

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

- Федосеев М. Л., Петров С. Н., Николаев Д. И., Бескровный А. И., Лычагина Т. А.* Методические аспекты исследования высокопрочной стали при помощи рентгеновской и нейтронной дифракции 7
- Китаев Н. И., Пичхидзе С. Я.* Расчет и исследование напряженно-деформированного состояния азотированного зубчатого колеса 16
- Михайлов В. И., Козлова И. Р., Кузнецов С. В., Маркова Ю. М., Васильева Е. А.* Термическая обработка сварных соединений опытного высоколегированного сплава титана 26
- Леонов В. П., Молчанова Н. Ф., Воропаев А. А., Шальнова С. А., Чудаков Е. В., Иксанов М. В.* Исследование свойств, структуры и качества металла заготовок титанового сплава Ti-4,25Al-2V, полученных методом прямого лазерного выращивания 40
- Медведев П. Н., Кашапов О. С., Решетило Л. П.* Исследование поверхностных слоев титанового сплава VT41 после механической обработки 54

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Щегольков А. В., Липкин М. С., Щегольков А. В., Семенкова А.* Применение углеродных нанотрубок, полученных CVD-методом, для суперконденсаторов с электролитом на основе LiPF₆ 64
- Васильев А. Ф., Гюлиханданов Е. Л., Климов В. Н., Макаров А. М., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В.* Исследование процесса активированной пайки металла со стеклом. 77
- Бобкова Т. И., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А., Макаров А. М., Гюлиханданов Е. Л., Гошкодеря М. Е., Фармаковский Б. В.* Разработка технологии нанесения защитных функционально-градиентных покрытий из диборида титана с помощью магнетронного напыления 83
- Бобкова Т. И., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А., Гошкодеря М. Е., Марголин В. И., Фармаковский Б. В.* Разработка технологии магнетронного напыления композиционных наноструктурированных покрытий из сплава системы V-Ti-Cr-TiC 89
- Бобкова Т. И., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А., Гошкодеря М. Е., Макаров А. М., Фармаковский Б. В.* Функционально-градиентные покрытия системы HfB₂-Si₃N₄ с высокой стойкостью к износу, полученные с помощью технологии сверхзвукового холодного газодинамического напыления 96
- Раевских А. Н., Чабина Е. Б., Филонова Е. В.* Исследование влияния характеристик исходного порошка на микрорельефные особенности сплава ЖС6К, полученного методом селективного лазерного сплавления 101
- Бобкова Т. И., Геращенко Д. А., Гошкодеря М. Е., Макаров А. М., Марголин В. И., Фармаковский Б. В.* Композиционные наноструктурированные порошки системы нитинол – ZrC для получения покрытий с высокими физико-механическими свойствами 120

ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Ли Сяньшунь, Седакова Е. Б.* Применение метода молекулярно-динамического моделирования для анализа износостойкости композита в сравнении с исходной полимерной матрицей 126
- Колпачков Е. Д., Щур П. А., Куршев Е. В., Черняева И. Ю., Шведов А. В.* Влияние ионно-плазменной обработки армирующих наполнителей на комплекс свойств ПКМ 134
- Трясунов В. С., Шульцева Е. Л.; Баганик А. М., Полякова Ю. В.* Свойства стеклопластиков на основе огнестойких полиэфирных смол российского производства марок Аркпол 40 М и Полимер 3088 ТА 147

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Самойленко Р. И., Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Маркова Ю. М., Анисимов Д. М., Королев С. А., Гуркин С. В.* Исследование структурно-фазовых превращений в металле монтажных сварных соединений реакторных установок атомных ледоколов 157

Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Варовин А. Я. Исследование влияния пострадиационного отжига на восстановление свойств материалов опорных конструкций корпусов реакторов ВВЭР-440. Часть 1. Постановка задачи и результаты испытаний	169
Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Варовин А. Я., Рогожкин С. В., Никитин А. А. Исследование влияния пострадиационного отжига на восстановление свойств материалов опорных конструкций корпусов реакторов ВВЭР-440. Часть 2. Анализ особенностей влияния отжига материала после низкотемпературного облучения.....	184
Курский Р. А., Рожков А. В., Забусов О. О., Мальцев Д. А., Скундин М. А., Бандура А. П., Васильева Е. А., Шишкин А. А. Влияние термомеханического воздействия на структуру гидридов в облученных оболочечных трубах из сплава Э110 в условиях длительного «сухого» хранения отработавшего ядерного топлива.....	199

ХРОНИКА

Академик РАН Евгений Николаевич Каблов (к 70-летию со дня рождения)	215
Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов	218

УДК [539.26 + 539.27]:669.14.018/295

PACS 61.05.cp, 61.05.F

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ ПРИ ПОМОЩИ РЕНТГЕНОВСКОЙ И НЕЙТРОННОЙ ДИФРАКЦИИ

М. Л. ФЕДОСЕЕВ¹, С. Н. ПЕТРОВ¹, д-р техн. наук, Д. И. НИКОЛАЕВ², канд. физ.-мат. наук,
А. И. БЕСКРОВНЫЙ², канд. физ.-мат. наук, Т. А. ЛЫЧАГИНА², канд. физ.-мат. наук

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
Шпалерная ул., 49, E-mail: npk3@crism.ru

²Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований», 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

Поступила в редакцию 7.10.2021

После доработки 8.11.2021

Принята к публикации 10.11.2021

Методы рентгеновской и нейтронной дифракции являются одними из наиболее информативных при исследованиях интегрального содержания дисперсных выделений в высокопрочных среднеуглеродистых сталях. Достоинства методов и ограничения их применения сопоставлены на примере исследования изменений качественного и количественного составов дисперсных фаз в износостойкой стали марки Б1700 в закаленном состоянии и после отпуска в интервале температур 150–600°С. По результатам исследования установлено, что остаточный аустенит присутствует в закаленном состоянии и полностью растворяется после отпуска при температуре выше 300°С. В этом же температурном диапазоне на дифракционной картине появляется цементит. Результаты исследования показывают, что нейтронные инструменты более надежно могут выявить малые количества остаточного аустенита, при этом рентгеновские инструменты дают лучшее разрешение, особенно при больших углах рассеяния.

Ключевые слова: рентгеновская и нейтронная дифракция, карбиды, остаточный аустенит, высокопрочная сталь

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-07-15

ЛИТЕРАТУРА

1. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
2. Cousin F. Small-angle neutron scattering // EPJ Web of Conferences. – 2015. – V. 104. – P. 01004.

3. Рябов В. В., Князюк Т. В., Михайлов М. С., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Структура и свойства новых износостойких сталей для сельскохозяйственного машиностроения // Вопросы материаловедения. – 2016. – Т. 86, № 2. – С. 7–19.
4. Shvetsov V. N. Neutron Sources at the Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research // Quantum Beam Science. – 2017. – V. 6, N 1. – P. 1–9.
5. Keppler R., Ullemeyer K., Behrmann J. H., Stipp M. Potential of full pattern fit methods for the texture analysis of geological materials: implications from texture measurements at the recently upgraded neutron time-of-flight diffractometer SKAT // Journal of Applied Crystallography. – 2014. – N 47. – P. 1520–1534.
6. Nikolayev D. I., Lychagina T. A., Nikishin A. V., Yudin V. V. Study of error distribution in measured pole figures // Solid State Phenomena. – 2005. – N 105. – P. 77–82.
7. Lychagina T., Nikolayev D., Sanin A., Tatarko J., Ullemeyer K. Investigation of rail wheel steel crystallographic texture changes due to modification and thermomechanical treatment // 17th International Conference on Textures of Materials (ICOTOM 17), 2015. Vol. 82 012107. – P. 1–6.
8. Balagurov A. M., Beskrovnyy A. I., Zhuravlev V. V., Mironova G. M., Bobrikov I. A., Neov D. Sheverev S.G. Neutron diffractometer for real-time studies of transient processes at the IBR-2 pulsed reactor // J. Synch. Investig. – 2016. – N 10. – P. 467–479.
9. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
10. Zhu C., Cerezo A., Smith G. D. W. Carbide characterization in low-temperature tempered steels // Ultramicroscopy. – 2009. – N 109. – P. 545–552.
11. Hoyos J., Ghilarducci A., Salva H., Velez J. Evolution of martensitic microstructure of carbon steel tempered at low temperatures // Procedia Materials Science. – 2012. – N 1. – P. 185–190.
12. Talebi S. H., Ghasemi-Nanasa H., Jahazi M., Melkonyan H. In situ study of phase transformations during non-isothermal tempering of bainitic and martensitic microstructures // Metals. – 2017. – V. 7 (9), N 346. – P. 13.
13. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. – М.: Техносфера, 2006. – 256 с.
14. Свергун Д. И., Фейгин Л. А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. – М.: Наука, 1986. – 280 с.
15. Рябов В. В., Хлусова Е. И., Зисман А. А., Рогожкин С. В., Никитин А. А., Лукьянчук А. А. Количественный анализ карбидных фаз среднеуглеродистой стали после низкого отпуска // Металлург. 2018. – № 9. – С. 64–70.
16. Hutchinson B., Hagstrom J., Karlsson O., Lindell D., Tornberg M. Microstructures and hardness of as-quenched martensites (0.1–0.5% C) // Acta Materialia. – 2011. – N 59. – P. 5845–5858.
17. Hou Z., Babu R.P., Hedstrom P., Odqvist J. Microstructure evolution during tempering of martensitic Fe–C–Cr alloys at 700C // J. Mater. Sci. – 2018. – N 53. – P. 6939–6950.
18. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М., 1970.
19. Федосеев М. Л., Петров С. Н., Исламов А. Х., Дроздова Н. Ф., Лычагина Т. А., Николаев Д. И. Комплексный подход к количественному описанию карбидов в высокопрочной стали // Письма о материалах. – 2018. – Т. 3, № 8. – С. 323–328.
20. Lychagina T. A., Zisman A. A., Yashina E. A., Nikolayev D. I. Directly verifiable neutron diffraction technique to determine retained austenite in steel // Advanced Engineering Materials. – 2017. – N 1700559. – P. 1–6.
21. Гринберг Е. М., Алексеев А. А., Бударина А. В., Саломатников М. С. Особенности мартенситной структуры среднеуглеродистой стали после низкотемпературного отпуска // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – № 5.2. – С. 251–256.
22. Иванов Ю. Ф., Козлов Э. В. Изотермический отпуск закаленной среднеуглеродистой малолегированной стали. Преобразование дефектной структуры // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2004. – Т. 1, № 2. – С. 21–32.

23. Kriška M., Tacq J., Van Acker K., Seefeldt M., Van Petegem S. Neutron and X-ray diffraction study of residual and internal stress evolution in pearlitic steel during cold drawing // Journal of Physics: Conference Series. – 2012. – No. 340. – P. 012101.

УДК 621.833:621.785.532:539.4.014.1

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АЗОТИРОВАННОГО ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА

Н. И. КИТАЕВ, С. Я. ПИЧХИДЗЕ, д-р. техн. наук

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.»,
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, e-mail: kitaev-1995@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022

После доработки 3.03.2022

Принята к публикации 16.03.2022

Дан анализ напряженно-деформированного состояния конструкции азотированного зубчатого колеса с использованием программ SolidWorks 2018 (Simulation) и APM WinMachine (FEM). Приведены модели, методика, примеры расчетов. Установлено, что в результате азотирования увеличиваются поверхностная твердость изделия и коэффициент запаса прочности. Оптимальная температура для процесса формирования азотированного слоя твердостью 11740–12003 МПа для коррозионно-стойкой жаропрочной стали марки 12X18H9T составила 570–590°C при времени азотирования 48 ч. После азотирования исследуемая сталь имеет однородную структуру с четко выраженными переходными слоями, средняя толщина азотированного слоя составляет 60–90 мкм.

Напряженно-деформированное состояние изделия до и после азотирования, определяющее внутренние напряжения и деформацию зуба колеса, показывает, что статические характеристики примерно равны. Однако колесо, упрочненное методом азотирования, имеет более высокую твердость, больший запас прочности и меньшую склонность к деформации при высоких нагрузках.

