

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

- Сыч О. В., Коротовская С. В., Хлусова Е. И., Петров С. Н., Беликова Ю. А.* Влияние технологии производства толстолистового проката из судостроительной стали уровня прочности 500 на параметры структуры и характеристики работоспособности при низких температурах 7
- Куртеева К. Ю., Яковлева Е. А., Федосеев М. Л., Зисман А. А., Хлусова Е. И.* Влияние режима горячей деформации на текстуру, микроструктуру и механические свойства бейнитной стали после закалки с прокатного нагрева с отпуском 20
- Тимофеев М. Н., Брудник С. В., Пичхидзе С. Я.* Упрочнение и оценка коррозионной стойкости углеродистой стали 45 с помощью химико-термической обработки 32
- Ганиев И. Н., Рахимов М. Р., Отаджонов С. Э., Исмоилова М. Х., Худойбердизода С. У.* Влияние литья на температурную зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АК1 на основе особо чистого алюминия 42
- Сенникова Л. Ф., Гангало А. Н., Волкова Г. К., Климова Е. Х.* Закономерности формирования микроструктуры и механических свойств меди м1 в условиях комбинированной пластической деформации 50

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Горунов А. И., Морозов В. В., Гусева Д. В., Кудимов О. В.* Исследование структуры и свойств нового пористого композиционного материала, полученного прямым лазерным нанесением 59
- Тит М. А., Юльметова О. С., Щербак А. Г., Андреева В. Д., Ким А. Э.* Формирование функциональных тонкопленочных структур бинарных соединений на основе ниобия 69
- Бобкова Т. И., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В.* Разработка технологии получения наноструктурированного композиционного покрытия Х20Н80 – хром – TiC 82
- Тапыев С. А., Дьяконов А. А., Охлопкова А. А., Васильев А. П., Данилова С. Н., Лазарева Н. Н., Кычкин А. К., Туисов А. Г., Винокуров П. В., Спиридонов А. М., Стручков Н. Ф., Анисимов Е. Е.* Исследование влияния соотношения бутадиенового и бутадиен-нитрильного каучуков на свойства резиновых смесей на их основе 89
- Тюрина С. А., Карзакова В. С., Демин В. Л., Чавушьян С. Л.* Исследование возможности применения оптически прозрачных эпоксидных смол для реставрации стекловидных эмалей 99

ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Курносоев А. О., Славин А. В., Гуняева А. Г., Капустянская М. А., Гуляев А. И.* Исследование влияния внешних факторов, воздействующих на микроструктуру и физико-механические характеристики стеклоармированного полимерного композиционного материала на основе полиимидного связующего 108
- Клименко О. Н., Валуева М. И.* Обзор полимерных композиционных материалов и технологий, перспективных для применения при изготовлении спортивного инвентаря 119
- Васильев А. П., Лазарева Н. Н., Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Алексеев А. Г.* Влияние разных типов контртел на триботехнические свойства политетрафторэтилена 133
- Александрова Д. С., Злобина И. В., Егоров А. С., Анисимов А. В.* Влияние неблагоприятных климатических факторов, характерных для арктической зоны, на свойства полимерных материалов и композитов (обзор) 144

СВАРКА, СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Алдаие Я., Кархин В. А., Хомич П. Н.* Влияние физических свойств металла шва на диффузию водорода в зону термического влияния разнородных сварных соединений 169
- Грибанова В. Б., Мельников П. В., Грибков О. И., Лукьянова Н. А.* Системы легирования современных порошковых проволок для механизированной сварки в защитных газах высокопрочных судостроительных сталей 179

Киав Мин Сое, Мурзин В. В., Герман Г. В. Математическое моделирование и прогноз значений частных показателей теплообменных процессов при мокрой подводной сварке..... 187

Киав Мин Сое, Мурзин В. В., Герман Г. В. Итоговая оценка многофакторных экспериментов теплоотдачи в системе мокрой подводной сварки металлов 193

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Ганиев И. Н., Одинаев А. Х., Ходжаев Ф. К., Ходжаназаров Х. М., Одиназода Х. О. Влияние щелочнотемельных металлов на коррозионно-электрохимическое поведение свинцовых баббитов БКа, БСт, ББа (PbSb15Sn10) в среде электролита NaCl 199

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Шишков Ф. Л., Юрченко Е. В. О возможности определения сопротивления хрупкому разрушению ферритно-мартенситных сталей по результатам испытаний образцов после ионного облучения 208

Ерак Д. Ю., Папина В. Б., Журко Д. А. Прогнозирование радиационного охрупчивания материала сварных швов корпусов реакторов ВВЭР-1000 при продлении ресурса до 60 лет и более 227

Марголин Б. З., Пирогова Н. Е., Сорокин А. А., Кохонов В. И., Дуб А. В., Сафонов И. А. Исследование сопротивления коррозионному растрескиванию под напряжением облученной ферритно-мартенситной нержавеющей стали 07X12НМФБ в сверхкритической водной среде. Часть 2. Разработка методики идентификации коррозионных трещин и анализ результатов автоклавных испытаний..... 245

Перечень статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вопросы материаловедения» в 2023 году 260

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов 264

УДК 669.14.018.41:621.771.016

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ УРОВНЯ ПРОЧНОСТИ 500 НА ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

О. В. СЫЧ, канд. техн. наук, С. В. КОРОТОВСКАЯ, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук, С. Н. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, Ю. А. БЕЛИКОВА

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49. E-mail: npr3@crism.ru

Поступила в редакцию 23.10.2023

После доработки 8.11.2023

Принята к публикации 9.11.2023

Изучено влияние технологии изготовления низколегированной стали с пределом текучести не менее 500 МПа на параметры структуры. В промышленных условиях были изготовлены два листовых проката толщиной 50 мм по разным технологиям: 1) горячая прокатка с последующей печной закалкой и высокотемпературным отпуском; 2) закалка с прокатного нагрева с последующим высокотемпературным отпуском. С помощью оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии выявлены структурные особенности стали. Определены стандартные механические свойства и характеристики работоспособности при низких температурах.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, закалка с печного нагрева, закалка с прокатного нагрева, прокат, структура, речный мартенсит, гранулярный бейнит, речный бейнит, свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-07-19

ЛИТЕРАТУРА

1. НД № 2-020101-124. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII: Материалы. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. – 273 с.

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

2. НД № 2-020201-013. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства. – 2019. – 484 с.
3. Гусев М. А., Ильин А. В., Ларионов А. В. Сертификация судостроительных материалов для судов, эксплуатирующихся в условиях Арктики // Судостроение. – 2014. – № 5 (816). – С. 39–43.
4. Филин В. Ю. Контроль качества сталей для крупногабаритных сварных конструкций Арктического шельфа. Применение российских и зарубежных требований // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 2 (98). – С. 136–153.
5. ГОСТ Р 52927–2023. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия. – М., 2023.
6. Сыч О. В., Хлусова Е. И., Гусев М. А., Юрков М. Е. Характеристики работоспособности новых хладостойких сталей с индексом «Агс» для применения в Арктике // Научно-технический сборник российского морского регистра судоходства. – 2018. – Вып. 50/51. – С. 30–40.
7. Сыч О. В., Хлусова Е. И. Взаимосвязь параметров структуры с характеристиками работоспособности судостроительных сталей различного легирования // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 4 (104). – С. 17–31.
8. Лаврентьев А. А., Голосиенко С. А., Ильин А. В., Михайлов М. С., Мотовилина Г. Д., Петров С. Н., Садкин К. Е. Соппротивление хрупкому разрушению высокопрочной среднелегированной стали и его связь с параметрами структурного состояния // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 3(99). – С. 128–147.
9. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Часть 1. Принципы легирования и требования к структуре листового проката // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3 (95). – С. 22–47.
10. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Часть 2. Технология производства, структура и характеристики работоспособности листового проката // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 4 (956). – С. 14–42.
11. Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние структуры, сформированной при закалке на свойства высокопрочной хладостойкой стали после отпуска // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 1(53). – С. 32–44.
12. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Семичева Т. Г., Шерохина Л. Г. Превращение дислокационного мартенсита при отпуске вторичнотвердеющей стали. // МиТОМ. – 1999. – № 9. – С. 13–32.

УДК 621.771.016:621.785.6:669.15–194.591

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ТЕКСТУРУ, МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕЙНИТНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ С ПРОКАТНОГО НАГРЕВА С ОТПУСКОМ

К. Ю. КУРТЕВА, Е. А. ЯКОВЛЕВА, канд. техн. наук, М. Л. ФЕДОСЕЕВ,
А. А. ЗИСМАН, д-р физ.-мат. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 26.06.2023

После доработки 6.09.2023

Принята к публикации 12.09.2023

Проанализировано влияние режима горячей деформации перед закалкой с прокатного нагрева на структуру, кристаллографическую текстуру и механические свойства толстолистового проката из высокопрочной низкоуглеродистой бейнитной стали после высокого отпуска. Согласно полученным результатам, для формирования реечного (более прочного) бейнита, что характерно для относительно низкой температуры превращения, следует контролировать наклеп аустенита, ограничивая степень его деформации и понижение температуры на финальной стадии прокатки.

© 2023

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

Ключевые слова: высокопрочная бейнитная сталь, режим горячей прокатки, закалка с прокатного нагрева, кристаллографическая текстура, деформированный аустенит, речный бейнит, гранулярный бейнит

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-20-31

ЛИТЕРАТУРА

1. Jonas J. J. Transformation textures associated with steel processing // *Microstructure and Texture in Steels*. – New York: Springer, 2009. – P. 3–17.
2. Зисман А. А., Золоторевский Н. Ю., Петров С. Н., Хлусова Е. И., Яшина Е. А. Локальный текстурный анализ неоднородностей структуры в низкоуглеродистой высокопрочной стали после закалки с прокатного нагрева // *Вопросы материаловедения*. – 2020. – № 3 (103). – С. 9–15.
3. Bain E. C. The Nature of Martensite // *Trans. AIME*. – 1924. – V. 70. – P. 25–35.
4. Bunge H.-J. *Texture Analysis in Materials Science* // Butterworths. – 1982.
5. Brown E. L., Deardo A. J. On the origin of equiaxed austenite grains that result from the hot rolling of steel // *Metall. Mater. Trans.* – 1981. – V. 12. – P. 39–47.
6. Зисман А. А., Петров С. Н., Пташник А. В. Количественная аттестация бейнитно-мартенситных структур высокопрочных легированных сталей методами сканирующей электронной микроскопии // *Металлург*. – 2014. – № 11. – С. 91–95.
7. Taylor G. I. The mechanism of plastic deformation of crystals. Part I // *Proceedings of the Royal Society*. – 1934. – V. 145. – P. 362–387.
8. Cayron C., Baur A., Loge R. Intricate morphologies of laths and blocks in low-carbon martensitic steels // *Materials and Design*. – 2018. – V. 154. – P. 81–95.
9. Miyamoto G., Iwata N., Takayama N., Furuhashi T. Quantitative analysis of variant selection in ausformed lath martensite // *Acta Materialia*. – 2012. – V. 60. – P. 1139–1148.
10. Takayama N., Miyamoto G., Furuhashi T. Effects of transformation temperature on variant pairing of bainitic ferrite in low carbon steel // *Acta Materialia*. – 2012. – V. 60. – P. 2387–2396.
11. Яшина Е. А., Зисман А. А., Петров С. Н., Золоторевский Н. Ю. Выявление кристаллографических особенностей бейнитно-мартенситных структур в зависимости от условий закалки методами EBSD анализа // *Материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых*. – 2017. – С. 655–659.
12. De-Castro D., Eres-Castellanos A., Vivas J., Caballero F. G., San-Martin D., Capdevila C. Morphological and crystallographic features of granular and lath-like bainite in a low carbon microalloyed steel // *Materials characterization*. – 2022. – V. 184. – P. 111703. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111703>.
13. Zolotarevsky N. Y., Panpurin S. N., Zisman A. A., Petrov S. N. Effect of ausforming and cooling condition on the orientation relationship in martensite and bainite of low carbon steels // *Mater. Char.* – 2015. – V. 107. – P. 278–282. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.07.023>.
14. Greninger A. B., Troyano A. R. The mechanism of martensite formation // *Metals Trans.* – 1949. – V. 185. – P. 590–598.

УДК 669.141.24:621.785.5:621.793.74

УПРОЧНЕНИЕ И ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 45 С ПОМОЩЬЮ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

М. Н. ТИМОФЕЕВ, С. В. БРУДНИК, С. Я. ПИЧХИДЗЕ, д-р техн. наук

ФГБОУ ВО «СГТУ им. Ю. А. Гагарина», 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

E-mail: rendom@sstu.ru

Поступила в редакцию 27.12.2022

После доработки 27.10.2023

Принята к публикации 1.11.2023

Рассматриваются вопросы создания упрочняющего покрытия методом плазменного напыления порошка титана на сталь марки 45 с последующей цементацией в пастах с целью повышения

коррозионной стойкости. Исследуются микротвердость полученного покрытия и его коррозионная стойкость.

