited from Ammoniacal Citrate Solutions // *J. Electrochem. Soc.* – 2009. – V. 156. – P. D17–D22.
6. Donten M. Bulk and surface composition, amorphous structure, and thermocrystallization of electrodeposited alloys of tungsten with iron, nickel, and cobalt // *J. Solid State Electrochem.* – 1999. – N 3. – P. 87–96.
7. Mizushima I. Electrodeposition of the Ni–W Alloy and Characterisation of Microstructure and Properties of the Deposits // Thesis...Ph.D. in materials and process technology, National Technical University of Denmark. – 2006. – P.134.
8. Donten M., Stojek Z., Cesiulis H. Formation of Nanofibres in Thin Layers of Amorphous W Alloys with Ni, Co and Fe Obtained by Electrodeposition // *J. Electrochem. Soc.* – 2003. – V. 150. – P. 95–98.
9. Schloßmacher P., Yamasaki T. Structural Analysis of Electroplated Amorphous-Nanocrystalline Ni–W, *Mikrochimica Acta*. – 2000. – N 132. – P. 309–313
10. Morphology, Structure, Microhardness and CorrosionResistance of Ni–W Coating Annealed in Hydrogenand Argon Atmosphere / Qiongyu Zhou et al.// *J. of Materials Engineering and Performance*. – 2017. – V. 26. – N 6. – P. 2465–2471.
11. Donten M. Bulk and surface composition, amorphous structure, and thermocrystallization of electrodeposited alloys of tungsten with iron, nickel, and cobalt // *Journal Solid State Electrochem.* – 1999. – V. 3. – P. 87–96.
12. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. Т. 3, кн. 1 / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – 872 с.
13. Yamasaki T. High-strength nanocrystalline Ni–W Alloys produced by electrodeposition // *Mater. Phys. Mech. L.* – 2000. – V. 1. – P. 127–132.
14. Krasikov A. V., Merkulova M. V., Markov M. A., Bykova A. D. Tungstenrich Ni–W coatings, electrodeposited from concentrated electrolyte for complex geometry parts protection // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – V. 1758(1). – P. 012019.

УДК 621.039.553:620.193

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА КОРПУСОВ РАСТВОРНЫХ РЕАКТОРОВ В НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Т. В. БОЙКОВА, Ю. О. КОЧНОВ, С. В. МЯСНИКОВ, Н. В. ПЕТРУНИН, С. С. ТЕРАШКЕВИЧ

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

Поступила в редакцию 17.10.2022

После доработки 30.11.2022

Принята к публикации 9.12.2022

Рассматривается опыт использования образцов-свидетелей для контроля состояния металла корпуса реактора «Аргус» с топливом в виде водного раствора уранил-сульфата в процессе многолетней эксплуатации ядерной установки в НИЦ «Курчатовский институт» с учетом эволюции нормативно-правовой базы, регламентирующей проведение испытаний. Испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии проводили с целью установления фактического состояния материала. Основной задачей исследований являлось выявление дефектов коррозионного характера. Рассматриваемый подход подразумевает исследование образцов-свидетелей из стали марки 08X18H10T, соединенных между собой сварочной проволокой Св.04X19H11M3 и установленных внутри реактора. Извлечение образцов для анализа проводят примерно один раз в 10 лет или при

энерговыведении более $5 \cdot 10^5$ кВт.ч. На основе экспериментальных результатов показана высокая стойкость используемых материалов в коррозионно-активной среде топливного раствора.

Ключевые слова: растворный реактор «Аргус», эксплуатационный контроль, уранил-сульфат, образцы-свидетели, межкристаллитная коррозия, металлографические исследования, контрольный образец, коррозионная стойкость, остаточный ресурс