Ключевые слова: прочность, коррозионно-стойкая жаропрочная сталь, технология, зубчатое колесо, статические характеристики, азотирование, усталость, надежность, твердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-16-25

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусейнов А. Г. Повышение работоспособности деталей машин и аппаратуры путем восстановления и упрочнения диффузионной металлизацией // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: АзТУ, МГСУ, 2002. – 40 с.
2. Ремонт дорожных машин, автомобилей и тракторов: учебник для учреждений СПО / Под ред. В. А. Зорина. – 10-е изд. – М.: Академия, 2016. – С. 512.
3. Кобелева К. В., Туктамышев В. Р. Обзор методов повышения долговечности авиационных зубчатых передач // Аэрокосмическая техника. Пермь: Вестник ПНИПУ. – 2017. – № 50. – С. 11. doi: 10.15593/2224-9982/2017.50.12.
4. Старосельский, А. А., Гаркунов Д. Н., Долговечность трущихся деталей машин: производственно-практическое издание. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 396.
5. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
6. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – С. 240.
7. Китаев, Н. И., Костин К. Б., Пичхидзе С. Я. Упрочнение высоконагруженного зубчатого колеса // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование // Сб. материалов 7-й Международной молодежной научно-практической конференции, Курск: ЮЗГУ. – 2020. – 4 с.
8. Маркова О. А. Прикладная механика. Детали машин. Часть I: Учебное пособие. – Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2013. – С. 123.
9. Пегашкин В. Ф. Обработка зубчатых колес: Учебн. пособие. – ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – С. 132

10. Костин К. Б., Горшков Н. В., Викулова М. А., Лукьянова В. О., Пичхидзе С. Я. Исследование поверхности и состава стали марки 12X18H10T с разными типами обработки // Сб. материалов XXVIII МНПК, 31.07.2017, Самара: НИЦ «Л-Журнал», 2017. – 2 с.

11. Борисов Ю. С., Викулова М. А., Китаев Н. И., Пичхидзе С. Я. Анализ возможности упрочнения микрохирургических офтальмологических ножниц // Тамбов: Научный альманах. – 2020. – № 7–1 (69). – С. 153–156.

12. Бибииков П. С. Влияние газо-термоциклических процессов азотирования на структуру и свойства высоколегированных коррозионностойких сталей авиационного назначения // Автореф. дис. ... канд. наук. – М.: МЭИ, 2021. – 22 с.

13. Китаев Н. И., Пичхидзе С. Я. Исследование прочностных характеристик азотированного зубчатого колеса // Материаловедение. – 2021. – № 8. – С. 3–8.

УДК 669.295:621.791.051.6

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОПЫТНОГО ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО СПЛАВА ТИТАНА

В. И. МИХАЙЛОВ, д-р техн. наук, И. Р. КОЗЛОВА, канд. техн. наук, С. В. КУЗНЕЦОВ,
Ю. М. МАРКОВА, Е. А. ВАСИЛЬЕВА

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

Поступила в редакцию 23.08.2021

После доработки 15.09.2021

Принята к публикации 17.09.2021

Исследовано влияние термической обработки на фазовый состав и структурное состояние сварных соединений опытного высоколегированного сплава титана, выполненных аргонодуговой и электронно-лучевой сваркой. Показано, что в результате проведения термической обработки сварных соединений при температуре 690°C происходит стабилизация структуры ОШЗ. Однако для полного восстановления пластичности сварного соединения с образованием в структуре ОШЗ глобулей α -фазы простого строения необходима более высокая температура термообработки.

Ключевые слова: титановые сплавы, сварное соединение, термообработка, структура, микротвердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-26-39

ЛИТЕРАТУРА

1. Моисеев В. Н., Куликов Ф. Р., Кириллов Ю. Г., Шолохова Л. В., Васькин Ю. В. Сварные соединения титановых сплавов (структура и свойства). – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.

2. Лясоцкая В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М., Экомет, 2003, 352 с..

3. Хорев А. И.. Основы термической обработки и сварки высокопрочных (альфа+бета) титановых сплавов. Технология машиностроения, 2013, № 8, с.5-11.

4. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 367 с.

5. Козлова И. Р., Чудаков Е. В., Третьякова Н. В., Маркова Ю. М., Васильева Е. А. Влияние термической обработки на формирование структуры и уровень механических свойств высоколегированного сплава титана // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 4 (100). – С. 28–41.

6. Михайлов В. И., Козлова И. Р., Кузнецов С. В., Маркова Ю. М., Васильева Е. А. Структурно-фазовые превращения при сварке высоколегированного сплава титана // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 3 (107). – С. 63–81.

7. Колачев Б. А., Ильин А. А., Рынденков Д. В. Система Ti–Al–Mo как основа диаграммы фазового состава отожженных титановых сплавов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 56–61.

8. Грабин В. Ф. Структура и свойства сварных соединений из титановых сплавов. – Киев: Наукова думка, 1964. – 105 с.
9. Хорев А. И. Основы легирования и теория термической обработки сварных соединений титановых бета-сплавов // Сварочное производство. – 2012. – № 3. – С. 31-39.
10. Польшкин И. С. Упрочняющая термическая обработка титановых сплавов. – М.: Metallurgia, 1984. – 96 с.
11. Горынин И. В., Ушков С. С., Хатунцев А. Н., Лошакова Н. И. Титановые сплавы для морской техники. – СПб.: Политехника, 2007. – 387 с.

УДК 669.295:621.762.5

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ, СТРУКТУРЫ И КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА ЗАГОТОВОК ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti–4,25Al–2V, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

В. П. ЛЕОНОВ¹, д-р техн. наук, Н. Ф. МОЛЧАНОВА¹, А. А. ВОРОПАЕВ², С. А. ШАЛЬНОВА^{2,3},
Е. В. ЧУДАКОВ¹, канд. техн. наук, М. В. ИКСАНОВ¹

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

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»
190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3

³ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Поступила в редакцию 5.10.2021

После доработки 21.01.2022

Принята к публикации 28.01.2022

Приведены результаты исследований механических свойств металла титанового сплава Ti–4,25Al–2V, полученного методом прямого лазерного выращивания на оборудовании разработки Санкт-Петербургского морского технического университета. Проведен сравнительный анализ уровня механических свойств «выращенного» металла по отношению к литому и ковальному. Показано, что более высокий уровень свойств «выращенного» металла по сравнению с литым определяется его структурным строением, в частности высокой дисперсностью.

Ключевые слова: аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, титановые псевдо-α-сплавы, структура, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-40-53

ЛИТЕРАТУРА

1. Korsmik R., Tsybul'skiy I., Rodionov A., Klimova-Korsmik O., Gogolukhina M., Ivanov S., Zadykhan G., Mendagaliev R. The approaches to design and manufacturing of large-sized marine machinery parts by direct laser deposition // Procedia CIRP. – 2020. – V. 94. – P. 298–303. – DOI 10.1016/j.procir.2020.09.056.
2. Производство и применение литых изделий из сплавов на основе титана / Ушков С. С. и др. // Вопросы материаловедения. – 1999. – № 3. – С. 126–137.
3. Кудрявцев А. С., Молчанова Н. Ф., Травин В. В. Высокопрочные свариваемые литейные титановые сплавы для энергетического оборудования // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3 (59). – С. 162–171.
4. Turichin G. A., Klimova O. G., Zemlyakov E. V., Babkin K. D., Kolodyazhnyy D. Y., Shamray F. A., Travyanov A. Y., Petrovskiy P. V. Technological Aspects of High Speed Direct Laser Deposition Based on Heterophase Powder Metallurgy // Physics Procedia, Lappeenranta, 2015. – P. 397–406. – DOI 10.1016/j.phpro.2015.11.054
5. Turichin G. A., Klimova-Korsmik O. G., Gushchina M. O., Shalnova S. A., Korsmik R. S., Cheverikin V. V., Tataru A. S. Features of Structure Formation in α+β Titanium Alloys // Procedia CIRP. – 2018 – V. 74 – P. 188–191 – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.091>.

6. Sklyar M. O., Klimova-Korsmik O. G., Cheverikin V. V. Formation structure and properties of parts from titanium alloys produced by direct laser deposition. *Solid State Phenomena*. – 2017. – V. 265SSP. – P. 535–541. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.535.
7. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
8. Исследование структуры и свойств изделий из титанового сплава ВТ6, полученных методом прямого лазерного выращивания с последующей термической обработкой / О. Г. Климова-Корсмик, М. О. Гущина, С. А. Шальнова и др. // *Титан*. – 2019. – № 3. – С. 8–14.
9. Dutta B., Froes F. H. *Additive Manufacturing of Titanium Alloys*. – Elsevier Inc., 2016. – P. 87.
10. Mahamood R. M. Characterizing the Effect of Processing Parameters on the porosity of laser deposited titanium alloy powder // *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientist*. – 2014. – V. II. – P. 5
11. Туричин Г. А., Бабкин К. Д., Земляков Е. В. Развитие теории и технологии прямого лазерного выращивания крупногабаритных изделий для различных применений // Сборник докладов 8-й между. конф. “Beam Technologies Laser Application”, 2015. – С. 268–284
12. Бочвар Г. А., Борвецовская К. М., Говоров В. Г., Болотина Т. Н., Билибина Е. Н. Изготовление дисков из порошков-гранул сплава ВТ9 // *Материалы 3-ей международной конференции «Титан»*, Москва, 1976. – С. 463–468.
13. Горынин И. В., Чечулин Б. Б. *Титан в машиностроении*. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
14. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшкин И. С. *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник*. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
15. Gushchina M. O., Ivanov Yu. S., Vildanov A. M. Effect of Temperature Field on Mechanical Properties of Direct Laser Deposited Ti–6Al–4V Alloy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020.
16. Saboori A., Gallo D., Biamino S., Fino P., Lombardi M. An Overview of Additive Manufacturing of Titanium Components by Directed Energy Deposition: Microstructure and Mechanical Properties // *Applied Sciences*. – 2017. – V. 7 (9), N 883. DOI: 10.3390/app7090883.
17. Афанасьева Л. Е. Закономерности формирования структуры сплава Ti–6Al–4V при послойном электронно-лучевом плавлении и горячем изостатическом прессовании // *Вопросы материаловедения*. – 2017. – № 3. – С. 27–34.
18. Effects of Powder Feed Rate on Formation of Fully Equiaxed β Grains in Titanium Alloys Fabricated by Direct Energy Deposition / Q. Zhang, S. Zheng, M., Ou, Y. et al. // *Metals*. – 2020. – V. 10 (4), No 521. DOI: 10.3390/met10040521.
19. Carroll B. E., Palmer T. A., Beese A. M. Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with direct energy deposition additive manufacturing // *Acta Materialia*. – 2015. – V. 87. – P. 309–320.

УДК 669.295:620.179.11:621.914

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ41 ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

П. Н. МЕДВЕДЕВ, канд. техн. наук, О. С. КАШАПОВ, канд. техн. наук, Л. П. РЕШЕТИЛО

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: admin@viam.ru

Поступила в редакцию 28.12.2021

После доработки 27.01.2022

Принята к публикации 8.02.2022

Исследованы остаточные напряжения в поверхностном слое и шероховатость плоских поверхностей образца из титанового сплава ВТ41, полученного фрезерной обработкой концевыми фрезами, а также условия снятия этих напряжений посредством неполного отжига. Фрезерование осуществляли на универсальном вертикально-фрезерном станке, условия фрезерования варьировались по величине припуска за один проход.