Ключевые слова: плазменное напыление, цементация, сталь марки 45, индукционный нагрев

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-32-41

ЛИТЕРАТУРА

1. Собачкин А. В., Ситников А. А., Яковлев В. И. Нанесение различных функциональных покрытий из СВС – механокомпозитов газодетонационным методом // Ползуновский вестник. Вып. 1 – Барнаул, 2019. – С. 186–191.
2. Магин Д. Ю., Костромин С. В. Исследование структуры и свойств высокопрочной теплостойкой стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2013. – Вып. 4 (101). – С. 256–261.
3. Иванов М. Н. Детали машин: Учеб. для машиностр. спец. вузов. Изд. 4-е. – М.: Высшая школа, 1984. – 336 с.
4. Бокштейн С. З. Диффузия в металлах. – М.: Metallurgia, 1978. – 248 с.
5. Магин Д. Ю., Костромин С. В. Оценка применения технологии лазерного поверхностного упрочнения и объемной термической обработки для повышения эксплуатационных свойств и формирования упрочненного слоя на поверхности детали зубчатое колесо // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы III Междунар. интерактив. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 17–21 декабря 2013 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – С. 226–228.
6. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Metallurgia, 1985. – 256 с.
7. Козловский И. С. Химико-термическая обработка шестерен. – М.: Машиностроение, 1970. – 232 с.
8. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
9. Кобелева К. В., Туктамышев В. Р. Обзор методов повышения долговечности авиационных зубчатых передач // Аэрокосмическая техника. Вестник ПНИПУ. – 2017. – № 50. – 11 с. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.50.12.
10. Татаринев И. В. Механоэлектрохимическая обработка упрочненных зубчатых колес // Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Тула, 2010. – 134 с.
11. Решетов Д. Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. Изд. 4-е. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
12. Осипова Е. О., Маркелова О. А., Кошуро В. А., Фомин А. А. Исследование влияния тока индуктора на структуру и механические свойства газотермических титановых покрытий // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 3 (32). – С. 27–32.
13. Палканов П. А., Кошуро В. А., Фомин А. А. Влияние тока индуктора при азотировании стали Р6М5 на структуру и микротвердость диффузионного слоя // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 2. – С. 5–12.
14. Федоров А. Д., Тимофеев М. Н., Пичхидзе С. Я. К вопросу последовательного титанирования и цементации стали 45 // Вестник СГТУ. – 2020. – № 3 (94). – 7 с.
15. Dobromyslov A. V., Taluts N. I. Mechanical Alloying of Ti–Fe Alloys Using Severe Plastic Deformation by High-Pressure Torsion // Physics of Metals and Metallography. – 2018. – V. 119, N 11. – P. 1127–1132. – DOI 10.1134/S0031918X18110030.
16. Dobromyslov A. V., Taluts N. I. Pilyugin V. P. Mechanical Alloying of Zr–Fe Alloys Using Severe Plastic Deformation by High Pressure Torsion // Physics of Metals and Metallography. – 2020. – V. 121, N 2. – P. 150–156. – DOI 10.1134/S0031918X20020040.
17. Каспарова О. В. Повышение коррозионной стойкости углеродистой стали 45 с помощью химико-термической обработки // Технология легких сплавов. – 2015. – № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-korrozionnoy-stoykosti-uglerodistoy-stali-45-s-pomoschyu-himiko-termicheskoy-obrabotki> (дата обращения: 23.08.2023).

18. Крылова Т. А., Иванов К. В., Чумаков Ю. А., Троценко Р. В. Коррозионная стойкость и износостойкость покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки тугоплавких карбидов на низкоуглеродистую сталь // Неорганические материалы. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 343–347. – DOI 10.31857/S0002337X20030094. – EDN FEZEWH.

19. Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас / И. Я. Сокол, Е. А. Ульянин, Э. Г. Фельдгандлер и др. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.

УДК 669.715:536.631

ВЛИЯНИЕ ЛИТИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ СПЛАВА АК1 НА ОСНОВЕ ОСОБО ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ

И. Н. ГАНИЕВ^{1,2}, д-р. хим. наук, М. Р. РАХИМОВ³, С. Э. ОТАДЖОНОВ³, канд. техн. наук,
М. Х. ИСМОИЛОВА³, С. У. ХУДОЙБЕРДИЗОДА¹, канд. техн. наук

¹Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана, 734063 г. Душанбе, ул. Айни, 299/2,
Республика Таджикистан, E-mail ganievisatullo48@mail.ru

²Таджикский технический университет им. М. С. Осими, Республика Таджикистан,
734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10

³ГОУ «Худжандский государственный университет имени академика Бободжона Гафурова»,
735700 Худжанд, пр. Мавлонбекова, 1, Республика Таджикистан

Поступила в редакцию 12.12.2022

После доработки 16.11.2023

Принята к публикации 27.11.2023

Теплоемкость сплава АК1 на основе особо чистого алюминия с литием определяли в режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из алюминия. Путем математической обработки кривых скорости охлаждения образцов из сплава АК1 с литием и эталона получены полиномы, описывающие скорости их охлаждения. Далее по экспериментально найденным скоростям охлаждения образцов из сплава и эталона, зная их массу, были установлены полиномы температурной зависимости теплоемкости сплавов, которые описываются четырехчленным уравнением. Используя интегралы от удельной теплоемкости, были установлены модели температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса.

Установлено, что с ростом температуры теплоемкость сплавов повышается. При температурах до 600 К добавка лития в значительной степени повышает теплоемкость исходного сплава АК1, при температурах выше 600 К при содержании лития 0,5 мас.% теплоемкость снижается. Показано, что добавка лития увеличивает энтальпию и энтропию исходного сплава АК1 и уменьшает величину энергии Гиббса.

Ключевые слова: алюминиевый сплав АК1, литий, теплоемкость, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-42-49

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахобов А. В., Обидов Ф. У., Вахобова Р. У. Высокочистый алюминий и его сплавы. Т. 1. – Душанбе: НПИ Центр, 1990. – 175 с.

2. Вахобов А. В., Обидов Ф. У., Вахобова Р. У. Высокочистый алюминий и его сплавы. Т. 2. – Душанбе: НПИ Центр, 1990. – 232 с.

3. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение): Справочник // Под ред. И. Н. Фридляндера. – Киев: Коминтех, 2005. – 365 с.

4. Золоторевский В. С., Белов Н. А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 376 с.

5. Луц А. Р., Суслина А. А. Алюминий и его сплавы. – Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2013. – 81 с.

6. Nowak M., Bolzoni L., Babu N. H. Grain refinement of Al–Si alloys by Nb–B inoculation. Part I: Concept development and effect on binary alloys // Mater. Des. – 2015. – N 66. – P. 366–375. doi: 10.1016/j.matdes.2014.08.066.

7. Garc C., Isabel A., Mart F. Comparative Study on Microstructure and Corrosion Resistance of Al–Si Alloy Cast from Sand Mold and Binder Jetting Mold // Metals. – 2021. – V. 11. – P. 1421.

8. Callegari B., Lima T. N., Coelho R. S. The Influence of Alloying Elements on the Microstructure and Properties of Al–Si-Based Casting Alloys: A Review. Metals. – 2023. – V. 13. – P. 1174. <https://doi.org/10.3390/met13071174>

9. Яценко С. П., Сабирзянов А. Н. Повышение качества алюминиевых сплавов путем легирования "Мастер-сплавом" // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2006. – № 5–1. – С. 174–176.

10. Otadzovonov S. E., Ganiev I. N., Makhmudov M., Ibrokhimov N. F. Temperature Dependence of the Heat Capacity and Variability of the Thermodynamic Functions of Alloy AK1 Doped with Strontium // High Temperature. – 2019. – V. 57, N 1. – P. 22–26.

11. Otajonov S. E., Ganiev I. N., Ibrohimov N. F., Mahmudov M. Temperature dependence of the heat capacity and change in the thermodynamic functions of strontium-alloyed AK1M2 alloy // Modern Electronic Materials. – 2018. – N 4(3). – P. 119–124.

12. Отаджонов С. Э., Ганиев И. Н., Махмудов М., Сангов М. М. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АК1М2 с кальцием // Изв. Юго-западного гос. ун-та. Серия: Техника и технологии. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 105–115.

13. Ganiev I. N., Yakubov U. S., Safarov A. G., Odinaev F. R., Kabutov K. Temperature dependence of heat capacity and the variation in thermodynamic function of the AZH 4.5 alloy doped with tin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2019. – V. 60, N 2. – P. 139–145.

14. Ганиев И. Н., Ниезов О. Х., Сафаров А. Г., Муллоева Н. М. Влияние стронция на теплоемкость и изменение термодинамических функции свинцового сплава ССУЗ // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2018. – № 47 (73). – С. 36–42.

15. Ганиев И. Н., Зокиров Ф. Ш., Сангов М. М., Иброхимов Н. Ф. Влияние кальция на температурную зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АК12М2 // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56, № 6. – С. 891–896.

16. Ганиев И. Н., Якубов У. Ш., Назарова М. Т., Курбонова М. З. Влияние добавок калия на температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2019. – Т. 75, № 4. – С. 16–22.

17. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справ. изд. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.

УДК 669.3:621.777

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕДИ М1 В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Л. Ф. СЕННИКОВА, канд. техн. наук, А. Н. ГАНГАЛО, канд. техн. наук, Г. К. ВОЛКОВА,
Е. Х. КЛИМОВА

*ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина», 83114, Донецк,
ул. Розы Люксембург, 72, ДНР, Россия. E-mail: ludsennikova@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.03.2023

После доработки 16.08.2023

Принята к публикации 23.08.2023

Изучено влияние комбинированной пластической деформации, включающей методы интенсивной пластической деформации и традиционной обработки металлов давлением, на структуру и механические свойства меди М1. Показано, что комбинированная обработка способствует повышению

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

размерной однородности значений твердости по сечению заготовки, измельчению элементов микроструктуры с увеличением степени эквивалентной деформации и, следовательно, повышению уровня механических свойств меди М1.

Ключевые слова: комбинированная пластическая деформация, винтовая экструзия, твердость, структура, размер зерна, медь, равноканальное угловое прессование, гидроэкструзия

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-50-58

ЛИТЕРАТУРА

1. Волокитина И. Е., Волокитин А. В. Эволюция микроструктуры и механических свойств меди в процессе «прессование – волочение» // ФММ. – 2018. – Т. 119, № 9. – С. 971–976.
2. Лежнев С. Н., Волокитина И. Е., Панин Е. А., Волокитин А. В. Эволюция микроструктуры и механических свойств меди при реализации совмещенного процесса «прокатка – РКУ-прессование» // ФММ. – 2020. – Т. 121, № 7. – С. 757–762.
3. Najzabekov A. B., Lezhnev S. N., Panin E. A., Volokitina I. E. Influence of Combined Process “Rolling – pressing” on Microstructure and Mechanical Properties of Copper // Procedia Eng. – 2014. – V. 81. – P. 1499–1505.
4. Найзабеков А. Б., Лежнев С. Н. Исследование влияния основных параметров процесса «прокатка – РКУП» на напряженно-деформированное состояние и эволюцию микроструктуры с использованием компьютерного моделирования // Обработка материалов давлением. – 2019. – № 2 (49). – С. 26–34.
5. Klu, E., Song, D., Li, Ch., Wang, G., Gao, B., Ma, A., Jiang, J. Achieving ultra-fine grains and high strength of Mg–9Li alloy via room-temperature ECAP and post rolling. Materials Science and Engineering: A. – 2021. – N 833. – Art. 142371. DOI:10.1016/j.msea.2021.
6. Землякова Н. В., Рогачев С. О. Аккомодация структуры и механических свойств чистой меди в процессе интенсивной пластической деформации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16. – № 1. – С. 131–136.
7. Patil Basavaraj V., Chakkingal U., Prasanna Kumar T. S. Study of channel angle influence on material flow and strain inhomogeneity in equal channel angular pressing using 3D finite element simulation // Journal of materials processing technology. – 2009. – V. 209. – P. 89–95.
8. Сенникова Л. Ф., Гангало А. Н., Ткаченко В. М., Сапронов А. Н., Климова Е. Х. Влияние комбинированной обработки по схеме винтовая экструзия и последующее редуцирование на структуру и свойства меди М1 // Материалы междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности», 22–27 мая 2022 г. – С. 101–103.
9. Kulczyk M., Pachla W., Mazur A., Sus-Ryszkowska M., Krasilnikov N., Kurzydowski K. J. Producing bulk nanocrystalline materials by combined hydrostatic extrusion and equalchannel angular pressing // Materials Science – Poland. – 2007. – V. 25, N 4.
10. Сенникова Л. Ф., Давиденко А. А., Спусканюк В. З., Дмитренко В. Ю., Закорецкая Т. А. Влияние деформационно-термической обработки на механические и функциональные свойства сплава Cu–Cr–Zr // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 4 (76). – С. 35.
11. Иванов А. М. Комбинирование методов деформационной обработки материалов // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. – 2019. – № 10 (83). – С. 19.
12. Иванов А. М. Упрочнение низколегированной стали комбинированием экструзии, винтового и равноканального прессований // Вестник машиностроения. – 2017. – № 2. – С. 81.
13. Яковлева С. П., Махарова С. Н., Мордовской П. Г. Влияние комбинированной мегапластической деформации на структуру и свойства стали 09Г2С Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – С. 52–59.
14. Варюхин В. Н., Пашинская Е. Г., Добаткин С. В., Сынков С. Г., Ткаченко В. М., Решетов А. В. Влияние винтовой гидроэкструзии и прокатки на изменение субмикроструктуры меди // ФТВД. – 2002. – Т. 12, № 4. – С. 53–59
15. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 566 с.
16. Васильев Д. М. Дифракционные методы исследования структур. – СПб, 1998. – 502 с.
17. Русаков А. А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 479 с.

18. Гусев А. И. Наноматериалы. Наноструктуры. Нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. – 410 с.

УДК 669.295'294'296:621.762.86

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НОВОГО ПОРИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО ПРЯМЫМ ЛАЗЕРНЫМ НАНЕСЕНИЕМ

А. И. ГОРУНОВ, д-р техн. наук, В. В. МОРОЗОВ, Д. В. ГУСЕВА, О. В. КУДИМОВ

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ», 420111, Республика Татарстан, Казань, ул. К. Маркса, д. 10.
E-mail: gorunow.andrej@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.03.2023

После доработки 6.10.2023

Принята к публикации 9.11.2023

Показана возможность формирования пористых материалов биомедицинского назначения из сплава ВТ6/Та/Zr прямым лазерным нанесением. Варьирование мощностью лазера позволило получить сплавы с переменной пористостью. Были подобраны режимы, обеспечивающие формирование пористого материала с модулем нормальной упругости, соответствующим кости человека. Установлено, что при мощности лазера 50 Вт достигается значение пористости 32%, что удовлетворяет требованиям, например, для дентального протезирования. В процессе прямого лазерного нанесения материалов в сплаве ВТ6/Та/Zr с переменной пористостью частицы тантала не плавятся и выступают центрами кристаллизации. Такие условия обеспечивают формирование высокодисперсной структуры металла, состоящей преимущественно из порошинок ВТ6 с равномерно распределенными частицами Та и Zr.

