

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Фомина О. В., Вихарева Т. В., Сагарадзе В. В., Катаева Н. В. Формирование структуры азотсодержащей аустенитной стали 04X20H6Г11M2АФБ при горячей деформации. Часть 1: Влияние температуры и скорости деформации на процесс динамической рекристаллизации.....7

Фомина О. В., Вихарева Т. В. Формирование структуры азотсодержащей аустенитной стали 04X20H6Г11M2АФБ при горячей деформации. Часть 2: Влияние фазового состава и условий горячей деформации на процесс динамической рекристаллизации22

Сыч О. В., Хлусова Е. И., Пазилова У. А., Яшина Е. А. Структура и свойства зоны термического влияния низколегированных хладостойких сталей для арктического применения30

Бондаренко Ю. А., Кузьмина Н. А., Базылева О. А., Раевских А. Н. Исследование структуры и фазового состава интерметаллидного сплава системы NiAl–Ni₃Al, полученного методом высокоградиентной направленной кристаллизации.....52

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Юльметова О. С. Исследование процесса лазерного оксидирования ниобия61

Анисимов А. В., Михайлова М. А., Уварова Е. А. Современные подходы к разработке морских необрастающих покрытий.....70

Бобкова Т. И., Соколова Н. А., Макаров А. М., Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В. Комбинированный метод получения композиционных порошковых материалов и функциональных покрытий на их основе81

Алеутдинова М. И., Фадин В. В. Влияние содержания меди в композитах сталь ШХ15 – медь на износ при скольжении по меди под воздействием электрического тока контактной плотности более 100 А/см²88

Шишкова М. Л., Яковлева Н. В. Каталитически активные покрытия для систем паровой конверсии природного газа: синтез и каталитические свойства96

Фармаковский Б. В. Литые терморезистивные микропровода в стеклянной изоляции с высоким значением температурного коэффициента сопротивления106

Шарин П. П., Акимова М. П., Попов В. И. Взаимосвязь структуры межфазной зоны алмаз – матрица с работоспособностью инструмента, полученного технологией, совмещающей металлизацию алмазов со спеканием матрицы.....111

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Охлопкова А. А., Слепцова С. А., Никифорова П. Г., Стручкова Т. С., Охлопкова Т. А., Иванова З. С. Основные направления исследований в области разработки полимерных композиций триботехнического назначения для техники Севера (Опыт Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова).....124

Шадрин Н. В., Евсеева У. В. Исследование механических свойств и механизма разрушения бутадиев-нитрильной резины, наполненной полыми корундовыми микросферами135

Деев И. С., Никишин Е. Ф. Исследование микроструктуры и химического состава поверхностных слоев полиимидной пленки и конденсированных на ней веществ после длительной экспозиции на орбитальной космической станции «Мир»149

Трясунов В. С., Галактионов М. С., Шульцева Е. Л., Баганик А. М. Органопластик для судовых корпусных конструкций из полимерных композиционных материалов, эксплуатирующихся в морской среде155

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Шаронов Н. И., Шарапов М. Г. Модернизация устройства для развертки электронного луча при электронно-лучевой сварке161

Шаронов Н. И., Шарапов М. Г. Управление процессом формирования сварного соединения при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов повышенных толщин167

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Костылев В. И., Морозов А. М., Варовин А. Я., Рогожкин С. В., Никитин А. А. Особенности радиационного охрупчивания материалов опорных конструкций корпусов реакторов типа ВВЭР. Часть 1. Экспериментальные исследования 175
- Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Костылев В. И., Морозов А. М., Варовин А. Я., Рогожкин С. В., Никитин А. А. Особенности радиационного охрупчивания материалов опорных конструкций корпусов реакторов типа ВВЭР. Часть 2. Анализ выполненных исследований 193
- Савченко А. М., Коновалов Ю. В., Лаушкин А. В., Кулаков Г. В. Циркониевые сплавы с пониженной температурой плавления 209

ХРОНИКА

- Круглов Л. Г., Гатин В. В., Жегулович А. А. Разработка и внедрение технологии изготовления отливок лопастей гребных винтов из титановых сплавов 217
- Байков В. Д. Из истории создания свариваемых алюминиевых сплавов 226
- К 70-летию Алексея Витальевича Ильина 230
- К 80-летию Анатолия Сергеевича Кудрявцева 232
- Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов** 234