Ключевые слова: титановый сплав, фрезерная обработка, шероховатость, остаточные напряжения,

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-54-63

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов В. М. Основы надежности газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
2. Солонина О. П., Глазунов С. Г. Современные жаропрочные титановые сплавы и перспективы их применения в двигателях. – М.: Металлургия, 1974. – 448 с.
3. Крымов В. В., Елисеев Ю. С., Зудин К. И. Производство лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение–Полет, 2002. – 376 с.
4. Кярамян К. А., Ночовная Н. А., Захарова Н. С., Кашапов О. С. Исследование микроструктуры, механических свойств материала и поверхностных остаточных напряжений лопаток рабочего колеса компрессора из титанового сплава ВТ41 в зависимости от исходного состояния и режимов неполного отжига // *Электрометаллургия*. 2021. – № 9. – С. 19–26.
5. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Ч. 1. / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк и др. – Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2003. – 396 с.
6. Богуслаев А. В., Качан А. Я., Мозговой С. В., Карась Г. В., Панасенко В. А. Обеспечение несущей способности лопаток осевых моноколес высокоскоростным фрезерованием // *Вестник двигателестроения*. – 2006. – № 2. – С. 17–19.
7. Березовский Е. К. Влияние режимов чистового высокоскоростного фрезерования на параметры качества поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТ6 // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – № 2. – С. 185–189.
8. Павлова Т. В., Калашников В. С., Кондратьева А. Р., Кочубей А. Я. Усталостная прочность полуфабрикатов из титановых сплавов для изготовления моноколес компрессора газотурбинных двигателей // *Вестник машиностроения*. – 2017. – № 4. – С. 77–81.
9. Moiseyev V. N. Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications (1st ed.). – CRC Press, 2005. <https://doi.org/10.1201/9781420037678>.
10. Поклад В. А. Электронно-лучевые технологии при изготовлении роторов газотурбинных двигателей из титановых сплавов // *Двигатель*. 2006. – № 4 (46). – С. 6–7. Электронный ресурс. <http://engine.aviaport.ru/issues/46/page06.htm>
11. Kablov E. N., Kovalev I. E., Zhemanyuk P. D., Tkachenko V. V., Voitenko S. A., Pirogov L. A., Banas F. P., Kovalev A. E. Efficiency of surface cold-work hardening of titanium alloys having different phase composition // *Computational and Experimental Methods Fifth International Conference on Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Treatment Effects, Surface Treatment V. Ser. "Surface Treatment V: Computer methods and Experimental Measurements"*. Seville, 2001. – P.23–32.
12. Каблов Е. Н., Кашапов О. С., Павлова Т. В., Ночовная Н. А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо- α титанового сплава ВТ41 // *Титан*. – 2016. – № 2 (52). – С. 33–42.
13. Кашапов О. С., Павлова Т. В., Калашников В. С., Кондратьева А. Р. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства опытных поковок из сплава ВТ41 с мелкозернистой структурой // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 3 (48). – С. 3–7. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-3-7.
14. Каблов Е. Н., Кашапов О. С., Медведев П. Н., Павлова Т. В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si – β -стабилизаторы // *Авиационные материалы и технологии*. – 2020. – № 1. – С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37
15. Кашапов О. С., Павлова Т. В., Калашников В. С., Заводов А. В. Явление образования и низкотемпературного распада метастабильных твердых растворов с выделением дисперсных частиц третичной α -фазы в жаропрочных титановых сплавах // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2018. – № 8. – Ст.01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 26.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6064-2018-0-8-3-22

16. Плохих А. И., Сафонов М. Д., Колесников А. Г., Карпухин С. Д. Механизм релаксации межслойных напряжений в многослойных стальных материалах // *Авиационные материалы и технологии*, 2018. – № 2. – С. 26–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-26-32

17. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: Учеб. пособие для вузов; 4-е изд. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с.

18. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.

19. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 7–17.

УДК 661.666.2:621.335

ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ПОЛУЧЕННЫХ CVD-МЕТОДОМ, ДЛЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ С ЭЛЕКТРОЛИТОМ НА ОСНОВЕ LiPF₆

А. В. ЩЕГОЛЬКОВ¹, канд. техн. наук, М. С. ЛИПКИН², д-р техн. наук, А. В. ЩЕГОЛЬКОВ^{1,2},
А. СЕМЕНКОВА²

¹ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 392000, Тамбов, Советская ул., 106. E-mail: tstu@admin.tstu.ru

²ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова», 346428, Ростовская обл., Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Поступила в редакцию 9.06.2021

После доработки 29.12.2021

Принята к публикации 31.12.2021

Представлены результаты исследования углеродных нанотрубок, синтезированных CVD-методом на катализаторах Fe_{0,7}Co/2,1Al₂O₃, Fe–Co/2,1Al₂O₃ и Co–Mo/Al₂O₃–MgO для электродов суперконденсаторов, работающих на электролите LiPF₆. Было установлено, что удельная емкость для электродов из смеси углеродных материалов – нанотрубок и графита – существенно зависит от условий создания межзеренных контактов между частицами графита и углеродных нанотрубок, образующих систему вакансий для внедрения ионов.

Ключевые слова: суперконденсатор, углеродные нанотрубки, циклическая вольтамперометрия, электролит, функционализация

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-64-76

ЛИТЕРАТУРА

1. Yükseltürk A., Wewer A., Bilge P., Dietrich F. Recollection center location for end-of-life electric vehicle batteries using fleet size forecast: Scenario analysis for Germany // *Procedia CIRP*. – 2021. – V. 96. – P. 260–265.

2. He Y., Wang Zh., Zhang Y. The design, test and application on the satellite separation system of space power supply based on graphene supercapacitors // *Acta Astronautica*. – 2021. – V. 186, September. – P. 259–268.

3. Vukajlović N., Milićević D., Dumnić B., Popadić B. Comparative analysis of the supercapacitor influence on lithium battery cycle life in electric vehicle energy storage // *Journal of Energy Storage*. – 2020. – V. 31. – P. 101603.

4. Jun H. K. Hybrid Nanostructured Carbon Materials for Supercapacitors // *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. – Elsevier, 2021. DOI:10.1016/B978-0-12-819723-3.00044-5

5. Chandran V., Ghosh A., Patil C. K., Mohanavel V., Priya A. K., Rahim R., Madavan R., Muthuraman U., Karthick A. Comprehensive review on recycling of spent lithium-ion batteries // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – V. 47, Part 1. – P. 167–180.

6. Karthikeyan S., Narenthiran B., Sivanantham A., Bhatlu L.D., Maridurai T. Supercapacitor: Evolution and review // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – V. 46, Part 9. – P. 3984–3988.

7. Saha P., Dey S., Khanra M. Second-life applications of supercapacitors: Effective capacitance prognosis and aging // *Journal of Power Sources*. – 2021. – V. 496. – P. 229824.
8. Borenstein A., Hanna O., Attias R., Luski S., Brousse T., Aurbach D. Carbon-based composite materials for supercapacitor electrodes: a review // *J. Mater. Chem.* – 2017. – V. 5. – P. 12653–12672.
9. Ye T. T., Sun Y., Zhao X., Lin B. P., Yang H., Zhang X. Q., Guo L. X. Long-term-stable, solution-processable, electrochromic carbon nanotubes/polymer composite for smart supercapacitor with wide working potential window // *J. Mater. Chem. A*. – 2018. – V. 6. – P. 18994–19003.
10. Xin S., Yang N., Gao F., Zhao J., Li L., Teng C. Three-dimensional polypyrrole-derived carbon nanotube framework for dye adsorption and electrochemical supercapacitor // *Applied Surface Science*. – 2017. – V. 414. – P. 218–223.
11. Jiang W., Pan J., Liu X. A novel rod-like porous carbon with ordered hierarchical pore structure prepared from Al-based metal-organic framework without template as greatly enhanced performance for supercapacitor // *Journal of Power Sources*. – 2019. – V. 409. – P. 13–23.
12. Wei W., Liu W., Chen Z. J., Xiao R., Zhang Y., Du C., Wan L., Xie M. J., Chen J., Tian Z.F. Template-assisted construction of N,O-doped mesoporous carbon nanosheet from hydroxyquinoline-Zn complex for high-performance aqueous symmetric supercapacitor // *Appl. Surf. Sci.* – 2020. – V. 509.
13. Cao K. L. A., Rahmatika A. M., Kitamoto Y., Nguyen M. T. T., Ogi T. Controllable synthesis of spherical carbon particles transition from dense to hollow structure derived from Kraft lignin // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2021. – V. 589. – P. 252–263.
14. Zhang Y.-F., Du F.-P., Chen L., Law W.-C., Tang C.-Y. Synthesis of deformable hydrogel composites based on Janus bilayer multi-walled carbon nanotubes/host-guest complex structure // *Composites. Part B: Engineering*. – 2019. – V. 164. – P. 121–128.
15. Mandal M., Subudhi S., Alam I., Subramanyam B., Patra S., Raiguru J., Das S., Mahanandia P. Facile synthesis of new hybrid electrode material based on activated carbon/multiwalled carbon nanotubes@ZnFe₂O₄ for supercapacitor applications // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2021. – V. 123. – P. 108332.
16. Shchegolkov A. V., Burakova E. A., Dyachkova T. P., Orlova N. V., Komarov F. F., Lipkin M. S. Synthesis and functionalization of carbon nanotubes for supercapacitor electrodes // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. – 2020. – V. 63. – P. 74–81.
17. Yu C., Li H., Luo J., Zheng M., Zhong W., Yang W. Metal-organic coordination polymer/multi-walled carbon nanotubes composites to prepare N-doped hierarchical porous carbon for high performance supercapacitors // *Electrochimica Acta*. – 2018. – V. 284. – P. 69–79.
18. Meng J. S., Niu C. J., Xu L. H., Li J. T., Liu X., Wang X. P., Wu Y. Z., Xu X. M., Chen W. Y., Li Q., Zhu Z. Z., Zhao D. Y., Mai L. Q. General oriented formation of carbon nanotubes from metal-organic frameworks // *J. Am. Chem. Soc.* – 2017. – V. 139. – P. 8212–8221.
19. Lin J., Jin H., Ge X., Yang Y., Huang G., Wang J., Li F., Li H., Wang S. Investigation of the parameters of carbon nanotube growth on zirconium diboride supported Ni catalyst via CVD // *Diamond and Related Materials*. – 2021. – V. 115. – P. 108347.
20. Roy A., Das D. Synthesis of single-walled, bamboo-shaped and Y-junction carbon nanotubes using microwave plasma CVD on low-temperature and chemically processed catalysts // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2021. – V. 152. – P. 109971.
21. Lu S., Ma L., Shen X., Tong H. One-step copper-catalyzed synthesis of porous carbon nanotubes for high-performance supercapacitors // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2021. – V. 310. – P. 110670.
22. Pérez-Rodríguez S., Alegre C., Sebastián D., Lázaro M. J. Emerging Carbon Materials for Catalysis Chapter 10: Emerging carbon nanostructures in electrochemical processes / Editor(s) Samahe Sadjadi. – Elsevier, 2021. – P. 353–388.
23. Niu C., Sichel E. K., Hoch R., Moy D., Tennet H. High power electrochemical capacitors based on carbon nanotube electrodes // *Appl. Phys. Lett.* – 1997. – V. 70. – P. 1480–1482.
24. Frackowiak E., Bèguin F. Electrochemical storage of energy in carbon nanotubes and nanostructured carbons // *Carbon*. – 2002. – V. 40, Is. 10. – P. 1775–1787.

25. Попова О. В., Сербиновский А. М., Шуракова А. М. Бисульфат графита и терморасширенный графит из гидролизного лигнина // Электрохимическая энергетика. – 2010. – Т. 10, № 1. – С. 43–47.

26. Kumar S., Bhauriyal P., Pathak B. Computational Insights into the Working Mechanism of the LiPF_6 - Graphite Dual-Ion Battery // J. Phys. Chem. C. – 2019. – N 123. – P. 23863–23871.

27. Колотыркин Я. М. Электрохимия металлов в неводных растворах. – М.: Мир, 1974. – С. 65.