Ключевые слова: прямое лазерное нанесение, микроструктура, переменная пористость, титановый сплав, тантал, цирконий

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-59-68

ЛИТЕРАТУРА

1. Matsko A., França R. Design, manufacturing and clinical outcomes for additively manufactured titanium dental implants: A systematic review // *Dentistry Review*. – 2022. – V. 2. – Art. 100041.
2. Li Y., Jahr H., Zhou J., Zadpoor A. A. Additively manufactured biodegradable porous metals // *Acta Biomaterialia*. – 2020. – V. 115. – P. 29–50.
3. Yin C., Zhang T., Wei Q., Cai H., Cheng Y., Tian Y., Leng H., Wang C., Feng S., Liu Z. Surface treatment of 3D printed porous Ti6Al4V implants by ultraviolet photofunctionalization for improved osseointegration // *Bioactive Materials*. – 2022. – N 7. – P. 26–38.
4. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. – М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. – 520 с.
5. Liu C, Huang S, Guo F, Li Y, Zhao B, Luo A, Liu H, Wang C, Hu M, Zhou H. Immediate, non-submerged, three-dimensionally printed, one-piece mandibular molar porous root-analogue titanium implants: A 2-year prospective study involving 18 patients // *J. Stomatol. Oral and Maxillofac Surg*. – 2022. – V. 123. – P. e770–e776
6. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
7. Yuan L., Ding S., Wen C. Additive manufacturing technology for porous metal implant applications T and triple minimal surface structures: A review // *Bioactive Materials*. – 2019. – V. 4. – P. 56–70.
8. Deering J., Presas A., Yu B., Valentin D., Heiss C., Bosbach W. A., Grandfield K. Implant resonance and the mechanostat theory: Applications of therapeutic ultrasound for porous metallic scaffolds // *Materials Science and Engineering*. – 2021. – N 125. – Art. 112070.
9. Rho J.-Y., Kuhn-Spearing L., Zioupos P. Mechanical properties and the hierarchical structure of bone // *Medical Engineering and Physics*. – 1998. – V. 20. – P. 92–102.

10. Jing R, Liang S. X., Liu C. Y., Ma M. Z., Zhang X. Y., Liu R. P. Structure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy after zirconium addition // *Materials Science and Engineering, A*. – 2012. – V. 552. – P. 295–300.
11. Jing R, Liang S. X., Liu C. Y., Ma M. Z., Liu R. P. Aging effects on the microstructures and mechanical properties of the Ti20Zr6.5Al4V alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – V. 559. – P. 474–479.
12. Xia C., Zhang Z., Feng Z., Pan B., Zhang X., Ma M.Z., Liu R. Effect of zirconium content on the microstructure and corrosion behavior of Ti–6Al–4V–xZr alloys // *Corrosion Science*. – 2016. – V. 112. – P. 687–695
13. Liao Z. N., Luan B. F., Zhang X. Y., Liu R. P., Murty K. L., Liu Q. A multideformation mechanisms assisted metastable β -ZrTiAlV alloy exhibits high yield strength and high work hardening rate // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – V. 816. – Art.152642.
14. Abnormal martensitic transformation of high Zr-containing Ti alloys / S. X. Liang, L. X. Yin, Y. K. Zhou, X. J. Feng, M. Z. Ma, R. P. Liu, et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – V. 615. – P. 804–808.
15. Jiang X. J., Bao S. J., Zhang L. W., Zhang X. Y., Jiao L. S., Qi H. B., Wang F. Effect of Zr on microstructure and properties of TC4 alloy fabricated by laser additive manufacturing // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – N 24. – P. 8782–8792.
16. Qian H., Lei T., Lei P., Hu Y. Additively manufactured tantalum implants for repairing bone defects: a systematic review // *Tissue Eng. Part B: Re*. – 2020. – V. 27, N 2. – P. 1–42.
17. Bandyopadhyay A., Mitra I., Shivaram A. Dasgupta N., Bose S. Direct comparison of additively manufactured porous titanium and tantalum implants towards in vivo osseointegration // *Addit. Manuf.* – 2019. – V. 28. – P. 259–266.
18. Balla V. K., Bose S., Davies N. M., Bandyopadhyay A. Tantalum-A bioactive metal for implant // *Jom-U.S.* – 2010. – V. 62. – P. 61–64.
19. Kaur M., Singh K. Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications // *Mater. Sci. Eng. C*. – 2019. – V. 102. – P. 844–862.
20. Han Q., Wang C., Chen H., Zhao X., Wang J. Porous tantalum and titanium in orthopedics: A review // *Acs Biomater Sci. Eng.* – 2019. – V. 5. – P. 5798–5824.
21. Roy M., Balla V. K., Bose S., Bandyopadhyay A. Comparison of tantalum and hydroxyapatite coatings on titanium for applications in load bearing implants // *Adv. Eng. Mater.* – 2010. – V. 12. – P. B637–B641.
22. Roy M., Balla V. K., Bandyopadhyay A., Bose S. MgO-doped tantalum coating on Ti: microstructural study and biocompatibility evaluation // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2012. – V. 4. – P. 577–580.
23. Zhang T., Chen C., Dong J., Wu Y., Qian H., Lei P., Zhou K. Microstructure and biocompatibility of porous-Ta/Ti–6Al–4 V component produced by laser powder bed fusion for orthopedic implants // *Materials Characterization*. – 2021. – V. 182. – Art.111554.
24. Rho J.-Y., Ashman R. B., Turner C. H. Young's modulus of trabecular and cortical bone material: Ultrasonic and microtensile measurements // *Journal of Biomechanics*. – 1993. – V. 26. – P. 111–119.
25. Burstein H., Reilly D. T., Martens M. Aging of bone tissue: mechanical properties // *Bone Joint Surg*. – 1978. – V. 58. – P. 82–86.
26. Meng J., He J., Zhang B, Chen J, Li S, Niu D, Tang Y. The effect of Ti and Zr content on the structure, mechanics and energy-release characteristics of Ti–Zr–Ta alloys. – *Defence Technology*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.01.007>.
27. Fox P., Pogson S., Sutcliffe C.J., Jones E. Interface interactions between porous titanium/tantalum coatings, produced by Selective Laser Melting (SLM), on a cobalt–chromium alloy // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – V. 202. – P. 5001–5007.
28. Zeng G., Zahiri S. H., Gulizia S., Chen Y., Xu C., Chen X.-B., Cole I. A comparative study of cell growth on a cold sprayed Ti–Ta composite // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – V. 826. – Art. 154014. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020>

29. Ji P., Liu S., Deng H., Ren H., Zhang J., Sun T., Xu K., Shi C. Effect of magnetron-sputtered monolayer Ta and multilayer TiZrTa and ZrTiTa coatings on the surface properties of biomedical BT6 alloy // *Materials Letters*. – 2022. – V. 322. – Art. 132464.

30. Lin M.-T., Wan C.-H., Wu W. Characterization and corrosion resistance of TiZr coating on SS304 stainless steel using cathodic arc evaporation techniques // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – V. 320. – P. 217–225.

УДК 669.293:621.793.7:539.23:531.383

ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР БИНАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ НИОБИЯ

М. А. ТИТ¹, О. С. ЮЛЬМЕТОВА^{1,2}, д-р техн. наук, А. Г. ЩЕРБАК¹, д-р техн. наук,
В. Д. АНДРЕЕВА³, канд. техн. наук, А. Э. КИМ³

¹ ГНЦ РФ АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 197046, Санкт-Петербург,
ул. Малая Посадская, 30. E-mail: rita93.07.93.07@gmail.com,

² ФГАОУ ВО «Университет ИТМО», 197101, Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, 49.
E-mail: olga@yulmetova.ru

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

Поступила в редакцию 14.08.2023

После доработки 20.08.2023

Принята к публикации 23.08.2023

Разработаны технологические схемы формирования бинарных соединений ниобия на основе термовакuumного напыления тонкопленочного ниобиевого покрытия с последующей термической или лазерной обработкой, обеспечивающей формирование карбида или нитрида ниобия. Представлены результаты рентгенофазового анализа, подтверждающие эффективность применения термодинамических расчетов для аналитического прогнозирования фазового состава и свойств формируемых соединений. Обоснованы перспективы практического использования представленных технических решений для разработки технологии изготовления криогенного гироскопа.

Ключевые слова: ротор, криогенный гироскоп, сверхпроводимость, нитриды и карбиды ниобия, углесталл, лазерное маркирование, термодинамический анализ, растровый рисунок, рентгенофазовый анализ

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-69-81

ЛИТЕРАТУРА

1. Valeeva A. A., Gusev A. I. Effect of nonstoichiometry on elastic properties of niobium carbide NbC_y // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2021. – V. 95. – Art. 105435. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105435>.

2. Li J., Bai H., Li R., Zhu Y., Chen L., Zhao N., Xu Y. Microstructure and bond strength of niobium carbide coating on GCr15 prepared by in situ hot press sintering // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – V. 24. – P. 4843–4851. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.140>.

3. Tabakov V., Chikhranov A., Dolzhenko Y., Zykin E. Study of the influence of deposition conditions on the structural parameters and mechanical properties of coatings based on niobium nitride // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – V. 38, Is. 4. – P. 1956–1959.

4. Laskoski M., Prestigiacomo J., Dyatkin B., Keller T. M., Mahzabeen W., Shepherd A. R., Daftary M. N., Clarke J. S., Neal A., Qadri S. B., Osofsky M. Synthesis and material properties of polymer-derived niobium carbide and niobium nitride nanocrystalline ceramics // *Ceramics International*. – 2021. – V. 47, Is. 1. – P. 1163–1168. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.232>.

5. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 1 / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.

6. Дементьева М. М., Приходько К. Е., Гурович Б. А., Кутузов Л. В., Комаров Д. А. Изучение эволюции атомного состава тонких пленок NbN в процессе облучения смешанными ионными пучками методами спектроскопии энергетических потерь электронов // *Физика твердого тела*. – 2016. – Т. 58, вып. 11. – С. 2104–2108.
7. Chen H., Radeka V. Cryogenic electronics for noble liquid neutrino detectors // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2023. – V. 1045. – Art. 167571. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167571>.
8. Левин С. Л., Святой В. В., Степченко М. В., Цветков В. Н., Чесноков П. А., Щербак А. Г., Машичев В. А. Результаты разработки конструкции и технологии изготовления элементов криогироскопа // *Материалы XXX Конференция памяти Н. Н. Острякова, ГНЦ РФ, АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 4–6 октября 2016*. – С. 99–106.
9. Kahn R., Everitt F., Muhlfelder B., Langenstein T. Gravity Probe B // *Science Results*. – NASA Final Report, 2008.
10. Патент РФ № 2460971. Способ изготовления ротора криогенного гироскопа / В. Н. Колосов, А. А. Шевырев // *Бюл. № 25*. – 2012.
11. Dubrovskiy A., Okunev M., Makarova O., Kuznetsov S. Superconducting niobium coatings deposited on spherical substrates in molten salts, *Coatings*. – 2018. – V. 8(6). – P. 213.
12. Tit M. A., Belyaev S. N. Effect of Stoichiometric Composition on the Functional Characteristics of Thin-Film Surface Structures on Gyroscope Components // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2020. – N 11(6). – P. 1370–1377.
13. Юльметова О. С. Исследование процесса лазерного оксидирования ниобия // *Вопросы материаловедения*. – 2018. – № 2 (94). – С. 83–91.
14. Tit M. A., Yulmetova O. S., Sisyukov A. N., Andreeva V. D., Yulmetova R. F. Application of Niobium Nitride Thin Films for Improvement of Performance Characteristics of Cryogenic Gyroscope // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. Moscow, 26–28 January 2021.
15. Патент РФ № 2678707. Способ изготовления чувствительного элемента криогенного гироскопа / С. Л. Левин, М. А. Туманова, О. С. Юльметова, В. В. Святой, А. Г. Щербак, Л. П. Рябова. – 2019.
16. Каримов Ю. С., Уткина Т. Г. Сверхпроводимость нестехиометрического карбида ниобия // *Письма в ЖЭТФ*. – 1990. – Т. 51, вып. 9. – С. 468–470.
17. Georg F, Jonh K. The superconductivity of some transition metal compounds // *Physical Review*. – 1954. – V. 93, Is. 5. – P. 1004–1016.
18. Ремпель А. А., Гусев А. И., Гололобов Е. М., Прыткова Н. А., Томило Ж. М. Влияние упорядочения на температуру перехода в сверхпроводящее состояние нестехиометрического карбида ниобия // *Физика твердого тела*. – 1986. – Т. 28, вып. 1. – С. 279–281.
19. Leith S., Vogel M., Fan J., Seiler E., Ries R., Jiang X. Superconducting NbN films for use in superconducting radio frequency cavities // *Superconducting science and technology*. – 2021. – V. 34, N 2.
20. Discovery of Superconductivity in Hard Hexagonal ϵ -NbN / Zou Y. et al. // *Scientific Reports*. – 2016. – N 6 (1).
21. Юльметова О. С. Ионно-плазменные и лазерные технологии в гироскопическом приборостроении // *Дис. ... д-ра техн. наук*. – ГНЦ РФ АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2019. – 244 с.
22. Yulmetova O. S., Scherbak A. G. Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system // *Optics and laser technology*. – 2018. – V. 101. – P. 242–247.
23. Yulmetova O. S., Scherbak A. G. Composition analysis of thin films formed on beryllium surfaces under pulsed laser action by the method of chemical thermodynamics // *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. – 2018. – V. 97. – P. 3231–3236. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2216-2>.
24. Tit M. A., Yulmetova O. S., Sisyukov A. N. Analysis of Niobium Thin Film Modification Based on Thermodynamic Approach // *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*, St. Petersburg and Moscow, Russia. – 2020. – P. 1049–1052.