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198

ЛИТЕРАТУРА

1. Ядерные реакторы для исследовательских целей. Материалы комиссии по атомной энергии США. – М.: Иностран. лит-ра, 1956.
2. Dumenfeld M. S., Stitt R. K. Summary review of kinetics experiments on water boilers. – NAA-SR-7087, 1963.
3. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы: монография. Т. 1. – Саров: Изд-во ФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – 552 с.
4. Андреев В. В., Андреев С. А., Кедров А. В., Лукин А. В. К истории создания и развития импульсных ядерных реакторов типа ЭЛИР, ИГРИК, ЯГУАР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2014. – № 3 – С. 11–17.
5. New advances in the computational simulation of Aqueous Homogeneous Reactor for medical isotopes production / D. M. Perez et al. // Brazilian Journal of Radiation Sciences – 2020. – V. 8, Is. 3A – P. 1–18.
6. НП-024–2000. Требования к обоснованию возможности продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии. Введен 2001-07–01. М.: Госатомнадзор России, 2000.
7. Homogeneous aqueous solution nuclear reactors for the production of Mo-99 and other short-lived radioisotopes – Vienna: IAEA-TECDOC-1601, 2008 – 86 p.
8. Margolin B. Z., Sorokin A. A. A physical-mechanical model of ductile fracture in irradiated austenitic steels // Strength of Materials. – 2013. – V. 45, Is. 2. – P. 125–143.
9. Васина Н. К., Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Курсевич И. П. Радиационное распухание нержавеющей стали: влияние различных факторов. Обработка экспериментальных данных и формулировка определяющих уравнений // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 4(48). – С. 69–89.
10. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
11. Закономерности и взаимосвязи радиационных явлений в аустенитных сталях, облучённых до высоких повреждающих доз / В. С. Неустроев и др. // Сб. материалов 13 Международной школы-конференции «Новые материалы – жизненный цикл материалов: старение и деградация материалов в процессе эксплуатации ЯЭУ» – НИЯУ МИФИ, 17–21 октября, 2016 г. – С. 41–42.

УДК 621.039.59

О ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ТЕХНОЛОГИИ ИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

А. С. ПЕТРОВСКАЯ¹, канд. физ.-мат. наук, А. Б. ЦЫГАНОВ¹, канд. физ.-мат. наук, С. В. СУРОВ²,
Д. А. БЛОХИН²

¹ООО «ИнноПлазмаТех», 199034, Санкт-Петербург, 17-я линия В.О., д. 4–6, лит. В.
E-mail: anita3425@yandex.ru

²АО «Наука и инновации», Научный дивизион ГК «Росатом», 115035, Москва,
Кадашевская набережная, дом 32/2, строение 1

Поступила в редакцию 31.10.2022

Проведены исследования по разработке плазменной технологии ионное травление – термическое разделение (ИТ–ТР) для замыкания ядерного топливного цикла и переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Процесс атомизации таблетки ОЯТ производится под действием плазменного разряда в среде инертного газа или водорода с последующим перемещением распыленных атомов ОЯТ в потоке газа и отдельным осаждением распыленных атомов на выделенных участках трубы. На основе численного расчета температурного поля и поля скоростей газаносителя вычислены значения теплофизических параметров технологии. Полученные значения параметров позволят сконструировать прототип диффузионной разделительной системы с оптимальным режимом распыления и отдельного сбора элементных компонентов ОЯТ.

Ключевые слова: ядерный топливный цикл, переработка отработанного ядерного топлива, конструкционные материалы, радиационное материаловедение, плазменный разряд высокого давления, теплофизические параметры, поле температуры