УДК 621.791.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АКТИВИРОВАННОЙ ПАЙКИ МЕТАЛЛА СО СТЕКЛОМ

А. Ф. ВАСИЛЬЕВ¹, Е. Л. ГЮЛИХАНДАНОВ², д-р техн. наук, В. Н. КЛИМОВ¹, А. М. МАКАРОВ¹,
Е. А. САМОДЕЛКИН¹, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ¹, канд. техн. наук

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 19.08.2021

После доработки 1.09.2021

Принята к публикации 3.09.2021

Приведены результаты исследований по разработке технологии пайки композиции металл – стекло с использованием активированной пайки аморфными припоями.

Ключевые слова: аморфные припои, активированная пайка, жидкая и твердая фазы, релаксация энергии, пара металл – стекло, межфазное натяжение

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-109-1-77-82

ЛИТЕРАТУРА

1. Лашко С. В. Технология пайки изделий в машиностроении // Справочник проектировщика. – М.: Машиностроение, 1993. – 274 с.

2. Глезер А. М., Пермякова И. Е. Нанокристаллы, закаленные из расплава.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.

3. Марголин В. И., Жабрев В. А., Лукьянов Г. Н., Тупик В. А. Введение в нанотехнологию. Учебник. – СПб.: Лань, 2012.– 464 с.

4. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю. Исследование адгезионной прочности композиционных армированных покрытий системы металл – неметалл, полученных методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 103–117.

5. Максимова С. В. Аморфные припои для пайки нержавеющей стали и титана и структура паяных соединений // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 2007. – Вып. 40. – С. 70–81.

6. Калинин Б. А., Григорьев А. Е. Аморфные ленточные припои для высокотемпературной пайки. Опыт разработки технологии производства и применения // Сварочное производство. – 1996. – № 1. – С. 15–19.

7. Патент РФ №2573309 от 08.07.2014. Способ получения композиционного армированного порошкового материала / Бобкова Т. И., Черныш А. А., Елисеев А. А., Деев А. А., Климов В. Н., Самоделкин Е. А.; Опубликовано 20.01.2016 // Бюл. № 2.

8. Геращенко Д. А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом холодного газодинамического напыления на основе армированных порошков системы $\text{Al-Sn+Al}_2\text{O}_3$ // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2015.

9. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Отв. ред. Ж. И. Алферов, О. В. Белый, Г. В. Двас, Е. А. Иванова. – СПб.: Изд-во ИП Пермяков С. А., 2015. – 543 с.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИБОРИДА ТИТАНА С ПОМОЩЬЮ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Т. И. БОБКОВА¹, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ¹, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ¹,
Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ¹, канд. техн. наук, А. М. МАКАРОВ¹, Е. Л. ГЮЛИХАНДАНОВ², д-р техн. наук,
М. Е. ГОШКОДЕРЯ¹, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ¹, канд. техн. наук

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 19.08.2021

После доработки 30.09.2021

Принята к публикации 7.10.2021

Приведены результаты исследования композиции на основе диборида титана TiB₂. Методом магнетронного напыления получены функционально-градиентные покрытия с высокой микротвердостью (28–32 ГПа) и коррозионной стойкостью в синтетической морской воде, щелочи (NaOH) и кислоте (HCl), предназначенные для защиты изделий прецизионного машино- и приборостроения.

Ключевые слова: диборид титана, магнетронное напыление, функционально-градиентные покрытия, прецизионное машиностроение

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-83-88

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Отв. ред. Ж. И. Алферов и др. – СПб.: Изд-во ИП Пермяков С. А., 2015. – 543 с.
2. Горынин И. В., Бурханов Г. С., Фармаковский Б. В. Наноструктурированные покрытия на основе тугоплавких металлов и их соединений // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2 (70). – С. 5–15.
3. Бурханов Г. С., Бурханов Ю. С. Современные подходы к созданию функциональных материалов // Материаловедение. – 2008. – № 3. – С. 184–190.
4. Урбанович В. С., Копылов А. В. Физико-механические свойства порошка диборида титана, спеченного под высоким давлением // Физика и техника высоких давлений. – 2011. – Т. 21, № 4. – С. 77–84.
5. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. – М.: БИНОМ Лаборатория знаний, 2007 – 134 с.
6. Физико-химические процессы синтеза наноразмерных объектов // Жабрев В. А. и др. – СПб.: Элмор, 2012. – 327 с.
7. Быстров Р. Ю., Беляков А. Н., Васильев А. Ф., Прудников И. С. Васильев А. Ф., Прудников И. С., Фармаковский Б. В. Сплав на основе алюминиево-магниево-титановой системы для разработки мишени магнетронного напыления тонких пленок // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 4 (104). – С. 109–112.
8. Кузнецов Н. Т., Новоторцев В. М., Жабрев В. А., Марголин В. И. Основы нанотехнологий: Учебник. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2014. – 397 с.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ V–Ti–Cr–TiC

Т. И. БОБКОВА¹, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ¹, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ,
Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ¹, канд. техн. наук, М. Е. ГОШКОДЕРЯ¹,
В. И. МАРГОЛИН² д-р техн. наук, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ¹ канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 19.10.2021

После доработки 8.11.2021

Принята к публикации 10.11.2021

Приведены результаты исследования сплавов системы V–Ti–Cr–TiC для получения композиционных наноструктурированных покрытий с помощью метода магнетронного напыления. Покрытие имеет высокие показатели микротвердости и стойкости к износу.

Ключевые слова: нанокompозитные материалы, композиционные покрытия, магнетронное напыление, микротвердость, модуль упругости, коэффициент трения, интенсивность изнашивания

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-89-95

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыров А. Г. Нанотехнологии и наноматериалы. Роль неравновесных процессов: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. – 194 с.
2. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий / А. Д. Погребняк, А. П. Шпак и др. // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179, № 1. – С. 35–64.
3. Бобкова Т. И., Фармаковский Б. В., Богданов С. П. Создание композиционных наноструктурированных поверхностно-армированных порошковых материалов на основе систем Ti/WC и Ti/TiCN для напыления покрытий повышенной твердости // Вопросы материаловедения. – 2015. – №3(83). – С. 80–99.
4. Целуйкин В. Н. Композиционные покрытия, модифицированные наночастицами: структура и свойства // Российские нанотехнологии. – 2014. – Т. 9, № 1–2. – С. 25–35.
5. Горынин И. В., Бурханов Г. С., Фармаковский Б. В. Наноструктурированные покрытия на основе тугоплавких металлов и их соединений // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2(70). – С. 5–15.
6. Оптимизация легирования сплавов системы V – Ti – Cr / И. Е. Люблинский и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2005. – Вып. 3. – С. 70–78.
7. Кардашев Б. К., Чернов В. М. Внутреннее трение, пластические свойства и ударная вязкость сплавов V – Ti – Cr // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, вып. 5. – С. 820–825.
8. Быстров Р. Ю., Беляков А. Н., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А., Геращенко Е. Ю., Барковская Е. Н., Коркина М. А., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. Получение композиционного катода для магнетронного напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 1(93). – С. 76–81.
9. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2017.
10. Климов В. Н., Ковалева А. А., Бобкова Т. И., Деев А. А., Черныш А. А., Юрков М. А. Структура и свойства функционального бронзового покрытия, полученного газодинамическим и микроплазменным напылением // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 2(86). – С. 57–68.
11. Соколова Н. А., Бобкова Т. И., Геращенко Е. Ю., Фармаковский Б. В., Юрков М. А. Изучение структуры и свойств наплавленного износостойкого слоя на основе порошка системы Fe–Ni, армированного нанопорошком WC // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2 (90). – С. 136–145.
12. Ешметьева Е. Н., Шолкина М. Н., Фармаковская А. Я., Быстров Р. Ю. Магнетронное напыление функционально-градиентных износостойких наноструктурированных покрытий // Материалы II международной заочной конференции «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве. Орск. «Изд-во Орского гуманитарно-технологического института», 2013. – 187 с.
13. Кирюханцев-Корнеев Ф. В., Швейко А. Н., Левашов Е. А., Штанский Д. В. Перспективные наноструктурные покрытия для машиностроения // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 2(54). – С. 187–201.

14. Геращенко Д. А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом «холодного» газодинамического напыления на основе армированных порошков системы Al – Sn+Al₂O₃ // Автореф. дис. ... канд. техн. наук, СПб., 2015.

15. Марголин В. И., Потапов А. А., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Развитие технологии на основе нанокompозитов. – СПб.: Изд-во СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 190 с.

УДК 621.793.7:539.538

**ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ HfB₂-Si₃N₄
С ВЫСОКОЙ СТОЙКОСТЬЮ К ИЗНОСУ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ
СВЕРХЗВУКОВОГО ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ,
Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, М. Е. ГОШКОДЕРЯ, А. М. МАКАРОВ,
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 19.10.2021

После доработки 5.11.2021

Принята к публикации 10.11.2021

Приведены результаты комплексных исследований функционально-градиентных покрытий на основе композиций HfB₂-Si₃N₄-Zr, полученных с использованием технологии сверхзвукового холодного газодинамического напыления. Приводятся данные об адгезионной прочности (до 62 МПа), микротвердости (до 42 ГПа) и стойкости к износу (до 1,2·10⁻⁹ мм/км) полученных покрытий.

Ключевые слова: диборид гафния, адгезионная прочность, микротвердость, стойкость к износу, сверхзвуковое холодное газодинамическое напыление, функционально-градиентное покрытие

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-96-100

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриевский Р. А. Нанокompозиты на основе тугоплавких соединений: состояние разработок и перспективы // *Материаловедение*. – 2006. – №4 (109). – С. 20–27.

2. Андреев А. А., Шулаев В. М., Григорьев С. Н. Технологические особенности получения композиционных наноструктурированных покрытий вакуумно-плазменными методами // *Технология машиностроения*. – 2005. – № 7. – С. 47–52.

3. Шулаев В. М. Высоко- и сверхтвердые наноматериалы на основе тугоплавких соединений // XII Международная Научно-техническая конференция «Высокие технологии в промышленности России», 2006. – С. 460–466.

4. Гусев А. И., Рампель А. А. Нанокристаллические материалы. – М.: Физматлит, 2001. – 362 с.

5. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Машек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // *Вопросы материаловедения*. – 2014. – № 2(77). – С. 87–96.

6. Геращенко Д. А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом холодного газодинамического напыления на основе армированных порошков системы Al-Sn+Al₂O₃ // Автореф. дис. канд. техн. наук. – СПб., 2015.

7. Перспективные направления развития науки в Петербурге // Под редакцией Ж.И. Алферова и др. – СПб.: Изд-во И.П. Пермяков С.А., 2015. – 543 с.

8. Марголин В. И., Потапов А. А., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Развитие нанотехнологий на основе нанокompозитов. – СПб.: Изд-во СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 190 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИСХОДНОГО ПОРОШКА
НА МИКРОРЕЛЬЕФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СПЛАВА ЖС6К, ПОЛУЧЕННОГО
МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

А. Н. РАЕВСКИХ, Е. Б. ЧАБИНА, канд. техн. наук, Е. В. ФИЛОНОВА

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: admin@viam.ru

Поступила в редакцию 9.12.2021

После доработки 24.12.2021

Принята к публикации 30.12.2021

Проведен анализ внешнего вида гранул сплава ЖС6К, их поверхности, внутреннего строения, а также химического состава по объему и по структурным элементам. Показана возможность управления формированием заданного состояния поверхностей раздела (треков, ячеек кристаллизации, границ блоков штриховки, зерен, фаз, несплошностей – пор и трещин) через фракционный состав, плотность упаковки при насыпке, скорость сканирования для получения наиболее качественного материала. Изучено исходное состояние структуры образцов. Установлено наличие связи между строением границ ячеек кристаллизации, дисперсными частицами и строением фрагментов. Показано, что все изученные образцы имеют разную структуру при одинаковой мощности и стратегии сканирования. Анализ проводили методами оптической металлографии и методом сканирующей (растровой) электронной микроскопии (РЭМ).