25. Barzilai S., Frage N., Raveh A. Niobium layers on graphite: Growth parameters and thermal annealing effects // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – V. 200. – P. 4646–4653.
26. Кукин В. Н., Боргардт Н. И., Агафонов А. В., Кузнецов В. О. Фазовая неоднородность структуры углеситалла // *Письма в ЖЭТФ*. – 2004. – Т. 30, вып. 17. – С. 76–82.
27. Уманский С. Я. Теория элементарных химических реакций. – М.: Интеллект, 2009. – 408 с.
28. Маслов А. А., Оствальд Р. В., Шагалов В. В., Маслова Е. С., Горенюк Ю. С. Химическая технология ниобия и тантала. Учебное пособие. – Томск, 2010. – 97 с.
29. Патент РФ № 2660756. Способ изготовления ротора шарового гироскопа / С. Л. Левин, О. С. Юльметова, Е. А. Махаев и др. // *Бюл. изобр.* – 2018. – № 19.
30. Matthias В. Т. Transition temperatures of superconductors // *Phys. Rev.* – 1953. – V. 92, Is. 4. – P. 874–876.

УДК 621.793.7:621.763

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ X20N80 – ХРОМ – TiC

Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ,
Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, д-р техн. наук, 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 4.09.2023

После доработки 27.09.2023

Принята к публикации 2.10.2023

Приведены результаты комплексного исследования по разработке технологии получения композиционных наноструктурированных функциональных покрытий на основе системы X20N80 – хром – TiC с использованием метода сверхзвукового холодного газодинамического напыления. Композиционные порошки для нанесения покрытий получают за счет плакирования хромом матричного порошка из сплава X20N80 с последующим нанесением армирующего покрытия из наночастиц TiC. Полученное покрытие имеет высокий уровень микротвердости, модуля упругости и стойкости к износу. Отличительной особенностью полученного покрытия является его надежная эксплуатации без разрушения в течение длительного времени (более 4800 ч).

Ключевые слова: нанокompозит, матричный порошок, армирующий порошок, холодное газодинамическое напыление, функциональное покрытие

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-82-88

ЛИТЕРАТУРА

1. Жабрeв В. А., Лукьянов Г. Н., Марголин В. И., Рыбалко В. В., Тупик В. А. Введение в нанотехнологию: Учеб. пособие. – М.: Московский Государственный институт электроники и математики (технический университет), 2007. – 293 с.
2. Марголин В. И., Жабрeв В. А., Лукьянов Г. Н., Тупик В. А. Введение в нанотехнологию: Учебник. – СПб.: Лань, 2012. – 448 с.
3. 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.
4. Бурханов Г. С., Дементьев В. А. Тугоплавкие монокарбиды и дибориды переходных металлов – перспективные компоненты высокотемпературных композиционных материалов // *Вопросы материаловедения*. – 2017. – № 2 (90). – С. 57–67.
5. 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.
6. Наноструктурированные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия / А. Д. Коротаев и др. // *Физическая механика*. – 2005. – Т. 8, № 5. – С.103–116.

© 2023

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

7. Целуйкин В. Н. Композиционные покрытия, модифицированные наночастицами: структура и свойства // Российские нанотехнологии. – 2014. – Т. 9, № 1–2. – С. 25–35.

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.

9. 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.

10. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Машек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 87–96.

УДК 678.074

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ БУТАДИЕНОвого И БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКОВ НА СВОЙСТВА РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ

С. А. ТАПЫЕВ¹, А. А. ДЪЯКОНОВ^{1,2}, канд. техн. наук, А. А. ОХЛОПКОВА¹, д-р техн. наук, А. П. ВАСИЛЬЕВ¹, канд. техн. наук, С. Н. ДАНИЛОВА¹, Н. Н. ЛАЗАРЕВА¹, канд. техн. наук, А. К. КЫЧКИН², канд. техн. наук, А. Г. ТУИСОВ², канд. техн. наук, П. В. ВИНУКОВ¹, А. М. СПИРИДОНОВ¹, канд. хим. наук, Н. Ф. СТРУЧКОВ², канд. техн. наук, Е. Е. АНИСИМОВ¹

¹ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Кулаковского, 48

²ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова» СО РАН, 677980, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1. E-mail: afonyu71185@mail.ru

Поступила в редакцию 8.02.2023

После доработки 17.07.2023

Принята к публикации 7.08.2023

Исследовано влияние содержания бутадиенового каучука марки СКД-В и бутадиен-нитрильного каучука марки БНКС-18 АМН в резиновой смеси на свойства эластомеров. Комбинация морозостойкого и агрессивностойкого каучуков в резиновой смеси позволяет адаптировать свойства вулканизаторов к требуемым эксплуатационным условиям. В ходе исследования установлено, что от соотношения каучуков зависит уровень физико-механических свойств, агрессивностойкость и морозостойкость. При исследовании свойств резин выявлены две температуры стеклования и два термических перехода при отрицательных температурах, соответствующие бутадиен-нитрильному и бутадиеновому каучуку. Методом электронной микроскопии исследована фазовая морфология эластомеров, которая характерна для бутадиен-нитрильного или бутадиенового каучуков в зависимости от их соотношения в резиновой смеси. На основе разработанной резиновой смеси были изготовлены пыльники для шарниров равных угловых скоростей, которые прошли апробацию в реальных условиях эксплуатации в температурном диапазоне от –52 до 33°С.

Ключевые слова: эластомерные материалы, бутадиеновый каучук, бутадиен-нитрильный каучук, морозостойкость, агрессивностойкость, износостойкость, физико-механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-89-98

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрова Н. Н. Морозостойкие и маслобензостойкие материалы на основе смесей эластомеров // Дис... канд. хим. наук. – М., 1995.

2. Чайкун А. М., Елисеев О. А., Наумов И. С., Венедиктова М. А. Особенности построения рецептур для морозостойких резин // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 3 (28). – С. 53–55.

3. Ушмарин Н. Ф., Егоров Е. Н., Кольцов Н. И. Морозостойкая резина на основе комбинации бутадиен-нитрильного и гидриновых каучуков // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2017. – Т. 60, № 8. – С. 60–64.

4. Новаков И. А., Данг М. Т., Ваниев М. А., Нилидин Д. А., Губин С. Г., Сидоренко Н. В., Сычев Н. В. Исследование свойств эластомеров на основе бутадиен-нитрильного, этиленпропиленового каучуков и хлорсульфированного полиэтилена // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2020. – № 12. – С. 112–121.
5. Ушмарин Н. Ф., Сандалов С. И., Пелипенко Д. В., Егоров Е. Н., Кольцов Н. И. Разработка ограниченно разбухающей в нефти резины для пакеров // Каучук и резина. – 2019. – № 4 (78). – С. 214–219.
6. Долинская Р. М., Щербина Е. И., Свицерская Т. Д. Использование каучуков специального назначения для создания термостойких резинотехнических изделий // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2009. – № 4. – С. 143–145.
7. Дьяконов А. А., Тапыев С. А., Охлопкова А. А., Слепцова С. А., Петрова Н. Н., Винокуров П. В., Кычкин А. К., Стручков Н. Ф. Исследование свойств эластомеров на основе комбинации изопренового и бутадиен-нитрильного каучуков // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 3. – С. 93–97.
8. Мухин В. В., Петрова Н. Н., Капитонов Е. А., Афанасьев А. В. Разработка стойких к авиационным синтетическим маслам резин на основе смесей нитрильных и диеновых каучуков // Вестник СВФУ. – 2016. – № 6 (56). – С. 41–50.
9. Шашок Ж. С., Вишневский К. В. Технология эластомерных композиций: Учебно-методическое пособие. – Минск: БГТУ, 2014. – 99 с.
10. Бобров Г. Б. Маслобензостойкий динамически вулканизированный термоэластопласт на основе смеси полипропилена с полярным эластомером // Дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2016.
11. Донцов А. А. Процессы структурирования эластомеров. – М.: Химия, 1978. – 288 с.
12. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов. – М: МГОУ, 2001. – 472 с.

УДК 666.1.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ СТЕКЛОВИДНЫХ ЭМАЛЕЙ

С. А. ТЮРИНА¹, канд. техн. наук, В. С. КАРЗАКОВА¹, В. Л. ДЕМИН¹, канд. техн. наук,
С. Л. ЧАВУШЬЯН²

*ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, Москва,
пр. Вернадского, 78. E-mail: mgupi.tyurina@mail.ru*

ФГБОУ ВО «РГХПУ им. С. Г. Строганова», 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 9, стр. 1

Поступила в редакцию 14.08.2023

После доработки 27.08.2023

Принята к публикации 31.08.2023

Предметы декоративно-прикладного искусства, представляющие историческую ценность, со временем под воздействием внешних факторов претерпевают физико-механические изменения. Например, стекловидные эмали могут терять блеск, растрескиваться, а археологические предметы могут пострадать из-за процессов коррозии стекла и металлической основы. Поэтому важной задачей представляется разработка подходов к реставрации изделий со стекловидными эмалями. В настоящей работе исследована возможность применения оптически прозрачных эпоксидных смол в качестве реставрационного материала при работе с предметами культурного наследия, заключающейся в восстановлении стекловидных эмалей. Для оценки допустимости применения материала в качестве реставрационного была разработана и опробована методика ускоренных испытаний.

Ключевые слова: стекловидные эмали, реставрация, оптически прозрачные смолы, культурное наследие

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-99-107

ЛИТЕРАТУРА

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

1. Abrams H. N. Enamels of Limoge, 1100-1350. The Metropolitan Museum of Art, New York // Speculum (The University of Chicago Press). – 2000. – N 3, V. 75. – P. 670–671.
2. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров. – М.: Мир, 1988.
3. Мукменёва Е. Н., Нугуманова Г. Н. Старение полимеров и полимерных материалов под действием окружающей среды и способы стабилизации их свойств. Учебное пособие. Ч 2. – Казанский НИТУ, 2017. – 228 с.
4. Сафонов В. В., Третьякова А. Е. Свет и цвет: взаимосвязь. Учебное пособие. Изд. 2-е. – СПб.: Лань, 2023. – 196 с.
5. Никитин М. К., Мельникова Е. П. Химия в реставрации. Справочное пособие – Л.: Химия, 1992. – 304 с.
6. Степина И. В., Земскова О. В., Козлова И. В., Корытин А. А. Химия в реставрации. Учебное пособие. – М.: МИСИ – МГСУ, 2020. – 62 с.
7. Тюрина С. А., Чавушьян С. Л., Макарова А. В., Хвостов Р. Е., Юдин Г. А. Исследование и анализ методик предотвращения потускнения серебряных сплавов // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 4 (104). – С. 170–181. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-170-181
8. ChaoWu, Bing ChenMeng, Lik-hoTam, LiHe. Yellowing mechanisms of epoxy and vinyl ester resins under thermal, UV and natural aging conditions and protection methods // Polymer Testing. – 2022. – No 114(2). – Pub Date: 2022-07-18. DOI:10.1016/j.polymeresting.2022.107708.
9. ГОСТ 9.401–2018 Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов.
10. ГОСТ 31975–2017 (ISO 2813:2014). Межгосударственный стандарт. Материалы лакокрасочные. Метод определения блеска лакокрасочных покрытий под углом 20°, 60° и 85°.
11. Tyurina S. A., Chavushyan S. L., Makarova A. V., Khvostov R. E., Yudin G. A. Research and Analysis of Methods for Preventing Silver Alloys from Tarnishing // Inorganic Materials: Applied Research. – 2021. – V. 12. – P. 1615–1622.
12. ГОСТ 24621–91. Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору).

УДК 678.067.5:620.199

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ
НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СТЕКЛОАРМИРОВАННОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО**

А. О. КУРНОСОВ, А. В. СЛАВИН, д-р техн. наук, А. Г. ГУНЯЕВА канд. техн. наук,
М. А. КАПУСТЯНСКАЯ, А. И. ГУЛЯЕВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 22.08.2023

После доработки 1.09.2023

Принята к публикации 5.09.2023

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния внешних факторов (натурная экспозиция в климатических зонах, таких как умеренный климат и климат с промышленной атмосферой, при ускоренных климатических испытаниях в термовлажностной камере, при термическом старении, при выдержке в технических средах), воздействующих на микроструктуру и физико-механические характеристики стеклоармированного полимерного композиционного материала марки ВПС-72 на основе полиимидного связующего марки ВС-51. Состояние поверхности образцов стеклопластика после экспозиции исследовали в течение 1 года.