УДК 669.15'786–194.56:621.789:620.186.5

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 04X20H6Г11M2АФБ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ. Часть I. Влияние температуры и скорости деформации на процесс динамической рекристаллизации

О. В. ФОМИНА¹, канд. техн. наук, Т. В. ВИХАРЕВА¹, В. В. САГАРАДЗЕ², д-р техн. наук,
Н. В. КАТАЕВА², канд. техн. наук

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

² ФГБУН «Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН», 620990, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

Статья поступила 26.01.2018

Для высокопрочной коррозионно-стойкой азотсодержащей аустенитной стали 04X20H6Г11M2АФБ определены значения пороговой степени деформации, необходимой для зарождения и развития процессов динамической рекристаллизации в исследуемых диапазонах температур и скоростей деформирования. Анализ диаграмм деформации показал, что сопротивление деформации увеличивается при снижении температуры деформирования. При температурах 1000–1200°C наблюдается слабовыраженный пик, который свидетельствует о начале динамической рекристаллизации. Исследована структура стали после горячей деформации со скоростями 0,1; 1,0 и 10 с⁻¹ в интервале температур 900–1200°C с использованием методов EBSD-анализа и трансмиссионной электронной микроскопии.

Ключевые слова: азотсодержащая аустенитная сталь, EBSD-анализ, структура, динамическая рекристаллизация, горячая деформация, скорость деформации, сопротивление деформации

ЛИТЕРАТУРА

1. Малышевский В. А, Цуканов В. В, Калинин Г. Ю., Грачев Г. В. Современные маломангнитные стали для судостроения // Судостроение. – 2009. – № 3. – С. 66–68.
2. Калинин Г. Ю., Харьков А. А, Фомина О. В., Голуб Ю. В. К вопросу о перспективах широкого внедрения аустенитных сталей, легированных азотом // Морской вестник. – 2010. – № 4 (36). – С. 82–83.
3. Потак Я. М. Высокопрочные стали. – М: Металлургия, 1972.– 208 с.