Ключевые слова: ЖС6К, селективное лазерное сплавление, РЭМ, поверхности раздела, концентрационные неоднородности, γ' -фаза, анализ изображений, фазовый микрорельеф, структурные преобразования

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-101-119

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. 2015. – № 2 (11). – С. 52–55.
2. Каблов Е. Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // Металлы Евразии. – 2017. – № 1. – С. 2–6.
3. Каблов Е. Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. – М.: ВИАМ, 2015. – С. 458–464.
4. Gu D., Meiners D. W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms // International materials reviews. – 2012. – V. 57, № 3. – P. 133–164.
5. Thornton A., Saad J., Clayton J. Measuring the critical attributes of AM powders // Metal Powder Report. – V. 74, Is. 6. – 2019. – P. 314–319. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.01.006>.
6. Калинина Н. Е., Калинин В. Т., Грекова М. В., Мамчур С. И., Носова Т. В. Механические и коррозионные свойства многокомпонентных сплавов, модифицированных дисперсными композициями // Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения. – 2018. – С. 146–150.
7. Чабина Е. Б., Филонова Е. В., Раевских А. Н., Цветкова Е. В. Зависимость дефектности структуры жаропрочного никелевого сплава от технологических параметров селективного лазерного сплавления // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2018. – № 6(756). – С. 23–41.
8. Евгенов А. Г., Неруш С. В., Василенко С. А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2014. – № 5. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.10.2017 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4
9. Евгенов А. Г., Щербаков С. И., Роголев А. М. Опробование порошков жаропрочных сплавов ЭП718 и ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» для ремонта деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – № S1. – С. 16–23. DOI 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-16-23.

10. Физико-химический фазовый анализ сталей и сплавов / Н. Ф. Лашко, Л. В. Заславская, М. Н. Козлова и др. – М.: Металлургия, 1978. – С. 336.
11. Беттеридж У. Жаропрочные сплавы типа нимоник. – М.: Металлургиздат, 1961. – 381 с.
12. Thijs L., Verhaeghe F., Craeghs T., Humbeeck J. V., Kruth J. P. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V // *Acta Materialia*. – 2010. – V. 58. – P. 3303–3312.
13. Prashanth K. G., Scudino S., Maity T., Das J., Eckert J. Is the energy density a reliable parameter for materials synthesis by selective laser melting? // *Materials Research Letters*. – 2017. – V. 5, N 6. – P. 386–390. DOI: 10.1080/21663831.2017.1299808.
14. Li R., Liu J., Shi Y., Wang L., Jiang W. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – V. 59. – P.1025–1035.
15. Сухов Д. И., Мазалов П. Б., Неруш С. В., Ходырев Н. А. Влияние параметров селективного лазерного сплавления на образование пористости в синтезированном материале коррозионно-стойкой стали // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2017. – № 8. – С. 4–8. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-4-4.
16. Terhaar J., Poppenhäger J., Bokelmann D., Schafstall H., Kelkar K. 7th international symposium on superalloys 718 and derivatives TMS the minerals, metals and materials society “Considering the solidification structure of var ingots in the numerical simulation of the cogging process”. *Superalloys 2010*. – P. 65–77. DOI: 10.7449/2010/Superalloys_2010_65_77.
17. Cole V. J., Northrop P. W. C., Tan X. G., Chou K., Wang X. Q., Keya T. High-Fidelity Modeling and Materials Characterization of Inconel 718 Component Fabrication by Selective Laser Melting Additive Manufacturing. – 2016 JANNAF TIM – Additive Manufacturing, August 23–25, 2016. – P. 1–24. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=201600120802020-07-04T16:36:45+00:00Z> (дата обращения 04.07.2020 г.).
18. Лаптева М. А., Белова Н. А., Раевских А. Н., Филонова Е. В. Исследование зависимости шероховатости, морфологии поверхности и количества дефектов структуры от мощности лазера, скорости сканирования и типа штриховки в жаропрочном сплаве, синтезированном методом СЛС // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2016. – № 9. Ст. 9 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 17.02.2021 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-9-9.
19. Цивильский И. В., Гильмутдинов А. Х., Хамидуллин Б. А., Никифоров С. А., Рубля Р. С. Математическое моделирование динамики и фазовых переходов в порошковых материалах в процессе аддитивного производства // *Материалы XII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых превращений при создании материалов нового поколения»*, Москва, 2020, ФГУП «ВИАМ». – М.: ВИАМ, 2020. – С. 172–186.
20. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б., Толорайя В. Н., Гаврилин О. С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
21. Маркович О. В., Орехов Н. Г., Разумовский И. М. Диффузионная проницаемость и структурное состояние внутренних поверхностей раздела в монокристаллах жаропрочного никелевого сплава // *Физика металлов и металловедение*. – 1994. – Т. 8, № 2. – С. 1–15. <https://viam.ru/sites/default/files/scipub/1993/1993-201486.pdf> (дата обращения: 22.03.2021 г.).
22. Евгенов А. Г., Лукина Е. А., Королев В. А. Особенности процесса селективного лазерного синтеза применительно к литейным сплавам на основе никеля и интерметаллида Ni₃Al // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн.* – 2016. – № 5 (23). – Ст. 3–1. URL: <http://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/219.pdf> (дата обращения 07.02.2022).
23. Раевских А. Н., Чабина Е. Б., Филонова Е. В., Белова Н. А. Возможности метода дифракции обратноотраженных электронов (ДОЭ/EBSD) для исследования особенностей структуры никелевых жаропрочных сплавов, полученных селективным лазерным сплавлением // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2017. – № 12 (60). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.03.2021 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-12-12.
24. Gockel J., Beuth J. Understanding Ti-6Al-4V Microstructure Control in Additive Manufacturing via Process Maps // *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, TX. 2013. – P. 666–

674. URL: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/2013/2013-53-Gockel.pdf> (reference date 07/02/2022).

25. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1. – С. 3–33. DOI 10.18577/2071–9140–2015–0–1–3–33.

УДК 621.793.7

КОМПОЗИЦИОННЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОРОШКИ СИСТЕМЫ НИТИНОЛ – ZrC ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ С ВЫСОКИМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Т. И. БОБКОВА¹, канд. техн. наук, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ¹, канд. техн. наук, М. Е. ГОШКОДЕРЯ¹, А. М. МАКАРОВ¹, В. И. МАРГОЛИН² д-р техн. наук, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ¹ канд. техн. наук

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

² ФГАОУ ВО «СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» 197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, д. 5, E-mail: info@etu.ru

Поступила в редакцию 27.12.2021

После доработки 12.01.2022

Принята к публикации 19.01.2022

Приведены результаты исследования по получению композиционных наноструктурированных порошков системы нитинол – ZrC и функциональных покрытий на их основе с высокими эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: композит, наноструктура, порошковый материал, нитинол, функциональное покрытие, адгезия, микротвердость, пористость, износостойкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-120-125

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурханов Г. С. Конструкционные материалы на основе редких металлов // *Металлы*. – 2001. – № 5. – С. 57–61.

2. Сырков А. Г. Нанотехнологии и наноматериалы. Роль неравновесных процессов: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. – 194 с.

3. Гусев А. И., Рампель А. А. Нанокристаллические материалы. – М.: Физматлит, 2001. – 362 с.

4. Марголин В. И., Жабрев В. А., Лукьянов Г. Н., Тупик В. А. Введение в нанотехнологию: Учебник. – СПб.: Лань, 2012. – 448 с.

5. Патент РФ №2460815, С22с1/04, В22F9/04, В22 F1/02, 22.09.2010// М.А. Коркина, Е.А. Самоделкин, Б.В. Фармаковский, Е.Ю. Бурканова, П.А. Кузнецов. Способ получения композиционного порошкового материала системы металл – керамика износостойкого класса.

6. Бобкова Т. И., Фармаковский Б. В., Богданов С. П. Создание композиционных наноструктурированных поверхностно-армированных порошковых материалов на основе систем Ti/Wc и Ti/TiCn для напыления покрытий повышенной твердости // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – №3(83). – С. 80–99.

7. Жабрев В. А., Калинин В. Г., Марголин В. И., Николаев А. И., Тупик В. А. Физико-химические процессы синтеза наноразмерных объектов. – СПб.: Изд-во «Элмор», 2012. – 328 с.

8. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017.

9. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Перспективные исследования и разработки Научного нанотехнологического центра ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в области новых наноматериалов // *Вопросы материаловедения*. – 2014. – № 2 (78) – С. 118–128.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОМПОЗИТА В СРАВНЕНИИ С ИСХОДНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ

ЛИ СЯНЬШУНЬ¹, Е. Б. СЕДАКОВА², д-р техн. наук

¹ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

² ФГБУН «Институт проблем машиноведения РАН», Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61.
E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.11.2021

После доработки 10.01.2022

Принята к публикации 11.01.2022

Проведено исследование влияния введения наполнителя на механические свойства политетрафторэтилена (ПТФЭ) с помощью метода молекулярно-динамического моделирования. Построены молекулярные модели ПТФЭ и композита Ф4К20 на его основе, состоящего из 80 об. % ПТФЭ + 20 об. % литейного кокса. Определена энергия межмолекулярного взаимодействия, получены матрицы жесткости и гибкости ПТФЭ и Ф4К20. Показано, что энергия междумолекулярного взаимодействия Ф4К20 приблизительно в 15 раз выше, чем энергия междумолекулярного взаимодействия ПТФЭ. Расчет на основе моделирования показал, что введение наполнителя приводит к существенному повышению модуля сдвига композита по сравнению с исходной матрицей, что может являться одной из причин повышения износостойкости полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: полимер, политетрафторэтилен, композит, метод молекулярно-динамического моделирования, трение, износ, энергия межмолекулярного взаимодействия, модуль сдвига

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-106-2-126-133

ЛИТЕРАТУРА

1. Седакова Е. Б., Козырев Ю. П., Ли Сяньшунь, Жаров В. Е. Анализ причин снижения износостойкости полимерных материалов в парах трения с легированной сталью // Изв. вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 4. – С. 302–309.
2. Bhargava S., Makowiec M. E., Blanchet T. A. Wear Reduction Mechanisms within Highly Wear-Resistant Graphene and Other Carbon-Filled PTFE Nanocomposites // *Wear*. – 2020. – V. 444. – P. 203163.
3. Liu H., Su X., Tao J., Fu R., You C., Chen X. Effect of SiO₂ Nanoparticles Decorated SCF Mechanical and Tribological Properties of Cenosphere/SCF/PEEK Composites // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2019. – V. 137. – P. 48749.
4. Vasilev A. P., Struchkova T. S., Nikiforov L. A., Okhlopkova A. A., Grakovich P. N., Shim E. L., Cho J. H. Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Composites with Carbon Fiber and Layered Silicate Fillers // *Molecules*. – 2019. – V. 24, N. 2. – P. 224.
5. Слепцова С. А., Лазарева Н. Н., Федосеева В. И., Капитонова Ю. В., Охлопкова А. А. Влияние катионов металлов механоактивированного бентонита на триботехнические процессы в ПТФЭ // *Трение и износ*. – 2018. – Т. 39, N. 6. – С. 604–611.
6. Narayanasamy P., Balasundar P., Senthil S., Sanjay M. R., Siengchin S., Khan A., Asiri A. M. Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Calotropis gigantea* fruit bunch for ecofriendly polymer composites // *Int. J. Biol. Macromol.* – 2020. – V. 150. – P. 793–801.
7. Sihn S., Varshney V., Roy A. K., Farmer B. L. Prediction of 3d elastic moduli and poission's ratios of pillared graphene nanostructures // *Carbon*. – 2012. – V. 50(2). – P. 603–611.
8. Zhang J., Zhou Z., Zhang F., Tan Y.G., Yi R. Molding process and properties of continuous carbon fiber three-dimensional printing. *Advances in Mechanical Engineering*. – 2019. – V. 11(3). – P. 1–11.