Ключевые слова: ПКМ, полимерные полиимидные связующие, стеклопластик, микроструктура, внешние воздействующие факторы

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-108-118

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Без новых материалов – нет будущего // *Металлургия: тенденции развития*. – 2013. – № 12. – С. 4–8.
2. Вешкин Е. А., Старцев В. О., Постнов В. И., Баранников А. А. Климатические воздействия как оценка ремонтпригодности изделий из углепластика // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2019. – № 8. – Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-98-108.
3. Каблов Е. Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // *75 лет. Авиационные материалы*. – М.: ВИАМ, 2007. – С. 20–26.
4. Каблов Е. Н. Материалы для авиакосмической техники. // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. – 2007. – № 5. С. – 7–27.
5. Гуняева А. Г., Курносов А. О., Гуляев И. Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2021. – № 1. – Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
6. Курносов А. О., Вавилова М. И., Мельников Д. А. Технологии производства стеклянных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков. // *Авиационные материалы и технологии*. – 2018. – № 1. – С. 64–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70.
7. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. – 2018. – № 2. – С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
8. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of aviation polymer composite materials: I. Influence of significant factors // *Russian metallurgy (Metally)*. – 2020. – № 4. – P. 364–372.
9. Каблов Е. Н., Лаптев А. Б., Прокопенко А. Н., Гуляев А. И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1: Связующие // *Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-техн. журн.* – 2021. – № 4. – Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 09.02.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
10. Андреева Н. П., Павлов М. Р., Николаев Е. В., Курносов А. О. Исследование влияния воздействия атмосферных факторов на свойства полимерного конструкционного стеклопластика на цианэфирной основе в естественных условиях холодного, умеренного и тропического климата // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2019. – № 3. – Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-105-114.
11. Старцев О. В., Махоньков А. Ю., Деев И. С., Никишин Е. Ф. Исследование старения углепластика КМУ-4л после 12 лет экспонирования на Международной космической станции методом динамического механического анализа. Ч. 2: Влияние места расположения пластин в многослойных пачках // *Вопросы материаловедения*. – 2013. – № 4 (76). – С. 69–76.
12. Старцев В. О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытия в умеренно-теплом климате: специальность 05.16.09 «Материаловедение (по отраслям)» // *Дис. ... д-ра технич. наук*. – М.: ВИАМ, 2018. – 297 с.
13. Ефимов В. А., Кириллов В. Н., Добрянская О. А., Николаев Е. В., Шведкова А. К. Методические вопросы проведения натурных климатических испытаний полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2010. – № 4. – С. 25–31.
14. Startsev O. V., Krotov A. S., Startseva L. T. Interlayer shear strength of polymer composite materials during long term climatic ageing // *Polymer Degradation and Stability*. – 1999. – V. 63. – P. 183–186.
15. Гуляев А. И., Шуртаков С. В. Количественный анализ микроструктуры граничного слоя «волокно–матрица» в углепластиках // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2016. – № 7. – Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-8-8.
16. Старцев В. О. Система климатических испытаний авиационных материалов НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ // *Мат. VII Всерос. науч.-техн. конф. «Климат-2022: современные подходы*

УДК 678.067:685.6

ОБЗОР ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СПОРТИВНОГО ИНВЕНТАРЯ

О. Н. КЛИМЕНКО, М. И. ВАЛУЕВА, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 27.06.2023

После доработки 11.07.2023

Принята к публикации 12.07.2023

Представлен обзор научно-технической литературы (периодические издания, патенты на изобретения), посвященной созданию изделий для спортивной отрасли из полимерных композиционных материалов. Рассмотрены технологии и технические решения, применяемые для достижения поставленных задач, преимущества и недостатки использования методов. Показано, что применение современных достижений материаловедения – нового поколения материалов и передовых технологий может способствовать достижению высоких спортивных результатов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, ПКМ, армирующие наполнители, индустрия спорта, технологии, технические решения

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-119-132

ЛИТЕРАТУРА

1. Спорт: новые рекорды и спортивные победы [электрон. ресурс]. UMATEX. URL: <https://umatex.com/applications/sport/> (дата обращения 23.10.2020).
2. Бондалетова Л. И., Бондалетов В. Г. Полимерные композиционные материалы. Ч. 1: Уч. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 7–8.
3. Пат. РФ 2472559. № 2010108680/12. Усовершенствованная конструкция спортивной клюшки. Заявл. 21.08.2008; опубл. 20.01.2013 // Бюл. № 27.
4. Пат. US 5303916. № 954156. Hockey stick shaf. Заявл. 30.09.1992; опубл. 19.04.1994.
5. Пат. РФ 2113877. № 96110292/12. Теннисная ракетка. Заявл. 22.08.1995; опубл. 27.06.1998.
6. Пат. РФ 2509651С1. № 2013107517/05. Препрег, армированный волокнами композитный материал и способ производства препрега. Заявл. 20.07.2011; опубл. 20.03.2014 // Бюл. № 8.
7. Пат. РФ 175244U1. № 2017117041U. Кий бильярдный. Заявл. 16.05.2017; опубл. 28.11.2017.
8. Клименко О. Н., Валужева М. И., Рыбникова А. Н. Полимерные и полимерные композиционные материалы в спорте (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2020. – № 10, ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 23.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-81-89.
9. Пат. РФ 2095110С1. № 93019928/12. Коньки. Заявл. 16.04.1993; опубл. 10.11.1997.
10. Пат. РФ 187059. № 2018121639. Лыжа с нагревом скользящей поверхности. Заявл. 14.06.2018; опубл. 15.02.2019 // Бюл. № 5.
11. Пат. РФ 2423235. № 2008101536/05. Способ выполнения упрочнения для композитного материала с переменным профилем прочности, упрочнение, полученное указанным способом. Заявл. 15.06.2006; опубл. 10.07.2011 // Бюл. №19.
12. Пат. РФ 212992U1. № 2022102915. Доска для вейксерфинга. Заявл. 07.02.2022; опубл. 17.08.2022 // Бюл. № 23.
13. Спортивный инвентарь [электрон. ресурс]. Neva Technology. URL: <https://zundtec.ru/index.php/reshen/komp/sportivnyj-inventar> (дата обращения 23.10.2020).
14. Пат. РФ 2452649. № 2011105881/1.1 Рама велосипеда. Заявл. 17.02.2011; опубл. 10.06.2012 // Бюл. № 16.

15. Пат. РФ 2062727С1. № 93006175/28. Беговая качалка. Заявл. 02.02.1993; опубл. 27.06.1996.
 16. Пат. РФ 22885U1. № 2001134758/20U. Гимнастический трамплин. Заявл. 25.12.2001; опубл. 10.05.2002.
 17. Пат. РФ 22886U1. № 2001134759/20U. Конь гимнастический. Заявл. 25.12.2001; опубл. 10.05.2002.
 18. Пат. РФ 2050879С1. № 92012699/12. Спортивный шест для прыжков в высоту и полимерный композиционный материал для его изготовления. Заявл. 17.12.1992; опубл. 27.12.1995.
 19. Шелемет Н. Ю., Чуйков А. С. Композиционные материалы для облегчения конструкции спортивного инвентаря [электрон. ресурс]. URL: <https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/56549/1/> (дата обращения 23.06.2023).
 20. Основные технологические процессы формообразования изделий из ПКМ [электрон. ресурс]. Helpiks.org. URL: <https://helpiks.org/6-33409.html> (дата обращения 23.10.2020).
 21. Пат. РФ 218.016.15Е9. № 0002635137. Способ изготовления клюшки из полимерных композиционных материалов. Заявл. 09.11.2017; опубл. 20.01.2018.
 22. Методы производства углепластиков [электрон. ресурс]. Graphite PRO. URL: <http://graphite-pro.ru/technology/карбон/> (дата обращения 23.10.2020).
 23. Особенности и преимущества карбона. Его недостатки и способы имитации [электрон. ресурс]. URL: <https://sk-arsenal.ru/osobennosti-i-preimushchestva-karbona-ego-nedostatki-i-sposoby.html>.
 24. Пат. РФ 2718831. № 2019132095. Эпоксидное связующее, препрег на его основе и изделие, выполненное из него. Заявл. 10.10.2019; опубл. 14.04.2020 // Бюл. № 11.
- УДК 678.743.41:621.891

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ ТИПОВ КОНТРЕТЕЛ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

А. П. ВАСИЛЬЕВ, канд. техн. наук, Н. Н. ЛАЗАРЕВА, канд. техн. наук,
А. А. ОХЛОПКОВА, д-р техн. наук, Т. С. СТРУЧКОВА, канд. техн. наук, А. Г. АЛЕКСЕЕВ

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

Поступила в редакцию 5.10.2023

После доработки 26.10.2023

Принята к публикации 1.11.2023

Представлены результаты исследования воздействия контртел разных типов на триботехнические свойства политетрафторэтилена (ПТФЭ). Приведены характеристики полимера, шероховатость и твердость контртел из меди, алюминия, латуни и стали марки 45. Показано, что наилучшая износостойкость получена для пары трения политетрафторэтилена со сталью марки 45 и латунью. Проведены исследования поверхностей трения контртел и полимера методами оптической, электронной микроскопии и ИК-спектроскопии.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, износостойкость, коэффициент трения, контртело, поверхность трения

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-116-4-133-143

ЛИТЕРАТУРА

1. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. – 2018. – V. 1, N 1. – P. 3–39. DOI: 10.1016/j.aiepr.2018.05.001.
2. Колосова А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С. Современные методы получения полимерных композиционных материалов и изделий из них // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 8. – С. 123–129.

3. Amenta F., Bolelli G., D'Errico F., Ottani F., Pedrazzi S., Allesina G., Bertarini A., Puddue P., Lusvarghi L. Tribological behaviour of PTFE composites: Interplay between reinforcement type and counterface material // *Wear*. – 2022. – V. 510. – P. 204498. DOI: [10.1016/j.wear.2022.204498](https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204498).
4. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Попов С. Н., Слепцова С. А. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена // *Российский химический журнал*. – 2008. – Т. 52. – № 3. – С. 147–152.
5. Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Передельская О. А., Наумова А. В. Технология изготовления деталей узлов трения из полимерных композиционных материалов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 13–19.
6. Васильев А. П., Данилова С. Н., Дьяконов А. А., Охлопкова А. А., Стручкова Т. С. Влияние термически обработанного политетрафторэтилена на триботехнические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. – 2022. – Т. 15, № 7 (15). – С. 850–860. DOI: [10.17516/1999-494X-0440](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0440).
7. Пугачев А. К., Росляков О. А. Переработка фторопластов в изделия // *Л.: Химия*. – 1987. – 168 с.
8. Alam K. I., Dorazio A., Burris D. L. Polymers tribology exposed: eliminating transfer film effects to clarify ultralow wear of PTFE // *Tribology Letters*. – 2020. – V. 68, N 2. – P. 1–13. DOI: [10.1007/s11249-020-01306-9](https://doi.org/10.1007/s11249-020-01306-9).
9. Man J., Zhao J., Song L., Yang H. Study the influence of surface morphology and lubrication pressure on tribological behavior of 316L–PTFE friction interface in high-water-based fluid // *Coatings*. – 2020. – V. 10, N 4. – P. 405. DOI: [10.3390/coatings10040405](https://doi.org/10.3390/coatings10040405).
10. Huang R. et al. Wear evolution of the glass fiber-reinforced PTFE under dry sliding and elevated temperature // *Materials*. – 2019. – V. 12, N 7. – P. 1082. DOI: [10.3390/ma12071082](https://doi.org/10.3390/ma12071082).
11. Козырев Ю., Седакова Е. Особенности износа политетрафторэтилена и промышленного композита Ф4К20 при трении по углеродистой и легированной сталям // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2018. – № 4. – С. 73–80.
12. Sedakova E. B., Kozyrev Y. P. Physical and Chemical Explanation of the Choice of a Counterbody Material for Friction Pairs with Polymer Materials // *Journal of Friction and Wear*. – 2019. – V. 40. – N 4. – P. 337–341. – DOI [10.3103/S106836661904010X](https://doi.org/10.3103/S106836661904010X).
13. Седакова Е. Б., Козырев Ю. П., Сяньшунь Л., Жаров В. Е. Анализ причин снижения износостойкости полимерных материалов в парах трения с легированной сталью // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2020. – Т. 63. – № 4. – С. 302–309.
14. Sawae Y., Yamaguti A., Nakashima K., Murakami T., Sugimura J. Effects of hydrogen atmosphere on wear behavior of PTFE sliding against austenitic stainless steel // *International Joint Tribology Conference*. – 2007. – V. 48108. – P. 43–45. DOI: [10.1115/IJTC2007-44285](https://doi.org/10.1115/IJTC2007-44285).
15. Johansson P., Marklund P., Björling M., Shi Y. Effect of humidity and counterface material on the friction and wear of carbon fiber reinforced PTFE composites // *Tribology International*. – 2021. – V. 157. – P. 106869. DOI: [10.1016/j.triboint.2021.106869](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106869).
16. Wang C. B., Yan M. F., Wang Y. The influence of metal surface composition on the tribological properties of filled PTFE/steel couples // *Tribology international*. – 2004. – V. 37, N. 8. – P. 645–650. DOI: [10.1016/j.triboint.2004.01.012](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.01.012).
17. Onodera T., Nakakawaji T., Adachi K., Kurihara K., Kubo M. Tribochemical degradation of polytetrafluoroethylene catalyzed by copper and aluminum surfaces // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2016. – V. 120, N 20. – P. 10857–10865. DOI: [10.1021/acs.jpcc.6b00799](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b00799).
18. Епифанцев К. В. Возможности профилометра TR220 при оценке влияния царапин на органическом стекле на шероховатость его поверхности // *Инновации и инвестиции*. – 2021. – № 11. – С. 108–112.
19. Никитина А. В., Васильев А. П., Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Алексеев А. Г. Влияние способов активации оксида титана на свойства и структуру политетрафторэтилена // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2022. – № 2 (42). – С. 46–52. DOI: [10.25699/SSSB.2022.42.2.007](https://doi.org/10.25699/SSSB.2022.42.2.007).

20. Кохановский В. А., Петров Ю. А., Мукутадзе М. А., Сергеева М. Х. Контртела в трибосистемах с фторопластсодержащим покрытием // Вестник Донского государственного технического университета. – 2007. – Т. 7, № 2. – С. 177–181.

21. Puts G. J., Crouse P., Ameduri B. M. Polytetrafluoroethylene: synthesis and characterization of the original extreme polymer // Chemical reviews. – 2019. – V. 119, N 3. – P. 1763–1805. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00458.

22. Terwisscha-Dekker H., Hogenelst T., Bliem R., Weber B., Bonn D. Why Teflon is so slippery while other polymers are not // Physical Review E. – 2023. – V. 107, N 2. – P. 024801.

23. Tzanakis I. Conte M., Hadfield M., Stolarski T. A. Experimental and analytical thermal study of PTFE composite sliding against high carbon steel as a function of the surface roughness, sliding velocity and applied load // Wear. – 2013. – V. 303, N 1–2. – P. 154–168. DOI: 10.1016/j.wear.2013.02.011.

24. Parlar Z., Samankan S., Temiz V. The effect of counter-face roughness on the tribological behavior of filled and unfilled PTFE // J. Mech. Eng. Autom. – 2015. – V. 5. – P. 609–615. DOI: 10.17265/2159-5275/2015.11.003.

25. Гольдаде В. А., Струк В. А., Песецкий С. С. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем. – М.: Химия, 1993. – 240 с.

26. Кравец Л. И., Гильман А. Б., Яблоков М. Ю., Алтынов В. А., Орелович О. Л. Формирование композитных мембран, содержащих гидрофобные полимерные слои, методом электронно-лучевого диспергирования в вакууме // Химия высоких энергий. – 2016. – Т. 50, № 6. – С. 485–490. DOI 10.7868/S0023119316060103.