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-112-4-199-211

ЛИТЕРАТУРА

1. Хаперская А. В. Проблемы обращения с ОЯТ в России и перспективы их решения // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. – 2012. – № 3. – С. 50–56.
2. Программа создания инфраструктуры и обращения с отработавшим ядерным топливом на 2011–2020 годы и на период до 2030 года. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. – 2012. – № 2. – С. 43–55.
3. Жерин И. И., Амелина Г. Н. Химия тория, урана, плутония: Учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2010. – С. 147.
4. Thermodynamic properties of stable states cerium compounds in fused 3LiCl-2KCl eutectic / M. Xu, V. Smolenski, Q. Liu, A. Novoselova et al. // The Journal of Chemical Thermodynamics. – 2021. – V. 152. – P. 106260. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2020.106260>.
5. Патент РФ № 2603019. Способ переработки облученного ядерного топлива / Волк В. И., Арсеенков Л. В., Смирнов С. И., Веселов С. Н., Двоглазов К. Н., Гаврилов П.М., Алексеенко В. Н., Дьяченко А. С. Оpubл. 20.11.2016. Заявка № [2015152512/07](#).
6. Патент РФ № 2556108. Способ переработки облученного ядерного топлива / Столяревский А. Я. Оpubл. 10.17.2015. Заявка № [2014123394/05](#).
7. Патент РФ № 2626763. Способ растворения облученного ядерного топлива / Жабин А. Ю., Апальков Г. А., Смирнов С. Н., Аксютин П. В., Дьяченко А. С., Малышева В. А. Оpubл. 01.08.2017. Заявка № [2016135602](#).
8. Кулагин В. А., Кулагина Т. А., Матющенко А. И. Переработка отработавшего ядерного топлива и обращения с радиоактивными отходами // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2013. – № 2(6). – С. 123–149.
9. Нагубнева М. И., Чижевская С. В., Магомедбеков Э. П. Химическая технология переработки отработавшего ядерного топлива как объект экспортного контроля // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – № 31(10). – С. 40–42.
10. Choi E. Y., Jeong S. M. Electrochemical processing of spent nuclear fuels: An overview of oxide reduction in pyroprocessing technology // Progress in Natural Science: Materials International. – 2015. – V. 25 (6). – P. 572–582.
11. Bekhtenev A. A., Volosov V. I. Problems of thermonuclear reactor with a rotating plasma // Nuclear Fusion. – 1980. – V. 20, N 5. – P. 579.
12. Volosov V. I., Pekker M. S. Longitudinal plasma confinement in a centrifugal trap // Nuclear Fusion. – 1981. – V. 21, N 10. – P. 1275.

13. Fetterman A. J., Fisch N. J. The magnetic centrifugal mass filter // *Phys. Plasmas*. – 2011. – V. 18. – P. 094503. <https://doi.org/10.1063/1.3631793>
14. Krishnan M., Geva M., Hirshfield J. L. Plasma Centrifuge // *Phys. Rev. Lett.* – 1981. – V. 46. – P. 36. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.46.36>
15. Krishnan M., Geva M., Hirshfield J. L. Element and isotope separation in a vacuum-arc centrifuge // *Journal of Applied Physics*. – 1984. – V. 56. – P. 1398. <https://doi.org/10.1063/1.334139>
16. Louvet P. Review of isotopic plasma separation processes // *Proc. of the Second Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases. V. 1* / Eds.: Louvet P., Soubbaramayer N. – Versailles-Saclay: Univ. Paris – Saclay, 1989.
17. Grossman M. W., Shepp T. A. Plasma isotope separation methods // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 1991. – V.19. – P. 1114–1122. DOI: [10.1109/27.125034](https://doi.org/10.1109/27.125034)
18. Устинов А. Л. Плазменные методы разделения изотопов // *Итоги науки и техники. Серия Физика плазмы*. – Т.12 / Под. ред. А. И. Карчевского. – М.: ВИНТИ, 1991. – 42 с.
19. Смирнов В. П., Самохин А. А., Ворона Н. А., Гавриков А. В. Исследование движения заряженных частиц в различных конфигурациях полей для развития концепции плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива // *Физика плазмы*. – 2013. – Т. 39, № 6. – С. 523–533.
20. Патент РФ № 2446489. Способ плазмооптической масс-сепарации и устройство для его осуществления / Строкин Н. А., Астраханцев Н. В., Бардаков В. М., Зан В. Н., Кичигин Г. Н., Лебедев Н. В. Оpubл. 27.03.2012. [2010127396/07](https://patents.fedor.ru/patents/2446489).
21. Патент РФ № 2469776. Способ панорамной плазменной масс-сепарации и устройство панорамной плазменной масс-сепарации (варианты) / Строкин Н. А., Бардаков В. Н., Зан В. Н. Оpubл. 20.12.2012. [2011134112/05](https://patents.fedor.ru/patents/2469776).
22. Астраханцев Н. В., Бардаков В. М., Зан В. Н., Кичигин Г. Н., Лебедев Н.В., Строкин Н. А. Плазмооптическая сепарация и диагностика результатов разделения отработанного ядерного топлива // *Вопросы атомной науки и техники. Плазменная электроника и новые методы ускорения*. – 2010. – № 4. – С. 310–315.
23. Астраханцев Н. В., Бардаков В. М., Зан В. Н., Кичигин Г. Н., Лебедев Н. В., Строкин Н. А. Плазмооптические масс-сепараторы отработанного ядерного топлива // *Перспективные материалы*. – 2011. – № 10. – С. 80–85.
24. Жильцов В. А., Кулыгин В. М., Семашко Н. Н., Скворода А. А., Смирнов В. П., Тимофеев А. В., Кудрявцев Е. Г., Рачков В. И., Орлов В. В. Применение методов плазменной сепарации элементов к обращению с ядерными материалами // *Атомная энергия*. – 2006. – Т. 101, вып. 4. – С. 302–306.
25. Волосов В. И., Деменев В. В., Стешов А. Г., Чуркин И. Н. Структура электрических полей в ловушке с вращающейся плазмой // *Прикладная физика*. – 2000. – № 4. – С. 22–27.
26. *Laser Spectroscopy and its Applications. V. 11* / Eds: Radziemski L.J., Solarz R.W., Raisner J.A. – New York: M. Dekker. – 1987. – 417 p.
27. *Laser Isotope Separation in Atomic Vapor* / P. A. Bokhan et al. – Berlin: Wiley-VCH. – 2006.
28. Jensen R. J., Sullivan J. A., Finch F. T. Laser isotope separation // *Separation Science and Technology*. – 1980. – V. 15. – P. 509–532.
29. Eerkens J. W., Kim J. Isotope separation by selective laser-assisted repression of condensation in supersonic free jets // *AIChE Journal*. – 2010. – V. 56. – P. 2331–2337.
30. *Multiple-Photon Excitation and Dissociation of Polyatomic Molecules, Topics in Current Physics* / Ed. C. D. Cantrell. – Berlin: Springer-Verlag. – 1986. – V. 35.
31. Патент РФ № 2711292. Способ дезактивации элемента конструкции ядерного реактора / Петровская А. С., Цыганов А. Б., Стахив М. Р. Оpubл. 16.01.2020. Заявка [2018140999](https://patents.fedor.ru/patents/2711292).