9. Wang H., Xie X., Hua X., Xu S., Yin B., Qiu B. Analysis of the lubrication process with composition of solid lubricants of laser-modified sliding surfaces // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2020. – V. 12(4). – P. 1–11.
10. Васильев А. П., Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Алексеев А. Г. Влияние модифицированного серицита на свойства и структуру политетрафторэтилена // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 147–156.
11. Маркова М. А., Петрова П. Н. Исследование влияния углеродных волокон и технологий получения композитов на свойства полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена // *Перспективные материалы*. – 2020. – № 11. – С. 59–68.
12. Rigby D., Sun H., Eichinger B. E. Computer Simulations of Poly (ethylene oxide): Force Field, PVT Diagram and Cyclization Behaviour // *Polymer International*. – 1997. – V. 44. – P. 311–330.
13. Sun H., Jin Z., Yang C., Akkermans R. L. C., Robertson S. H., Spenley N. A., Miller S., Todd S. M. COMPASSII: extended coverage for polymer and drug-like molecule databases // *Journal of Molecular Modeling*. – 2016. – V. 22. – P. 1–10.
14. Allen M. P., Tildesley D. J. *Computer Simulation of Liquids*, Oxford, Oxford University Press, 1990.
15. Zuo Z., Yang Y., Qi X., Su W., Yang X. Analysis of the chemical composition of the PTFE transfer film produced by sliding against Q235 carbon steel // *Wear*. – 2014. – V. 320. – P. 87–93.
16. Nye, J. F. *Physical Properties of Crystals*, Clarendon: Oxford (1957)
17. Ли Сяньшунь, Седакова Е.Б. Применение метода молекулярно-динамического моделирования для исследования структурных изменений при адгезионном изнашивании политетрафторэтилена и его композита // *Материалы 10-й Международной научной онлайн-конференции «Современное машиностроение: наука и образование 2021 (ММЕСЕ-2021)», 24 июня 2021 года / Под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – С. 287–299.*

УДК 678.067:621.793.184

ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ АРМИРУЮЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА КОМПЛЕКС СВОЙСТВ ПКМ

Е. Д. КОЛПАЧКОВ¹, канд. техн. наук, П. А. ЩУР², Е. В. КУРШЕВ¹,
И. Ю. ЧЕРНЯЕВА², канд. техн. наук, А.В. ШВЕДОВ²

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17,
E-mail: admin@viam.ru

² ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Поступила в редакцию 12.01.2022

После доработки 28.02.2022

Принята к публикации 17.03.2022

Приведены результаты исследования образцов стеклоуглепластиков на основе армирующих наполнителей, подвергнутых ионно-плазменной обработке. Показано влияние скорости обработки поверхности наполнителей на комплекс физико-механических характеристик стеклоуглепластиков. По результатам микроструктурных исследований установлено, что ионно-плазменная обработка способствует межфазному взаимодействию на границе волокно/матрица. Показано влияние ионно-плазменной обработки армирующих наполнителей на свойства образцов ПКМ во влагонасыщенном состоянии.

Ключевые слова: ионно-плазменная обработка в вакууме, ионно-плазменная обработка в атмосфере, стеклоуглепластик, прочностные характеристики, влагопоглощение

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-134-146

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Панин С. В. Влагоперенос в углепластике с деструктурированной поверхностью // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 461, № 4. – С.433–436.
2. Каблов Е. Н., Валуева М. И., Зеленина И. В., Хмельницкий В. В., Алексахин В. М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2020. – № 1 (85). – С. 68–77. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 22.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
3. Каблов Е. Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Т.4. – СПб.: 2019. – С. 24.
4. Колпачков Е. Д., Мараховский П. С., Петрова А. П., Щур П. А., Лонский С. Л., Черняева И. Ю., Шведов А. В. Исследование влияния ионно-плазменной обработки на свойства поверхности армирующих наполнителей // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 3 (107). – С. 136–149.
5. Тихомиров А. С., Сорокина Н. Е., Авдеев В. В. Модифицирование поверхности углеродного волокна растворами азотной кислоты // Неорганические материалы. – 2011. – Т. 47, № 6. – С. 684–688.
6. Li J., Sun F. F. The effect of nitric acid oxidization treatment on the interface of carbon fiber-reinforced thermoplastic polystyrene composite // Polym.-Plast. Technol. and Eng. – 2009. – V. 48, N 7. – P. 711–715.
7. Vazquez-Santos M. B., Suarez-Garcia F. Activated Carbon fibers with a high heteroatom content by chemical activation of PBO with phosphoric acid // Langmuir. – 2012. – V. 13. – P. 5850–5860.
8. Fu R., Liu L., Huang W. Studies on the structure of activated carbon fibers activated by phosphoric acid // J. Appl. Polym. Sci. – 2003. – V. 87. – P. 2253–2261.
9. Pradhan, B.K., Sandle N.K. Effect of different oxidizing agent treatments on the surface properties of activated carbons // Carbon. – 1999. – V. 37. – P. 1323–1332.
10. Suarez-Garcia F., Castro-Muniz A., Tascon J. M. D. Activated carbon fibers with a high content of surface functional groups by phosphoric acid activation of PPTA // J. Colloid. Interface Sci. – 2011. – V. 361. – P. 307–315.
11. Jones C. Effects of electrochemical and plasma treatments on carbon-fibersurfaces // Surf. An-dinterfaceanal. – 1993. – V. 20. – P. 357–367.
12. Szazdi L., Gulyas J., Pukanszky B. Electrochemical oxidation of carbon fibers: adsorption of the electrolyte and its effect on interfacial adhesion // Compos. Part A. – 2002. – V. 33. – P. 1361–1365.
13. Бейдер Э. Я., Петрова Г. Н., Изотова Т. Ф. Влияние аппретов на свойства термопластичных стеклопластиков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2014. – № 9. Ст.07 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 22.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-7-7.
14. Бейдер Э. Я., Петрова Г. Н., Дыкун М. И. Аппретирование углеродных волокон-наполнителей термопластичных карбопластиков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2014. – № 10. Ст.03 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 22.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-3-3.
15. Петрова Г. Н., Бейдер Э. Я. Разработка и исследование аппретирующих составов для термопластичных углепластиков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 12. Ст.09 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 22.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-9-9.
16. Начаркина А. В., Зеленина И. В., Валуева М. И., Воронина О. Г. Влияние аппретирования углеродного волокна при получении объемно-армированных преформ на свойства высокотемпературного углепластика // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2021. – № 1. Ст.06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 22.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-54-65.
17. Петрова Г. Н., Бейдер Э. Я. Разработка и исследование аппретирующих составов для термопластичных углепластиков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 12. Ст.09 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 17.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-9-9.

СВОЙСТВА СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ ОГНЕСТОЙКИХ ПОЛИЭФИРНЫХ СМОЛ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА МАРОК АРКПОЛ 40 М И ПОЛИМЕР 3088 ТА

В. С. ТРЯСУНОВ, канд. техн. наук, Е. Л. ШУЛЬЦЕВА; А. М. БАГАНИК, Ю. В. ПОЛЯКОВА

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

Поступила в редакцию 25.01.2022

После доработки 18.02.2022

Принята к публикации 21.02.2022

Представлены результаты технологических, физико-механических и испытаний на огнестойкость полиэфирных смол, связующих и стеклопластиков на их основе, изготовленных методом контактного формования. Выполнено сравнение с применяемыми в настоящее время в кораблестроении стеклопластиковыми.

Ключевые слова: стеклопластик, полиэфирная смола, контактное формование, горючесть, кораблестроение

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-147-156

ЛИТЕРАТУРА

1. Назначение деятельности судостроительной промышленности. Морская политика России – Судостроение России / Морское информационное агентство. – 2021. – № 35. – С.30–32.
2. Апполонов Е. М., Федонюк Н. Н., Шапошников В. М. Полимерные композиционные материалы. Инновации в промышленности // Инновации. – 2013. – № 11 (18). – С. 18–20.
3. Горев Ю. А., Ривкинд В. Н. Композиционные материалы на основе полиэфирных смол для судовых корпусных конструкций // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2009. – т. LIII. – № 4. – С. 19–34.
4. Булкин В. А., Голубев К. Г., Федонюк Н. Н. Опыт эксплуатации надстройки из полимерных композиционных материалов на корабле класса «Корвет» // Морской вестник. – 2011. – № 1(37). – С.11–14.
5. Жуйков Ю. Г., Кушелев В. В., Лукьянов Н. П. Начало пластмассового судостроения // Вестник технологии судостроения. – 1997. – № 3. – С. 63–70.
6. Булкин В. А., Федонюк Н. Н., Шляхтенко А.В. Применение перспективных композиционных материалов в надводном судостроении // Морской вестник. – 2013. – № 1(45). – С.7–8.
7. Анисимов А. В., Трясунов В. С., Шульцева Е. Л., Мудрый Ф. В., Соколов Ю. В. Эпоксивинилэфирное связующее для огнестойких стеклопластиков судостроительного назначения // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 4 (92). – С. 120–128.
8. Трясунов В. С., Шульцева Е. Л., Баруев В. Е., Маханько А. В. К вопросу определения характеристик пожаробезопасности трехслойных полимерных композиционных материалов для судовых корпусных конструкций // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 1 (101). – С. 139–147.
9. Вешкин Е. А., Постнов В. И., Сатдинов Р. А. Углепластик с рабочей температурой до 200°С и инфузионная технология его изготовления // Вопросы оборонной техники. – Серия 15, вып. 2: Материалы. Технологии. Экспериментальные исследования, 2019. – С. 41–48.
10. Бабкин А. В. Высокотермостойкие фталонитрильные матрицы и полимерные композиционные материалы на их основе // Дис. ... канд. хим. наук 02.00.06. – М., 2016. – 143 с.
11. Кодолов В. И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. – М.: Химия, 1976. – С. 157–274.
12. Общая методология и теория кораблестроения. Кн. 1 / Под ред. В. Т. Томашевского, В. П. Пашина. – СПб.: Политехника, 2003. – 744 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ МОНТАЖНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ

Р. И. САМОЙЛЕНКО¹, М. Н. ТИМОФЕЕВ¹, канд. техн. наук, С. Н. ГАЛЯТКИН¹, канд. техн. наук,
Ю. М. МАРКОВА¹, Д. М. АНИСИМОВ¹, С. А. КОРОЛЕВ², канд. техн. наук,
С. В. ГУРКИН², канд. техн. наук

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

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет), 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

Поступила в редакцию 29.09.2021

После доработки 6.10.2021

Принята к публикации 7.10.2021

Методом математического моделирования определена скорость охлаждения зоны термического влияния при выполнении монтажных сварных соединений реакторных установок атомных ледоколов по предварительным наплавкам. С помощью закалочного-деформационного dilatометра произведено имитационное воздействие термических циклов на различных участках металла предварительной наплавки, выполненной сварочными материалами трех типов: углеродистыми, кремниймарганцовистыми и легированными никелем. Проведены исследования структуры и твердости образцов после имитационного воздействия термических циклов сварки. Установлено, что наплавленный металл при использовании углеродистой проволоки Св-06АА во всем рассматриваемом диапазоне скоростей охлаждения имеет ферритно-перлитную структуру. Кремниймарганцовистая сварочная проволока Св-08ГС в широком диапазоне скоростей охлаждения формирует структуру наплавленного металла в виде игольчатого феррита, в то время как легированная никелем проволока Св-10ГН – в виде игольчатого и квазиполигонального феррита.

Ключевые слова: моделирование термических циклов сварки, предварительная наплавка, игольчатый феррит, перлит, термокинетическая диаграмма

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-157-168

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (НП-104-18). – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2018. – 260 с.

2. Тимофеев М. Н., Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Литвинов С. Г., Александрин А. Г., Башулин Д. Л., Шубин О. В. Повышение служебных характеристик металла монтажных сварных соединений транспортных атомных энергетических установок из теплоустойчивых сталей. Часть 1: Технология сварки теплоустойчивых сталей углеродистыми сварочными материалами в условиях отсутствия термической обработки и опыт применения сварочных материалов // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 4 (92). – С. 131–139.

3. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Шубин О. В. Повышение служебных характеристик металла монтажных сварных соединений транспортных атомных энергетических установок из теплоустойчивых сталей. Часть 2. Исследование механических свойств металла «силовых» малоуглеродистых наплавов в зависимости от технологических параметров сварки // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 4 (92). – С. 140–148.

4. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Михалева Э. И. Повышение служебных характеристик металла монтажных сварных соединений транспортных атомных энергетических установок из теплоустойчивых сталей. Часть 3. Исследование влияния легирующих элементов в наплавленном металле на его характеристики применительно к выполнению «силовых» малоуглеродистых наплавов и монтажных сварных швов энергетических установок атомных ледоколов // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 4 (92). – С. 149–161.

5. Барахтин Б. К., Немец А. М. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения: Справочник. – СПб: НПО «Профессионал», 2006. – 490 с.

6. Программный комплекс ANSYS. URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения: 12.09.2021).
7. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
8. Кузнецов В. В., Водяков В. Н., Кузнецова О. М. Технология «рождения» и «смерти» конечных элементов ANSYS Inc. (США) // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. А. В. Котина и др. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 392–401.
9. Королев С. А., Зимаков А. Е. Компьютерное моделирование тепловых процессов при дуговой сварке толстостенных конструкций из алюминиевых сплавов. // Изв. вузов. Машиностроение. – 2020. – № 8. – С. 12–20.
10. Матросов М. Ю., Лясоцкий И. В., Кичкина А. А. и др. Особенности и классификация структур низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей // Сталь. – 2012. №1. С. 65–74.
11. Лебедева Н. В., Маркова Ю. М., Зиза А. И., Анисимов Д. М. Исследование микроструктуры сталей мартенсито-бейнитного класса и никелевых сплавов при моделировании режимов термообработки dilatометрическим методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов.– 2019. – Т. 85, № 6. – С. 30–36.

УДК 621.039.531:539.4:621.785.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОСТРАДИАЦИОННОГО ОТЖИГА НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-440.

Часть 1. Постановка задачи и результаты испытаний

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Е. В. ЮРЧЕНКО, канд. техн. наук,
А. М. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, А. Я. ВАРОВИН, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 18.11.2021

После доработки 13.01.2022

Принята к публикации 28.01.2022

Проведены экспериментальные исследования по влиянию температуры отжига на степень восстановления свойств материалов опорных конструкций корпусов реакторов ВВЭР-440 (малопрочная ферритно-перлитная сталь и ее металл шва), облученных при низкой температуре (50–90°C). Определены свойства материалов по результатам испытаний образцов на растяжение, ударный изгиб и вязкость разрушения. Получена зависимость степени восстановления от температуры отжига для материалов опорных конструкций корпусов реакторов ВВЭР-440 после низкотемпературного облучения. Выявлено неоднозначное влияние температуры отжига на степень восстановления свойств материалов опорных конструкций.

Ключевые слова: реактор ВВЭР-440, опорная конструкция, температура отжига, ферритно-перлитная сталь, низкотемпературное облучение, радиационное охрупчивание, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-169-183

ЛИТЕРАТУРА

1. Steel L. E., Hawthorne J. R. Neutrone-induced changes in notch ductility of reactor pressure vessel steels // Proc. Hot Laboratories Equipment Conf., 9th // Trans. ANS4. – 1961. – N 1. – P. 92–93.]
2. Хоуторн Дж. Р. Радиационное охрупчивание // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Под ред. К. Л. Брейента и С. К. Бенерджи / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1988. – С. 423–479.
3. Alekseenko N. N., Amaev A. D., Gorynin I. V., Nikolaev V. A. Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels // Am. Nucl. Soc. – La Grange Park, Illin., USA, 1997.
4. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Костылев В. И., Морозов А. М., Варовин А. Я., Рогожкин С. В., Никитин А. А. Особенности радиационного охрупчивания материалов опорных конструкций корпу-

сов реакторов типа ВВЭР. Часть 1. Экспериментальные исследования // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 2 (94). – С. 175–192.

5. Pachur D. Radiation annealing mechanisms of low-alloy reactor pressure vessel steels dependent on irradiation temperature and neutron fluence // Nuclear technology. – 1982. – V. 59, N 12. – P. 463.

6. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Fomenko V. N., Kostylev V. I. Further improvement of the Prometey model and unified curve method. Part 2. Improvement of the unified curve method // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – V. 191. – P. 383–402.

7. Embrittlement and fracture toughness of highly irradiated austenitic steels for vessel internals of WWER type reactors. Part 1. Relation between irradiation swelling and irradiation embrittlement. Experimental results / B. Z. Margolin, I. P. Kursevich, A. A. Sorokin et. al // Strength of Materials. – 2009. – V. 41. – P. 593–602.

8. Бабич В. К., Гуль Ю. П., Долженков И. Е. Деформационное старение стали. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.

9. Physical metallurgy. V. 3. / Ed. by R.W. Cahn and P. Haasen.– North Holland Physics Publishing, 1996.

10. ГОСТ Р Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Контроль радиационного охрупчивания корпуса реактора атомной станции. М.: Стандартинформ, 2018.

11. ASTM E 1921–02. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range // Annual Book of ASTM Standards. – 2002, V. 03.01. – P. 1068–1084.

12. Jones R., Williams T. The Dependence of Radiation Hardening and Embrittlement on Irradiation Temperature // ASTM STP1270-EB. Paper ID: STP16495S.

УДК 621.039.531:539.4:621.785.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОСТРАДИАЦИОННОГО ОТЖИГА НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-440. Часть 2. Анализ особенностей влияния отжига материала после низкотемпературного облучения

Б. З. МАРГОЛИН¹, д-р техн. наук, Е. В. ЮРЧЕНКО¹, канд. техн. наук,
А. М. МОРОЗОВ¹, канд. техн. наук, А. Я. ВАРОВИН¹, канд. техн. наук,
С. В. РОГОЖКИН², д-р физ.-мат. наук, А. А. НИКИТИН², канд. техн. наук

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

²НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, 117218, Москва, Большая Черемушкинская ул., д. 25

Поступила в редакцию 18.11.2021

После доработки 13.01.2022

Принята к публикации 28.01.2022

Проанализированы результаты исследования влияния температуры отжига на степень восстановления свойств материалов опорных конструкций корпусов реакторов ВВЭР-440 (малопрочная ферритно-перлитная сталь и металл шва из нее), облученных при низкой температуре (50–90°C). Выявлены основные процессы, которые протекают при отжиге материалов опорных конструкций корпусов после низкотемпературного облучения и приводят к неоднозначному влиянию температуры отжига на степень восстановления свойств материалов опорных конструкций. Рассмотрено влияние примесей (фосфора и меди) на охрупчивание материала в процессе облучения и на восстановление его свойств после отжига.

Ключевые слова: реактор ВВЭР-440, опорная конструкция, температура отжига, ферритно-перлитная сталь, низкотемпературное облучение, радиационное охрупчивание, механические свойства

ЛИТЕРАТУРА

1. Alekseenko N. N., Amaev A. D., Gorynin I. V., Nikolaev V. A. Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels. – Am. Nucl. Soc., La Grange Park, Illin., USA, 1997.
2. Pachur D. Radiation annealing mechanisms of low-alloy reactor pressure vessel steels dependent on irradiation temperature and neutron fluence // Nuclear technology. – 1982. – V. 59. – N 12. – P. 463.
3. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Костылев В. И., Морозов А. М., Варовин А. Я., Рогожкин С. В., Никитин А. А. Особенности радиационного охрупчивания материалов опорных конструкций корпусов реакторов типа ВВЭР. Часть 2. Анализ выполненных исследований // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 2 (94). – С. 193–208.
4. Шалаев А. М. Радиационно-стимулированная диффузия в металлах. – М.: Атомиздат, 1972. – С. 148.
5. Miller M.K., Pareige P., Burke M.G. Understanding Pressure Vessel Steels: An Atom Probe Perspective // Mater. Character. – 2000. – N 44. – P. 235.
6. Ahsby M. F. About the Orowan stress / A. Argon (Ed.) // Physics of Strength and Plasticity, MIT Press, Cambridge (MA), 1970.
7. Tan L., Busby J. T. Formulating the strength factor α for improved predictability of radiation hardening // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 465. – P. 724–730.
8. Lucas G. E., The evolution of mechanical property change in irradiated austenitic stainless steels // J. Nucl. Mater. – 1993. – V. 206. – P. 287–305.
9. Kudo, T., Kasada, R., Kimura, A., Hono, K., Fukuya, K., Matsui, H., Optical characteristics of aluminium coated fused silica core fibers under 14MeV fusion neutron irradiation // Mater. Trans. – 2004. – JIM 45. – P. 338–341.
10. Russell, K.C., Brown, L.M., A dispersion strengthening model based on differing elastic moduli applied to the iron-copper system // Acta Metallurgica. – 1972. – N 20 (7). – P. 969–974.
11. Fisher, S.B., Harbottle, J.E., Aldridge, N., Radiation hardening in magnox pressure-vessel steels, Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 1985. – V. 315, Is. 1532. – P. 301–332. DOI: 10.1098/rsta.1985.0042.
12. Wagner, A., Ulbricht, A., Bergner, F., Altstadt, E., Influence of the copper impurity level on the irradiation response of reactor pressure vessel steels investigated by SANS // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 2012. – V. 280. – P. 98–102.
13. Bergner F., Gillemot F., Hernández-Mayoral M., Serrano M., Török G., Ulbricht A., Altstadt E., Contributions of Cu-rich clusters, dislocation loops and nanovoids to the irradiation-induced hardening of Cu-bearing low-Ni reactor pressure vessel steels // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 461. – P. 37–44.
14. Lu Z., Faulkner R. G., Jones R. B., Flewitt P. E. J. Radiation- and thermally-induced phosphorus inter-granular segregation in pressure vessel steels // J. of ASTM Internat. – 2005. – V. 2, N 8. – P 180–194.
15. Nishiyama Y., Onizawa K., Suzuki M., Anderegg J. W., Nagai Y., Toyama T., Hasegawa M., Kameda J. Effects of neutron-irradiation-induced intergranular phosphorus segregation and hardening on embrittlement in reactor pressure vessel steels // Acta Materialia. – 2008. – V. 56. – P. 4510–4521.
16. Lechek P. Grain boundary segregation in metals. Springer series in materials science. – 2010. – 238 p.
17. Рыбин В. В., Николаев В. А. О механизмах, определяющих зависимость радиационного охрупчивания корпусной стали от ее химического состава // Вопросы материаловедения. – 1995. – № 1. – 27 с.
18. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Потапова В. А. К вопросу о моделировании теплового старения посредством нейтронного облучения и отжига // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3 (87). – С. 211–219.
19. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G. Radiation embrittlement modeling in multi-scale approach to brittle fracture of RPV steels // Int. J. of Fracture. – 2013. – V. 179, is. 1. – P. 87–108.

20. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Prometey local approach to brittle fracture: development and application // *Eng. Fracture Mech.* – 2008. – V. 75. – P. 3483–3498.
21. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Костылев В. И., Морозов А. М., Варовин А. Я., Рогожкин С. В., Никитин А. А. Особенности радиационного охрупчивания материалов опорных конструкций корпусов реакторов типа ВВЭР. Часть 1. Экспериментальные исследования // *Вопросы материаловедения.* – 2018. – № 2 (94). – С. 175–192.
22. Lidbury D., Bugat S., Diard O., Keim E., Marini B., Viehrig H-W., Wallin K. PERFECT— Prediction of Irradiation Damage Effects in Reactor Components: Update of Progress in RPV Mechanics Sub-Project // *Proceedings of PVP 2007, 2009, Art. 26076.* – P. 235–243. DOI: 10.1115/PVP2007-26076.
23. Утевский Л. М., Гликман Е. Э. Карк Г. С. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. – М.: Металлургия, 1987. – 222 с.
24. The modeling of irradiation-enhanced phosphorus segregation in neutron irradiated reactor pressure vessel submerged-arc welds / S. G. Druce, C. A. English, A. J. E. Foreman et al. – *ASTM STP 1270, 1996.* – P. 119–137.
25. Gurovich B., Kuleshova E., Shtrombakh Ya., Fedotova S., Zabusov O., Prikhodko K., Zhurko D. J. Evolution of weld metals nanostructure and properties under irradiation and recovery annealing of VVER-type reactors // *Nucl. Mater.* – 2013. – V.434. – P. 72–84.
26. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Пирогова Н. Е. Анализ эффекта флукса нейтронов применительно к радиационному охрупчиванию материалов корпусов реакторов ВВЭР // *Вопросы материаловедения.* – 2012. – № 2 (70). – С. 177–196.
27. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Чистяков Д. А. Новый метод прогнозирования теплового старения сталей корпусов реакторов типа ВВЭР // *Вопросы материаловедения.* – 2013. – № 3 (75). – С. 120–134.
28. Печенкин В. А. О сегрегации на границах зерен при облучении многокомпонентных сплавов // *Препринт ФЭИ-2788, Обнинск, 1999, 46 с.*
29. Pechenkin V. A. Stepanov I. A., Konobeev Yu. V. Modeling of phosphorus accumulation on grain boundaries in iron alloys under irradiation // *20th Int. Symp. "Effects of Radiation on Materials", ASTM STP 1405, 2001.* – P. 174–187.

ЛИТЕРАТУРА К ПРИЛОЖЕНИЮ

- П1. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Костылев В. И., Морозов А. М., Варовин А. Я., Рогожкин С. В., Никитин А. А. Особенности радиационного охрупчивания материалов опорных конструкций корпусов реакторов типа ВВЭР. Часть 2. Анализ выполненных исследований // *Вопросы материаловедения.* – 2018. – № 2(94). – С. 193–208.
- П2. Philippe T., Duguay S., Blavette D. Clustering and pair correlation function in atom probe tomography // *Ultramicroscopy.* – 2010. – V. 110, Is. 7. – P. 862–865.
- П3. Philippe T., Duguay S., Grancher G., Blavette D. Point process statistics in atom probe tomography // *Ultramicroscopy.* – 2013. – V. 132. – P. 114–120.
- П4. Jäggle, E., Choi, P., Raabe, D. The Maximum Separation Cluster Analysis Algorithm for Atom-Probe Tomography: Parameter Determination and Accuracy // *Microscopy and Microanalysis.* – 2014. – V. 20 (6). – P. 1662–1671.

УДК 621.039.54:669.296

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ ГИДРИДОВ В ОБЛУЧЕННЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБАХ ИЗ СПЛАВА Э110 В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО «СУХОГО» ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Р. А. КУРСКИЙ¹, А. В. РОЖКОВ¹, О. О. ЗАБУСОВ^{1,2}, канд. физ.-мат. наук,
Д. А. МАЛЬЦЕВ¹, канд. техн. наук, М. А. СКУНДИН¹, канд. техн. наук, А. П. БАНДУРА¹,
Е. А. ВАСИЛЬЕВА¹, А. А. ШИШКИН³

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

² Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31. E-mail: info@mephi.ru

³ Акционерное общество «ТВЭЛ», 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 49. E-mail: info@tvel.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021

После доработки 24.02.2022

Принята к публикации 16.03.2022

Проникновение атомарного водорода в материал оболочек твэлов реакторов ВВЭР-1000 при взаимодействии с теплоносителем в процессе эксплуатации впоследствии при снижении температуры в период длительного «сухого» хранения отработавшего ядерного топлива может заметно снизить характеристики их пластичности вследствие образования хрупких гидридов. Морфология гидридов, на которую оказывают влияние содержание водорода, температурный режим хранения и окружающие напряжения, играет определяющую роль в охрупчивании материала оболочек твэлов. Особую опасность представляют связанные радиально-направленные гидриды, которые могут служить путем распространения трещины.

В настоящей работе были проведены термомеханические испытания образцов облученных твэльных оболочек, изготовленных из сплава Э110, имитирующие штатные и аварийные условия длительного «сухого» хранения, которые показали, что при рассмотренных режимах наблюдается образование значительного количества радиально-ориентированных гидридов, приводящих к деградации механических свойств (охрупчиванию) оболочек твэлов.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, оболочки тепловыделяющих элементов, сплавы циркония, гидриды циркония, механические свойства, сухое хранение.

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-199-214

ЛИТЕРАТУРА

1. Alyokhina S. Thermal analysis of certain accident conditions of dry spent nuclear fuel storage // Nucl. Eng. Technol. – 2018. – V. 50, N 5. – P. 717–723.
2. Billone M. C., Burtseva T. A., Einziger R. E. Ductile-to-brittle transition temperature for high-burn up cladding alloys exposed to simulated drying-storage conditions // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 433, N 1–3. – P. 431–448.
3. Шмаков А., Калинин Б., Смирнов Е. Водород в сплавах циркония. Гидридное охрупчивание и разрушение циркониевых материалов. – Deutschland: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2014. – 188 с.
4. Min S. J., Kim M. S., Kim K. T. Coolingrate- and hydrogencontent-dependent hydride reorientation and mechanical property degradation of Zr–Nb alloy claddings // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 441, N 1–3. – P. 306–314.
5. Aomi M., Baba T., Miyashita T., Kamimura K., Yasuda T., Shinohara Y., Takeda T. Evaluation of hydride reorientation behavior and mechanical properties for high-burnup fuel-cladding tubes in interim dry storage // J. ASTM Int. – 2008. – V. 5, N 9. – P. 651–673.
6. Motta A. T., Capolungo L., Chen L. Q., Cinbiz M. N., Daymond M. R., Koss D. A., Lacroix E., Pastore G., Simon P. C. A., Tonks M. R., Wirth B. D., Zikry M. A. Hydrogen in zirconium alloys: a review // J. Nucl. Mater. – 2019. – V. 518. – P. 440–460.
7. Billone M. C., Burtseva T. A., Han Z., Liu Y. Y. Used fuel disposition campaign. Embrittlement and DBTT of high-burn up PWR fuel cladding alloys. FCRD-UFD-2013-000401. – Argonne National Laboratory, 2013.
8. Billone M. C., Burtseva T. A., Dobrzynski J. P., Mc Gann D. P., Byrne K., Han Z., Liu Y. Y. Used fuel disposition campaign phase 1. Ring compression testing of high-burnup cladding. FCRD-USED-2012-000039. – Argonne National Laboratory, 2011.

9. Desquines J., Drouan D., Billone M., Puls M. P., March P., Fourgeaud S., Getrey C., Elbaz V., Philippe M. Influence of temperature and hydrogen content on stress-induced radial hydride precipitation in Zircaloy-4 cladding // *J. Nucl. Mater.* – 2014. –V. 453, N 1–3. – P. 131–150.
10. Kamimura K. Integrity criteria of spent fuel for dry storage in Japan // *Int. Semin. Spent Fuel Storage.* – 2010.
11. Kurskiy R. A., Rozhkov A. V., Zabusov O. O., Gaiduchenko A. B., Bragin A. S., Maltsev D. A., Safonov D. V., Shishkin A. A. Factors Influencing Reorientation of Hydrides in Unirradiated Cladding Tubes from E110 Alloy under Conditions of Long-Term Dry Storage of SNF // *Physics of Atomic Nuclei.* – 2021. – V. 84, N 10. – P. 1665–1671.
12. Kurskii R. A., Safonov D. V., Rozhkov A. V., Zabusov O. O., Frolov A. S., Kuleshova E. A., Alekseeva E. V., Bragin A. S., Vasil'eva E. A., Gaiduchenko A. B., Mal'tsev D. A., Skundin M. A. Reorientation of hydrides in unirradiated clad tubes made of alloy E110 under conditions simulating long-term dry storage of spent nuclear fuel // *Physics of Metals and Metallography.* – 2021. – V. 122, N 9. – P. 924–932.
13. Lee J. M., Kim H. A., Kook D. H., Kim Y. S. A study on the effects of hydrogen content and peak temperature on thresh old stress for hydride reorientation in Zircaloy-4 cladding // *J. Nucl. Mater.* –2018. – V. 509. – P. 285–294.
14. Standard specification for wrought zirconium alloy seamless tubes for nuclear reactor fuel cladding, ASTM B811-02, ASTM International, West Conshohocken, PA. – 2007.
15. Yegorova L., Asmolov V., Abyshov G., Malofeev V., Avvakumov A., Kaplar E., Lioutov K., Sheshtopalov A., Bortash A., Maiorov L., Mikitiouk K., Polvanov V., Smirnov V., Goryachev A., Prokhorov V., Pakhnitz V., Vurim A. Data base on the behavior of high burn up fuel rods with Zr–1% Nb cladding and UO₂ fuel (VVER type) under reactivity accident conditions // *Description of test procedures and analytical methods. NUREG/IA-0156, V. 2, U.S. Nuclear Regulatory Commission.* – 1999. – P. 6.16–6.35.
16. Motta A. T., Chen L. Q. Hydride formation in zirconium alloys // *JOM.* – 2012. – V. 64, N 12. – P. 1403–1408.
17. Афров А. М., Андрушечко С. А., Украинцев В. Ф., Васильев Б. Ю., Косоуров К. Б., Семченков Ю. М., Кокосадзе Э. Л., Иванов Е. А. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность. – М.: Логос, 2006. – 488 с.
18. Маркелов В. А. Совершенствование состава и структуры сплавов циркония в обеспечение работоспособности твэлов, ТВС и труб давления активных зон водоохлаждаемых реакторов с увеличенным ресурсом и выгоранием топлива // *Дис.... д-р техн. наук.* – М., 2010.
19. Stafford D. S. Multidimensional simulations of hydrides during fuel rod lifecycle // *J. Nucl. Mater.* – 2015. –V. 466. –P. 362–372.
20. Couet A., Motta A. T., Comstock R. J. Hydrogen pickup measurements in zirconium alloys: relation to oxidation kinetics // *J. Nucl. Mater.* – 2014. –V. 451, N 1–3. – P. 1–13.
21. Шишалова Г. В., Кобылянский Г. П., Новиков А. М. Волкова И. Н. Определение содержания водорода в оксидных пленках и в металле элементов конструкций из циркониевых сплавов тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых ядерных энергетических установок // XI конференция по реакторному материаловедению, посвященная 55-летию отделения реакторного материаловедения АО «ГНЦ НИИАР»: тезисы докладов. – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2019. – 312 с. –С. 142–144.
22. Nath B., Lorimer G. W., Ridley N. Effect of hydrogen concentration and cool in grate on hydride precipitation in α -zirconium // *J. Nucl. Mater.* – 1975. – V. 58, N 2. – P. 153–162.
23. Kolesnik M., Aliev T., Likhanskii V. Modeling of hydrogen behavior in spent fuel claddings during dry storage // *J. Nucl. Mater.* – 2018. –V. 508. –P. 567–573.

24. Simon P. C. A., Frank C., Chen L. Q., Daymond M. R., Tonks M. R., Motta A. T. Quantifying the effect of hydride microstructure on zirconium alloys embrittlement using image analysis // J. Nucl. Mater. – 2021. – V. 547. – 152817.
25. Николаева А. В., Николаев Ю. А., Кеворкян Ю. Р. Радиационное охрупчивание материалов корпусов ВВЭР-1000 // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90, N 5.– С. 359–366.
26. Гурович Б. А., Фролов А. С., Кулешова Е. А., Мальцев Д. А., Сафонов Д. В., Кочкин В. Н., Алексеева Е. В., Степанов Н. В. Дegradация материалов оболочек твэлов на основе циркония в условиях эксплуатации реакторов типа ВВЭР // Вопросы материаловедения – 2018. – Т. 3 (95). – С. 191–205.
27. Ruiz-Hervias J., Simbruner K., Cristobal-Beneyto M., Perez-Gallego D., Zencker U. Failure mechanisms in unirradiated ZIRLO® cladding with radial hydrides // J. Nucl. Mater. – 2021. –V. 544. – 152668.