УДК 678.073:620.199–973

ВЛИЯНИЕ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ, НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ (ОБЗОР)

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

Поступила в редакцию 25.10.2023

После доработки 7.11.2023

Принята к публикации 9.11.2023

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

² ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина», 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77

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

Настоящая работа посвящена обзору исследований, направленных на изучение влияния внешних воздействующих факторов, характерных для арктической зоны, на свойства полимерных материалов и полимерных композитов. В представленных работах изучено влияние таких факторов, как низкие температуры, термоциклирование, повышенная влажность и других агрессивных условий внешней среды на прочностные свойства ряда терморезистивных и термопластичных матриц, а также композитов на их основе. Проведен сравнительный анализ стойкости различных материалов к неблагоприятным климатическим факторам, характерным для арктического климата. Данный обзор может быть использован при выборе материалов для работы в арктической и субарктической зоне, а также в других регионах, где возможно влияние описанных факторов при эксплуатации изделий, машин и сооружений.

Ключевые слова: конструкционные материалы, арктические условия, пониженные температуры, физико-механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-144-168

ЛИТЕРАТУРА

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

1. Климатические испытания по оценке стойкости материалов к условиям морского арктического и субарктического климатов / Н. П. Андреева и др. // *Новости материаловедения. Наука и техника.* – 2016. – №. 6. – С. 3–12.
2. Шеин Е. А., Дориомедов М. С., Дасковский М. И. Современные материалы для работы в условиях арктического климата // *Новости материаловедения. Наука и техника.* – 2016. – №. 1. – С. 49–56.
3. Buznik V. M., Kablov E. N. Arctic materials science: current state and prospects // *Herald of the Russian Academy of Sciences.* – 2017. – V. 87. – P. 397–408. DOI 10.1134/S101933161705001X
4. Хлусова Е. И., Сыч О. В. Создание хладостойких конструкционных материалов для Арктики. История, опыт, современное состояние // *Инновации.* – 2018. – №. 11 (241). – С. 85–92.
5. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Часть 1. Принципы легирования и требования к структуре листового проката // *Вопросы материаловедения.* – 2018. – № 3. – С. 22–47.
6. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Часть 2. Технология производства, структура и характеристики работоспособности листового проката // *Вопросы материаловедения.* – 2018. – №. 4. – С. 14–41.
7. Анализ научно-технической и патентной литературы в области создания морозостойких полимерных материалов / П. Н. Петрова и др. // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures.* – 2017. – № 2. – С. 53–65. DOI 10.17804/2410-9908.2017.2.053-065
8. Wigley D. A. Mechanical properties of materials at low temperatures // *Cryogenics.* – 1968. – V. 8, N 1. – P. 3–12. DOI 10.1016/S0011-2275(68)80042-6
9. Lord H. W., Dutta P. K. On the design of polymeric composite structures for cold regions applications // *Journal of reinforced plastics and composites.* – 1988. – V. 7, N 5. – P. 435–458. DOI 10.1177/073168448800700503
10. Мостовой А. С., Нуртазина А. С., Кадыкова Ю. А. Эпоксидные композиты с повышенными эксплуатационными характеристиками, наполненные дисперсными минеральными наполнителями // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий.* – 2018. – Т. 80, № 3 (77). – С. 330–335. DOI 10.20914/2310-1202-2018-3-330-335
11. Morphological changes in epoxy resin (DGEBA/TETA) exposed to low temperatures / P. Suma Sindhu et al. // *Journal of Adhesion Science and Technology.* – 2020. – V. 34, N. 20. – P. 2262–2273. DOI 10.1080/01694243.2020.1756157
12. Torabizadeh M. A. Tensile, compressive and shear properties of unidirectional glass/epoxy composites subjected to mechanical loading and low temperature services // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* – 2013. – V. 20. – P. 299–309.
13. Dutta P. K. Structural fiber composite materials for cold regions // *Journal of Cold Regions Engineering.* – 1988. – V. 2, N. 3. – P. 124–134.
14. Freeze–thaw resistance of unidirectional-fiber-reinforced epoxy composites / H. Li et al. // *Journal of Applied Polymer Science.* – 2012. – T. 123, N 6. – С. 3781–3788. DOI 10.1002/app.34870
15. Development of Construction and Repair Materials Used in Transport and Technological Machines Operating in the Arctic / E. Kosenko et al. // *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences.* – 2021. – V. 346. – P. 03019. DOI 10.1051/mateconf/202134603019
16. Effect of aramid pulp on low temperature flexural properties of carbon fibre reinforced plastics / Y. Hu et al. // *Composites Science and Technology.* – 2020. – V. 192. – Art. 108095. DOI 10.1016/j.compscitech. 2020.108095
17. Compressive behavior of cenosphere/epoxy syntactic foams in arctic conditions / Shahapurkar K. et al. // *Composites Part B: Engineering.* – 2018. – V. 135. – P. 253–262. DOI 10.1016/j.compositesb. 2017.10.006
18. Low-velocity impact response of woven carbon composites in arctic conditions / A. G. Castellanos et al. // *Journal of Dynamic Behavior of Materials.* – 2018. – V. 4. – P. 308–316. DOI 10.1007/s40870-018-0160-8

19. Damping properties of thermoplastic-elastomer interleaved carbon fiber-reinforced epoxy composites / H. Kishi et al. // *Composites Science and technology*. – 2004. – Т. 64, N 16. – С. 2517–2523. DOI 10.1016/j.compscitech.2004.05.006
20. Analysis of low temperature impact fracture data of thermoplastic polymers making use of an inverse methodology / V. Pettarin et al. // *Engineering fracture mechanics*. – 2006. – V. 73, N 6. – P. 738–749. DOI 10.1016/j.engfracmech.2005.10.005
21. Fracture resistance of mineral reinforced polyamide 6 / C. J. G. Plummer et al. // *Polymer*. – 2004. – Т. 45, N 4. – С. 1147–1157.
22. Zhang Z., Hartwig G. Low-temperature viscoelastic behavior of unidirectional carbon composites / *Cryogenics*. – 1998. – V. 38, N 4. – P. 401–405
23. Low temperature effect on impact energy absorption capability of PEEK composites / D. Garcia-Gonzalez et al. // *Composite Structures*. – 2015. – V. 134. – P. 440–449. DOI 10.1016/j.compstruct.2015.08.090
24. Jeng C. C., Chen M. Flexural failure mechanisms in injection-moulded carbon fibre/PEEK composites // *Composites science and technology*. – 2000. – V. 60, N 9. – P. 1863–1872. DOI 10.1016/S0266-3538(00)00076-2
25. Karger-Kocsis J., Friedrich K. Temperature and strain-rate effects on the fracture toughness of poly (ether ether ketone) and its short glass-fibre reinforced composite // *Polymer*. – 1986. – V. 27, №. 11. – P. 1753–1760. DOI 10.1016/0032-3861(86)90272-7
26. Rohart V., Lebel L. L., Dubé M. Influence of freeze/thaw cycling on the mechanical performance of resistance-welded carbon fibre/polyphenylene sulphide composite joints // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2020. – V. 39, N 21–22. – P. 837–851 DOI 10.1177/0731684420933681
27. Correlation between thermo-mechanical properties and chemical composition of aged thermoplastic and thermosetting fiber reinforced plastic materials: Korrelation zwischen thermomechanischen Eigenschaften und chemischer Zusammensetzung von gealterten thermo- und duroplastischen faserverstärkten Kunststoffen / A. Messana et al. // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. – 2017. – V. 48, N 5. – P. 447–455. DOI 10.1002/mawe.201700024
28. IEC 60068–2-38 Edition 2009–01. Environmental testing – Part 2–38 Tests – Test Z/AD, IEC International Standard. – 17 p.
29. Costa A. P., Botelho E. C., Pardini L. C. Influence of environmental conditioning on the shear behavior of poly (phenylene sulfide) / glass fiber composites // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2010. – V. 118, N 1. – P. 180–187. DOI 10.1002/app.32295
30. Arici A. A. Effect of hygrothermal aging on polyetherimide composites // *Journal of reinforced plastics and composites*. – 2007. – V. 26, N 18. – P. 1937–1942. DOI 10.1177/0731684407082630
31. Baschek G., Hartwig G., Zahradnik F. Effect of water absorption in polymers at low and high temperatures // *Polymer*. – 1999. – V. 40, N 12. – P. 3433–3441 DOI 10.1016/S0032-3861(98)00560-6

УДК 621.791.052:669.788

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ШВА НА ДИФфуЗИЮ ВОДОРОДА В ЗОНУ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Я. АЛДАИЕ, В. А. КАРХИН, д-р техн. наук, П. Н. ХОМИЧ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 16.08.2023

После доработки 24.08.2023

Принята к публикации 31.08.2023

Изложено аналитическое решение одномерной задачи диффузии водорода в стыковых разнородных сварных соединениях с учетом таких параметров, как толщина сварного соединения, толщина шва, коэффициенты диффузии и растворимости, а также начальные концентрации водорода в металле шва и основном металле. Рассмотрено влияние микроструктуры на кинетику водорода в

© 2023

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

однородных и разнородных сварных соединениях. Показано, что концентрация водорода в зоне термического влияния (ЗТВ) в большой степени зависит от отношений начальных концентраций, коэффициентов диффузии и растворимостей водорода в металле шва и основном металле. При сварке мартенситной стали аустенитными электродами концентрация водорода в ЗТВ уменьшается на три порядка по сравнению с однородными соединениями.

Ключевые слова: сварка, сталь, водород, диффузия, сварное соединение, зона термического влияния

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-169-178

ЛИТЕРАТУРА

1. Походня И. К., Явдошин И. Р., Пальцевич А. П., Швачко В. И., Котельчук А. С. *Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами.* – Киев: Наукова думка, 2004. – 445 с.
2. Макаров Э. Л., Якушин Б. Ф. *Теория свариваемости сталей и сплавов.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 487 с.
3. Lippold J. C. *Welding metallurgy and weldability.* – New York: John Wiley and Sons, 2015. – 400 pp.
4. Andersson B. A. B. Diffusion and trapping of hydrogen in a bead-on-plate weld // *Transactions of the ASME. Journal of Engineering Materials and Technology.* – 1980. – V. 102, N 1. – P. 64–72.
5. Кархин В. А., Мнушкин О. С. Расчетная методика выбора конструктивно-технологического варианта сварного соединения с заданной сопротивляемостью образованию холодных трещин. 2. Расчет состояния сварного соединения и экспериментальная проверка методики // *Сварочное производство.* – 1988. – № 5. – С. 33–35.
6. Fjær H. G., Aas S. K., Olden V., Lindholm D., Akselsen O. M. Simulation of multipass welding of a steel pipe including modelling of hydrogen diffusion and fracture mechanics assessment / C. Sommitsch and N. Enzinger (Eds.) // *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 10.* – Graz: Verlag der Technischen Universität Graz. – 2013. – P. 371–399.
7. Кархин В. А., Левченко А. М., Хомич П. Н. Модель диффузии водорода при сварке высокопрочных сталей // *Сварочное производство.* – 2020. – № 10. – С. 3–15.
8. Кархин В. А., Алдаие Я., Старобинский Е. Б., Левченко А. М. Анализ распределения водорода в неоднородных сварных соединениях // *Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности // Сб. статей I Международной научно-технической конференции.* – Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 24–25 ноября 2022 года. – С. 84–90.
9. Карслоу Г., Егер Д. *Теплопроводность твердых тел.* – М.: Наука, 1964. – 488 с.
10. Кархин В. А., Маркс О. Ю. Анализ влияния разнородности сварного соединения на концентрацию водорода в зоне термического влияния // *Автоматическая сварка.* – 1994. – № 2. – С. 9–14.
11. Кархин В. А., Алдаие Я., Левченко А. М. Коэффициент диффузии водорода в свариваемых сталях // *Сварка и диагностика.* – 2021. – № 6. – С. 20–27.
12. Алдаие Я., Кархин В. А., Левченко А. М. Растворимость водорода в свариваемых сталях // *Сварка и диагностика.* – 2022. – № 3. – С. 25–31.

УДК 621.791.042

СИСТЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

В. Б. ГРИБАНОВА, П. В. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, О. И. ГРИБКОВ, Н. А. ЛУКЬЯНОВА

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

Поступила в редакцию 28.09.2023

После доработки 4.10.2023

Принята к публикации 5.10.2023

© 2023

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

Выполнен анализ отечественного рынка порошковой проволоки, применяемой для сварки низколегированных высокопрочных судостроительных сталей. Установлено, что для обеспечения гарантированного значения предела текучести металла шва от 420 до 620 МПа за основу принимаются такие системы легирования, как Mn–Si, Mn–Si–Ni и Mn–Si–Ni–Mo. Экспериментально установлено влияние применяемых в данных системах легирующих элементов на формирование микроструктуры и свойств сварных швов.