32. Европейская патентная заявка WO2019RU00816. Способ дезактивации элемента конструкции ядерного реактора / Петровская А. С., Цыганов А. Б., Стахив М. Р. Опубл. 14.11.2019.
33. Петровская А. С., Кладков А. Ю., Суров С. В., Цыганов А. Б. Расчет температурных режимов плазменной распылительной ячейки для дезактивации конструктивных элементов ядерных энергетических установок // Вопросы материаловедения. – 2019. – Вып. 4 (100). – С. 166–178.
34. Petrovskaya A. S., Tsyganov A. B., Kladkov A. Y., Surov S. V., Stakhiv M.R. Plasma Scraping of ¹⁴C surface nano-layer formed by neutron fluence of graphite reactor // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – V. 14. – Suppl. 1. – P. S175–S178.
35. Petrovskaya A. S., Kladkov A. Y., Surov S. V., Stakhiv M. R., Tsyganov A. B. Fabrication of nano-micro-sized ¹⁴C enriched constructive elements in plasma deactivation treatment of irradiated reactor graphite // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1461. – P.012132. DOI: [10.1088/1742-6596/1461/1/012132](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1461/1/012132)
36. Петровская А. С., Кладков А. Ю., Суров С. В., Цыганов А. Б. Инновационный метод плазменной дезактивации конструкций ядерных энергетических установок и облученного реакторного графита // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 4. – С. 185–197.
37. Petrovskaya A. S., Tsyganov A. B., Surov S. V., Kladkov A. Yu. Ion Sputtering – Thermal Separation Technology for Spent Nuclear Fuel Processing // Nuclear Engineering and Design. – 2022. – V. 386. – Art. N 111561. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111561>
38. Несмеянов А. Н. Давление пара химических элементов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 393.