Ключевые слова: порошковые сварочные проволоки, механизированная сварка в защитных газах, хладостойкость, высокопрочные стали, легирование сварных швов

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-179-186

ЛИТЕРАТУРА

1. Походня И. К., Ступтель А. М., Шлепаков В.Н. Сварка порошковой проволокой. – Киев: Наукова думка, 1972. – 224 с.
2. Иоффе И. С., Ханпетов М. В. Сварка порошковой проволокой. – М.: Высшая школа, 1986. – 95 с.
3. Мельников П. В. Разработка порошковых проволок малого диаметра для сварки в защитном газе, обеспечивающих хладостойкость металла шва при температурах до минус 60°C // Дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2011. – 137 с.
4. Карасев М. В., Работинский Д. Н., Калинин М. М., Волобуев Ю. С., Потапов Н. Н., Скутин В. С., Виханский Н. И., Тропин В. В. Особенности технологии производства и применения сварочных порошковых проволок для сварки в защитных газах // Тяжелое машиностроение – 2021 – № 1–2 – С.18–26.
5. Будниченко М. А., Аввакумов Ю. В. Внедрение современных сварочных материалов в кораблестроении. Разработка высокопроизводительной технологии механизированной сварки конструкций из высокопрочной стали с использованием порошковой проволоки ПП-А22/9 (Св-03Х22Н9АМЗ) в смеси защитных газов // Морской вестник – 2018. – № 3 (67). – С.51–56.
6. Мазур А. А., Маковецкая О. К., Пустовойт С. В., Бровченко Н. С. Порошковые проволоки на мировом и региональных рынках сварочных материалов (обзор) // Автоматическая сварка – 2015. – № 5–6 – С. 68–74
7. Шлепаков В. Н., Котельчук А. С., Гаврилюк В. А. Современные порошковые проволоки для сварки низколегированных сталей повышенной и высокой прочности // Автоматическая сварка. – 2017. – № 11 (769). – С. 13–18.
8. Розерт Р. Применение порошковой проволоки для сварки в промышленных условиях // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6–7. – С. 60–64.
9. Сварочные материалы KOBELCO: официальный сайт. <https://www.kobelco-welding.jp/russian>
10. ЭСАБ производство оборудования и расходных материалов для сварки и резки: официальный сайт. <https://www.esab.ru/ru/ru/index.cfm>
11. Производство сварочного оборудования и расходных сварочных материалов HYUNDAI WELDING: официальный сайт. <https://www.hyundaiwelding.com/rus/hdw/index>
12. Lincoln Electric все необходимое для сварки и резки, присадочные металлы, автоматизация: официальный сайт. <https://www.lincolnelectric.com/en>
13. Могильников В. А., Бишовков Р. В., Гежа В. В., Мельников П. В. Сварочные порошковые проволоки в судостроении // Сварочное производство. – 2019. – № 2. – С. 38–42.
14. Рыбаков А. А., Филипчук Т. Н., Костин В. А. Особенности микроструктуры и ударная вязкость металла сварных соединений труб из высокопрочной стали с ниобием и молибденом // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3–4. – С. 17–24.
15. Нохрина О. И., Рожихина И. Д., Дмитриенко В. И., Платонов М. А. Легирование и модифицирование стали с использованием природных и техногенных материалов. Монография – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. – 320 с.
16. Козырев Н. А., Усольцев А. А., Крюков Р. Е., Гусев А. И., Осетковский И. В. Эксплуатационные показатели новых порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – № 7(75). – С. 860–869.

УДК 621.791.75 (204.1)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ

КИАВ МИН СОЕ, В. В. МУРЗИН, канд. техн. наук, Г. В. ГЕРМАН, д-р техн. наук

*ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10. E-mail: ksv@smtu.ru*

Поступила в редакцию 13.11.2023

После доработки 29.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

При компьютерном моделировании теплообменных процессов возникает необходимость параметрического прогноза значений частных показателей многофакторных систем мокрой подводной сварки. Обеспечение достоверности такого прогноза позволяет использовать полученные модели для инженерных расчетов при проектировании технологических процессов сварки. На примере экспериментальных данных по оценкам газообразования в процессе горения дуги предложена апробированная в судостроительном производстве методика и получены математические зависимости, адекватные условиям выполнения работ, обеспечивающие минимальную погрешность оценки при изменении значений влияющих параметров.

Ключевые слова: мокрая подводная сварка, параметрические зависимости, установочная погрешность, прогноз показателей

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-187-192

ЛИТЕРАТУРА

1. Киав Мин Сое, Мурзин В. В., Карпов В. М. Исследование влияния режима подводной сварки на газообразование // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 3 (45), т. 2. – С. 111–115.

2. Герман Г. В., Черненко В. И., Резник Б. Л., Черкас Д. Д. Расчетно-аналитические методы и их использование при решении задач технологической подготовки машиностроительного и судостроительного производств: Учебное пособие. – СПб.: РИО СПбГМТУ, 2015. – 63 с.

3. Герман Г. В., Ляховский Е. Е., Резник Б. Л. Снижение установочной погрешности при оценке трудоемкости производственных процессов в судостроении // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 2, часть 1 (66). – С. 337–341.

4. Киав Мин Сое, Мурзин В. В. Разработка физических моделей для расчета тепловых полей при мокрой подводной сварке // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 3, т. 1. – С. 60–64.

УДК 621.791.75 (204.1)

ИТОГОВАЯ ОЦЕНКА МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ В СИСТЕМЕ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

КИАВ МИН СОЕ, В. В. МУРЗИН, канд. техн. наук, Г. В. ГЕРМАН, д-р техн. наук

*ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10. E-mail: ksv@smtu.ru*

Поступила в редакцию 13.11.2023

После доработки 29.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Многофакторность и взаимосвязь явлений, протекающих при сварке, особенно под водой, важны для углубления познаний в этой области. Анализ выполненных исследований и полученных решений в области мокрой подводной сварки низкоуглеродистых сталей показывает, что в названной области в полной мере не получены адекватные оценки эффективности различных видов сварки с комплексным учетом взаимодействия различных физических явлений, существенно отличающихся по природе друг от друга. Предложены укрупненные подходы к оценке и анализу коэф-

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

фициентов теплоотдачи со стороны поверхности горения дуги и с противоположной. Впервые значения потенциалов рассчитаны как изменение значений показателей теплоотдачи для различных условий сварки на основе верифицированных экспериментальных данных. Конечной целью работы является расчет скоростей охлаждения металла сварного соединения, которые в дальнейшем позволят прогнозировать механические свойства металла шва и вероятность образования закалочных структур.

Ключевые слова: мокрая подводная сварка, сварка на воздухе, положение сварного шва, коэффициент теплоотдачи, потенциалы теплоотдачи

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-193-198

ЛИТЕРАТУРА

1. Киав Мин Сое, Мурзин В. В., Карпов В. М. Исследование влияния режима подводной сварки на газообразование // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 3 (45), т. 2. – С. 111–115.
2. Киав Мин Сое, Мурзин В. В. Разработка физических моделей для расчета тепловых полей при мокрой подводной сварке // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 3, т. 1. – С. 60–64.
3. Сапиро Л. С. Окислительная способность водяного пара как защитной среды при сварке // Сварочное производство. – 1960. – № 4. – С. 31–32.
4. Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. – Киев: Вища школа, 1976. – 424 с.
5. Авилов Т. И. Исследование процесса дуговой сварки сталей под водой // Сварочное производство. – 1958. – № 5. – С. 12–14.
6. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке: Учебное пособие. – М.: ГНТИ машиностроительной литературы, 1981. – 296 с.
7. Герман Г. В., Никитин Н. В. Методы оценки производственно-технологических работ в судостроении // МИТ. – 2021. – № (54), т. 2. – С. 135–139.

УДК 669.45.018.24:669.89:620.193.4

ВЛИЯНИЕ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА КОРРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СВИНЦОВЫХ БАББИТОВ БКа, БСт, ББа (PbSb15Sn10) В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

И. Н. ГАНИЕВ^{1,2}, д-р. хим. наук, А. Х. ОДИНАЕВ¹, Ф. К. ХОДЖАЕВ¹, канд. техн. наук,
Х. М. ХОДЖАНАЗАРОВ¹, Х. О. ОДИНАЗОДА¹, д-р техн. наук

¹Таджикский технический университет им. М. С. Осими, 734042, г. Душанбе, пр. Академиков Раджабовых, 10, Республика Таджикистан. E-mail: ganievisatullo.48@mail.ru

²Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана, 734063 г. Душанбе, ул. Айни, 299/2, Республика Таджикистан

Поступила в редакцию 6.02.2023

После доработки 27.09. 2023

Принята к публикации 27.09. 2023

Приведены результаты исследования влияния модифицирующих добавок кальция, стронция и бария (от 0,01 до 1,0 мас. %) на анодное поведение свинцовых баббитов БКа, БСт, ББа (PbSb15Sn10) в среде электролита NaCl. Исследования проведены потенциостатическим способом в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с. Исследования показали, что в среде электролита потенциал свободной коррозии сплавов смещается в положительную сторону и с увеличением концентрации модификатора (кальция, стронция и бария) в свинцовых баббитах приобретает положительное значение. Добавка к свинцовому баббиту кальция (БКа (PbSb15Sn10Ca)) повышает его коррозионную стойкость на 10–15%, стронция БСт (PbSb15Sn10Sr) – на 15–20% и бария ББа (PbSb15Sn10Ba) – на 20–25%. Отмечено увеличение скорости коррозии сплавов независимо от их состава от концентрации NaCl в растворе. Показано, что рост концентрации хлорид-иона в электролите NaCl приводит к снижению потенциалов свободной коррозии, репассивации и питтингообразования сплавов.

Ключевые слова: свинцовые баббиты БКа, БСт, ББа (PbSb15Sn10), кальций, стронций, барий, потенциостатический метод, электрохимическое поведение, электролит NaCl, потенциал свободной коррозии, скорость коррозии.

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-199-207

ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.
2. Семенов А. П. Антифрикционные материалы: опыт применения и перспективы // Трение и смазка в машинах и механизмах. Машиностроение. – 2007. – № 12. – С. 21–36.
3. Хохлов Ю. Ю., Ковтунов А.И., Мямин С.В. Свойства композиционных подшипников скольжения // Труды IV Международной научно-технической конференции «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства», Тольятти, 2015. – С. 48–51.
4. Бешевли О. Б., Дуюн Т. А. Особенности теплового состояния баббитов при механической обработке. Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика // Сб. тр. Всероссийского совещания заведующих кафедрами материаловедения и технологии материалов. – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 29–34.
5. Шалунов Е. П., Смирнов В. М., Илларионов И. Е. Пути создания теплопрочных антифрикционных композиционных материалов матрично-наполненного типа для тяжело нагруженных элементов узлов трения // Материалы III Международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве», Чебоксары, 2017. – С. 300–313.
6. Потехин Б. А., Илюшин В. В., Христолюбов А. С. Влияние способов литья на структуру и свойства оловянного баббита // МиТОМ. – 2009. – № 8. – С. 16–21.
7. Орлина А. С., Круглова М. Г. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Т. 4. – М.: Машиностроение, 1990. – 289 с.
8. Мизгарев А. С. Математическое моделирование и исследование динамики системы управления с эталонной нейросетевой моделью для процесса резания баббита // Математические методы в технике и технологиях // ММТТ. – 2019. – Т. 9. – С. 35–38.
9. Никольский К. К. Защита от коррозии металлических кабелей. – М.: Связь, 1970. – 170 с.
10. Ганиев И. Н., Эсанов Н. Р., Хакимов А. Х., Умарова Т. М. Анодное поведение алюминиево-железого сплава АЖ2.18, легированного церием, празеодимом и неодимом, в водном растворе NaCl // Коррозия: материалы, защита. – 2022. – № 3. – С. 10–15.
11. Ганиев И. Н., Ниезов О. Х., Муллоева Н. М., Эшов Б. Б., Аминбекова М. С. Влияние добавок стронция и хлорид-иона на анодное поведение сплава SSu3 // Ползуновский вестник. ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – 2019. – № 2. – С. 143–150.
12. Ганиев И. Н., Ходжаназаров Х. М., Ходжаев Ф. К. Влияние добавок лития на коррозионно-электрохимическое поведение свинцового баббита БЛ (PbSb15Sn10Li) в среде электролита NaCl // Вестник Казанского государственного технического университета. им. А. Н. Туполева. – 2022. – № 1. – С. 7–12.
13. Ходжаназаров Х. М., Ганиев И. Н., Ходжаев Ф. К. Потенциодинамическое исследование свинцового баббита БК (PbSb15Sn10K) с калием в среде электролита 3%-ного NaCl // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2022. – № 1 (92). – С. 86–92.
14. Ганиев И. Н., Ходжаназаров Х. М., Ходжаев Ф. К., Одиназода Х. О. Влияние добавок калия на анодную устойчивость свинцового баббита БК (PbSb15Sn10K) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета // Химическая технология и биотехнология. – 2022. – № 1. – С. 52–63.
15. Ганиев И. Н., Ходжаназаров Х. М., Ходжаев Ф. К. Потенциодинамическое исследование свинцового баббита БТ (PbSb15Sn10) с натрием в среде электролита NaCl // Ползуновский вестник. ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова». – 2022. – № 1. – С. 126–133.

16. Фрейман Л. И., Макаров В. А., Брыксин И. Е. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите. – Л.: Химия, Ленинград отд., 1972. – 238 с.

УДК 621.039.531:539.422.22

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

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

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

Поступила в редакцию 29.06.2023

После доработки 4.09.2023

Принята к публикации 5.09.2023

Рассмотрена возможность определения сопротивления хрупкому разрушению (СХР) облученного в ионном ускорителе металла по результатам механических испытаний дисковых образцов. С целью оценки влияния ионного облучения на металл проведены испытания дисковых образцов в исходном и облученном состояниях путем их механического нагружения вплоть до разрушения, а также измерения микротвердости металла до и после облучения. Установлено, что микротвердость облученного металла значительно выше, чем необлученного. В то же время показано, что испытания образцов не позволяют оценить СХР облученного металла, так как разрушающие нагрузки в обоих случаях оказались практически одинаковыми. Проведенные расчеты и электронно-микроскопические исследования позволили предложить гипотезу вероятной причины полученных экспериментальных результатов. Предложено СХР облученного ионами металла оценивать по результатам измерения микротвердости.

Ключевые слова: ферритно-мартенситная сталь, облучение, ионный ускоритель, сопротивление хрупкому разрушению, механические испытания, микротвердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-208-226

ЛИТЕРАТУРА

1. Interactions of Ions with Matter: SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.srim.org> (дата обращения: 10.05.2023).
2. Busby J. T., Hash M. C., Was G. S. The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels // Journ. Nucl. Materials. – 2005. – V. 336. – P. 267–278.
3. РД ЭО 0027. Инструкция по определению механических свойств металлов оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. – Росэнергоатом, 2005.
4. Margolin B., Fomenko V., Shvetsova V., Yurchenko E. On the link of the embrittlement mechanisms and microcrack nucleation and propagation properties for RPV steels. Part I. Materials, study strategy and deformation properties // Engineering Fracture Mechanics. – 2022. – V. 267. – Art. 08400.
5. Margolin B., Fomenko V., Shvetsova V., Yurchenko E. On the link of the embrittlement mechanisms and microcrack nucleation and propagation properties for RPV steels. Part II. Fracture properties and modelling. // Engineering Fracture Mechanics. – 2022. – V. 270. – Art. 108556.
6. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G. Radiation embrittlement modelling in multi-scale approach to brittle fracture of RPV steels // Int. J. Fract. – 2013. – V. 179. – P. 87–108.
7. Margolin B. Z., Yurchenko E. V., Morozov A. M., Pirogova N. E., Brumovsky M. Analysis of a link of embrittlement mechanisms and neutron flux effect as applied to reactor pressure vessel materials of WWER // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 434. – P. 347–356.
8. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Prometey local approach to brittle fracture: development and application // EFM. – 2008. – V. 75. – P. 3483–3498.

9. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels // Fatigue Fract Eng Mater Struct. – 2006. – N 29(9). – P. 697–713.

10. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Fomenko V. N., Kostylev V. I., Shvetsova V. A. Further improvement of the Prometey model and unified curve method. Part 1. Improvement of the Prometey model // EFM. – 2017. – V. 182. – P. 383–402.

11. Hahn G.T., Averbach B.L., Owen W.S., Cohen M., Initiation of Cleavage Microcracks in Polycrystalline Iron and Steel. – MIT Press, Cambridge, Mass, and Wiley, New York, 1959. – P. 91–116.

12. Stroh A. N. The Formation of Cracks as a Result of Plastic Flow // Proc. Roy. Soc. (London). A223. – 1954. – P. 404–414.

13. Stroh A. N. The Formation of Cracks in Plastic Flow II // Proc. Roy. Soc. (London), A232. – 1955. – P. 548–560.

УДК 621.039.536.2:621.791.053

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ОХРУПЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛА СВАРНЫХ ШВОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 ПРИ ПРОДЛЕНИИ РЕСУРСА ДО 60 ЛЕТ И БОЛЕЕ

Д. Ю. ЕРАК, д-р техн. наук, В. Б. ПАПИНА, Д. А. ЖУРКО

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

Поступила в редакцию 11.05.2023

После доработки 3.08.2023

Принята к публикации 20.09.2023

Выполнена проверка корректности модельного предположения об аддитивности вкладов упрочняющего (образование дислокационных петель и радиационно-индуцированных преципитатов) и неупрочняющего (образование и накопление зернограничных сегрегаций) механизмов в итоговое радиационное охрупчивание материалов сварных швов корпусов реакторов ВВЭР-1000.

Представлены результаты эксперимента по получению прогнозных значений критической температуры хрупкости металла сварных швов с содержанием никеля 1,59–1,88% с использованием ускоренного облучения в исследовательском реакторе ИР-8 из состояний, характеризующихся до проведения облучения разным стартовым уровнем зернограничной сегрегации.

Предложена процедура учета эффекта флакса для полученных с использованием ускоренного облучения значений критической температуры хрупкости и выполнена проверка консервативности зависимости радиационного охрупчивания металла сварных швов, основанной на модельном предположении об аддитивности вкладов упрочняющего и неупрочняющего механизмов до значений флюенса быстрых нейтронов $\sim 75 \cdot 10^{22}$ нейтр./м².

Ключевые слова: сварной шов, критическая температура хрупкости, корпус реактора ВВЭР-1000, флюенс быстрых нейтронов, радиационное охрупчивание, эффект флакса, продление ресурса

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-227-243

ЛИТЕРАТУРА

1. Stoller R. E. The effect of neutron flux on radiation-induced embrittlement in reactor pressure vessel steels // Journal of ASTM international. – 2004. – V. 1, № 4.

2. Flux effect on neutron irradiation embrittlement of reactor pressure vessel steels irradiated to high fluences / N. Soneda, K. Dohi, K. Nishida, A. Nomoto et. al. // International Symposium FONTEVRAUD 7, Avignon, France, 26–30 September, 2010, № O07-A080-T01.

3. Chernobaeva A. A., Kryukov A. M., Amaev A. D., Erak D. Yu., Platonov P. A., Shtrombakh Y. I. The Role of Flax Effect on Radiation Embrittlement of WWER-440 Reactor Pressure Vessel Materials. In Proc. Of the IAEA Technical Meeting. – M.: RRC “Kurchatov institute”, Gus khristalny, Russia, 2008. – P. 38–53.

4. Margolin B. Z., Yurchenko E. V. Prediction of Radiation Embrittlement of WWER-1000 Reactor Vessel Materials Considering the Influence of Alloying Elements and High Content of Copper // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2017. – V. 8, N. 6. – P. 936–943.
5. Margolin B. Z., Yurchenko E. V., Morozov A. M., Pirogova N. E., Brumovsky M. Analysis of a link of embrittlement mechanisms and neutron flux effect as applied to reactor pressure vessel materials of WWER // *J. Nucl. Mater.* – 2013. – V. 434. – P. 347–356.
6. Pechenkin V. A., Stepanov I. A., Konobeev Yu. V. Modeling of phosphorus accumulation on grain boundaries in iron alloys under irradiation // *Effects of Radiation on Materials, 20th Int. Symp., ASTM STP 1405, 2001*. – P. 174–187.
7. Margolin B.Z., Yurchenko E.V., Morozov A.M., Chistyakov D.A. Prediction of the effects of thermal ageing on the embrittlement of reactor pressure vessel steels // *J. Nucl. Mater.* – 2014. – V. 447, Is. 1–3. – P. 107–114.
8. Карк Г. С. О роли радиационно стимулированной диффузии примесей в охрупчивании перлитной стали при нейтронном облучении // *Труды ЦНИИТМАШ «Металловедение и термическая обработка сталей для оборудования энергоустановок»*. – 1983. – № 177.
9. Шалаев А. М. Радиационно-стимулированная диффузия в металлах. – М.: Атомиздат, 1972. – С. 148.
10. Kuleshova E. A., Gurovich B. A., Lavrukina Z. V., Maltsev D. A., Fedotova S. V., Frolov A. S., Zhuchkov G. M. Study of the flux effect nature for VVER-1000 RPV welds with high nickel content // *Journal of Nuclear Materials*. – 2017. – V. 483. – P. 1–12.
11. Kuleshova E. A., Zhuchkov G. M., Fedotova S. V., Maltsev D. A., Frolov A. S., Fedotov I. V. Precipitation kinetics of radiation-induced Ni–Mn–Si phases in VVER-1000 reactor pressure vessel steels under the low and high flux irradiation// *Journal of Nuclear Materials*. – 2021. – V. 553. – Art. 153091
12. Марголин Б. З., Николаев В. А., Юрченко Е. В., Николаев Ю. А., Ерак Д. Ю., Николаева А. В. Анализ охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации. // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 4 (60). – С. 108–123.
13. Gurovich B. A., Chernobaeva A. A., Erak D. Yu., Kuleshova E. A., Zhurko D. A., Papina V. B., Skundin M. A., Maltsev D. A. Chemical composition effect on VVER-1000 RPV weld metal thermal aging // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – V. 465. – P. 540–549.
14. Chernobaeva A. A., Erak D. Yu., Papina V. B. Thermal aging effects of VVER-1000 RPV weld metal // *Training Workshop on the Assessment of Degradation Mechanisms of Primary Components in Water Cooled Nuclear Reactors: Current Issues and Future Challenges, CIEMAT, Madrid, Spain, 29 Sep. – 2 Oct. 2014*.
15. Ерак Д., Журко Д., Кулешова Е., Папина В., Чернобаева А., Штромбах Я. Прогнозирование радиационного охрупчивания сварных швов корпусов реакторов ВВЭР-1000 // 9-я международная конференция «Структура материалов и микромеханика разрушения» (СММР9), Брно, Чешская Республика, 25–28 июня 2019 г.
16. Ерак Д. Ю., Папина В. Б., Журко Д. А. Сравнительный анализ результатов исследования радиационного охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000, облученных с различной плотностью потока нейтронов // *Международная конференция «Вклад исследований материалов и опыта эксплуатации легководных реакторов (Безопасность, Эффективность и Надежность)»*, Франция, Авиньон, 15–18 сентября 2014 г.
17. Shtrombakh Y. I., Gurovich B. A., Kuleshova E. A., Maltsev D. A., Fedotova S. V., Chernobaeva A. A. Thermal ageing mechanisms of VVER-1000 reactor pressure vessel steel // *Journal of Nuclear Materials*. – 2014. – V. 452. – P. 348–358.
18. Gurovich B. A., Kuleshova E. A., Shtrombakh Ya. I., Erak D. Yu., Chernobaeva A. A., Zabusov O. O. Fine structure behaviour of VVER-1000 RPV materials under irradiation // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – V. 389. – P. 490–496.
19. Miller M. K., Russell K. F., Nanstad R. K., Chernobaeva A. A., Zabusov O., Shtrombakh Y., Erak D. Atom probe tomography of VVER-1000 forging and weld metal irradiated to high fluence, degradation 2007 // *Proceedings of 13th International Conference on Environmental Degradation in Nuclear Power Systems*, Whistler, British Columbia, August 2007.

20. Кулешова Е. А., Гурович Б. А., Федотова С. В., Фролов А. С., Мальцев Д. А. Радиационно-индуцированная деградация структуры конструкционных материалов водо-водяных реакторов. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2022. – 460 с.

21. Бокштейн Б. С., Ходан А. Н., Забусов О. О., Мальцев Д. А., Гурович, Б. А. Кинетика сегрегации фосфора на границах зерен в низколегированной малоуглеродистой стали // Физика металлов и металловедение. – 2014. – V. 115, № 2. – С. 156–166.

22. Алексеев Н. И., Гомин Е. А., Марин С. В., Насонов В. А., Шкаровский Д. А., Юдкевич М. С. Программа MSU-PTR для прецизионных расчётов исследовательских реакторов бассейнового и бакового типов // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109, вып. 3. – С. 123–129.

23. Насонов В. А., Песня Ю. Е. Разработка расчетных моделей и расчетное обеспечение облучения конструкционных материалов в ампульных устройствах реактора ИР-8 с использованием программы MSU-PTR // Препринт ИАЭ-6721/4, 2012.

24. ГОСТ Р 59115.14–2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора.

25. Чернобаева А. А. Обоснование моделей радиационного охрупчивания материалов корпусов реакторов и процедуры их применения для оценки состояния эксплуатирующихся корпусов реакторов // Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03. – М., 2009. – 228 с.

26. Shtrombakh Ya. I., Gurovich B. A., Kuleshova E. A., Maltsev D. A., Fedotova S. V., Chernobaeva A. A. Thermal ageing mechanisms of VVER-1000 reactor pressure vessel steels // J. Nucl. Mater. – 2014. – V. 452. – P. 348–358.

27. Kuleshova E. A., Zhuchkov G. M., Fedotova S. V., Maltsev D. A., Frolov A. S., Fedotov I. V. Precipitation kinetics of radiation-induced Ni–Mn–Si phases in VVER-1000 reactor pressure vessel steels under the low and high flux irradiation // Journal of Nuclear Materials. – 2021. – V. 553. – Art. 153091.

28. Жучков Г.М. Особенности фазообразования в сталях корпусов реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 после первичного и повторного облучений // Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03. – М., 2021. – 117 с.

УДК 669.14.018.8:621.039.531:620.194.2

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ ОБЛУЧЕННОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 07X12NMФБ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДНОЙ СРЕДЕ. Часть 2. Разработка методики идентификации коррозионных трещин и анализ результатов автоклавных испытаний

Б. З. МАРГОЛИН¹, д-р техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА¹, канд. техн. наук,
А. А. СОРОКИН¹, канд. техн. наук, В. И. КОХОНОВ¹, А. В. ДУБ², д-р техн. наук,
И. А. САФОНОВ², канд. техн. наук

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

²Частное учреждение по обеспечению научного развития атомной отрасли «Наука и инновации», 119017, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 44с4

Поступила в редакцию 4.05.2023

После доработки 20.07.2023

Принята к публикации 23.08.2023

Проведены исследования коррозионного растрескивания облученной до повреждающей дозы нейтронов ~12 сна нержавеющей ферритно-мартенситной стали с содержанием хрома 12%, выбранной в качестве кандидатного материала для внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР-СКД. В первой части настоящей работы были проведены автоклавные испытания специально разработанных дисковых образцов с постоянной нагрузкой в воде сверхкритических параметров (при температуре 450°C и давлении 250 атм). Во второй части представлена разработанная методика идентификации коррозионных трещин в исследуемых дисковых образцах, а также проведен ана-

лиз результатов автоклавных испытаний в воде сверхкритических параметров. В результате выполненных экспериментов определены пороговые значения напряжений, ниже которых коррозионное растрескивание не реализуется. Значения пороговых напряжений получены для исследуемой стали, облученной при температурах 390 и 550°C. Проанализированы возможные механизмы коррозионного растрескивания исследованной стали и предложены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: ферритно-мартенситная нержавеющая сталь, реактор ВВЭР-СКД, облучение, коррозионное растрескивание, идентификация коррозионных трещин, автоклавные испытания

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-116-4-245-259

ЛИТЕРАТУРА

1. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993.
2. Hancock J. W., Mackenzi A. C. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steel subjected to multi-axial stress state // J. Mech. Phys. Solids. – 1976. – V. 24 (213). – P. 147–49.
3. Klueh R. L., Nelson A. T. Ferritic/martensitic steels for next-generation reactors // J. Nucl. Mater. 2007. – V. 371. – P. 37–52.
4. Patra A., McDowell, David L. Continuum modeling of localized deformation in irradiated bcc materials // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 432. – P. 414–427.
5. Microstructures Of irradiated and mechanically deformed metals and alloys: fundamental aspects // S. J. Zinkle, N. Hashimoto, Y. Matsukawa et al. // Materials Research Society symposia proceedings “Materials Research Society”, January, 2004.
6. Tensile properties and microstructure of 590 MeV proton-irradiated pure Fe and a Fe-Cr alloy // M. I. Lупpo, C. Bailat, R. Schäublin et al. // J. Nucl. Mater. – 2000. – V. 283–287. – P. 483-487.
7. Margolin B., Sorokin A., Pirogova N. Analysis of mechanisms inducing corrosion cracking of irradiated austenitic steels and development of a model for prediction of crack initiation. Engineering Failure Analysis. – 2020. – V. 107. – 104235.