4. Сагарадзе В. В., Уваров А. И. Упрочнение и свойства аустенитных сталей. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. – 720 с.
5. Костина М. В., Банных О. А., Блинов В. М., Дымов А. А. Легированные азотом хромистые коррозионно-стойкие стали нового поколения // *Материаловедение*. – 2001. – № 4(7). – С. 35–44.
6. Gavriljuk V. B. Nitrogen in Iron and Steel // *ISIJ International*. – 1996. – V. 36, N 7. – P. 738–745.
7. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю., Малахов Н. В., Ямпольский В. Д. Создание перспективных принципиально новых коррозионно-стойких корпусных сталей, легированных азотом // *Вопросы материаловедения*. – 2005. – № 2(42). – С. 40–54.
8. Костина М. В., Банных О. А., Блинов В. М. Особенности сталей, легированных азотом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2000. – № 12. – С. 3–6.
9. Банных О. А., Блинов В. М., Костина М. В., Блинов Е. В. О возможности экономии никеля в стали типа 0X17H12M2 (AISI 316) за счет легирования азотом // *Металлы*. – 2006. – № 5. – С. 7–14.
10. Гаврилюк В. Г., Бернс Г. Высокопрочная аустенитная нержавеющая сталь // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2007. – № 12. – С. 17–19.
11. Мушникова С.Ю., Костин С.К., Сагарадзе В.В., Катаева Н.В. Структура, свойства и сопротивление коррозионному растрескиванию азотсодержащей аустенитной стали, упрочненной термомеханической обработкой // *Физика металлов и материаловедение*. – 2017. – Т. 118. – № 11. – С. 1223–1235.
12. Коджаспиров Г. Е., Сулягин Р. В., Карьялайнен Л. П. Влияние температурно-деформационных условий на упрочнение и разупрочнение азотсодержащих коррозионно-стойких сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2005. – № 11(605). – С. 22–26.
13. Костина М. В., Банных О. А., Блинов В. М., Дымов А. А. Легированные азотом хромистые коррозионно-стойкие стали нового поколения // *Материаловедение*. – 2001. – № 4(7). – С. 35–44.
14. Банных О. А., Блинов В. М., Костина М. В. Исследование эволюции структуры азотистой коррозионно-стойкой аустенитной стали 06X21AГ10Н7МФБ при термомеханической и термической обработке // *Вопросы материаловедения*. – 2006. – № 1 (45). – С. 9–22.
15. Влияние горячей деформации на структуру и механические свойства высокоазотистых немагнитных сталей / В. М. Блинов, И. Л. Пойменов и др. // *Структура и физико-механические свойства немагнитных сталей*. – М.: Наука, 1986. – С. 30–33.
16. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Малахов Н. В., Мушникова С. Ю., Ямпольский В. Д. Создание перспективных принципиально новых коррозионно-стойких корпусных сталей, легированных азотом // *Вопросы материаловедения*. – 2005. – № 2 (42). – С. 40–54.
17. Сагарадзе В. В., Уваров А. И., Печеркина Н. Л., Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю. Влияние упрочняющей обработки на структуру и механические свойства закаленной азотсодержащей аустенитной стали 04X20H6Г11AM2БФ // *МиТом*. – 2008. – № 10 (610). – С. 33–38.
18. Горынин И. В., Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю., Банных О. А., Блинов В. М., Костина М. В. Коррозионно-стойкие высокопрочные азотистые стали // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 3 (59). – С. 7–16.
19. Мушникова С. Ю., Сагарадзе В. В., Филиппов Ю. И., Катаева Н. В., Завалишин В. А., Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Костин С. К. Сравнительный анализ коррозионного растрескивания аустенитных сталей с разным содержанием азота в хлоридных и водородсодержащих средах // *ФММ*. – 2015. – V. 116. – С. 663–671.
20. Коджаспиров Г. Е., Рудской А. И., Рыбин В. В. Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий пластическим деформированием. – СПб.: Наука. – 2006. – 350 с.
21. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия. – 1977. – 431 с.
22. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: МИСИС. – 2005. – 432 с.

23. Рекристаллизация металлических материалов / Под ред. Ф. Хеснер. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.
24. Humphreys F. J., Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena. – Elsevier, 2004. – 574 p.
25. Current issues in recrystallization: a review / R. D. Doherty, D. A. Hughes, F. J. Humphreys, J. J. Jonas and oth. // *Materials Science and Engineering*. – 1997. – A238. – P. 219–274.
26. Кондратьев Н. С., Трусов П. В. Механизмы образования зародышей рекристаллизации в металлах при термомеханической обработке // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2016. – № 4. – С. 151–174.
27. Evangelista E., McQueen H.J., Ryan N.D. Hot strength, dynamic recovery and dynamic recrystallization of 317 type stainless steel // *Metallurgical science and technology*. – 1987. – V. 5. – No 2. – P. 50–58.
28. Sakai T., Belyakov A., Kaibyshev R., Miura H., Jonas J. J. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions // *Progress in Materials Science*. – 2014. – V. 60. – P. 130–207.
29. Бернштейн М. Л., Займовский В. А., Капуткина Л. М. Термомеханическая обработка стали. – М: Металлургия, 1983. – 480 с.
30. Ponge D., Gottstein G., Necklace formation during dynamic recrystallization: mechanisms and impact on flow behavior // *Acta mater*. – 1998. – V. 46, N 1. – P. 69–80.
31. Dehghan-Manshadi A., Barnett M. R., Hodgson P. D. Recrystallization in AISI 304 austenitic stainless steel during and after hot deformation // *Materials Science and Engineering*. – 2008. – A 485. – P. 664–672.
32. Dehghan-Manshadi A., Barnett M.R., Hodgson P. D. Hot deformation and recrystallization of austenitic stainless steel: part I. Dynamic recrystallization // *Metallurgical and materials transactions A*. – 2008. – V. 39 A. – P. 1359–1370.
33. Пуарье Ж. П. Высокотемпературная пластичность кристаллических тел. – М.: Металлургия, 1982. – С. 272.
34. Hoseini Asli A, Zarei-Hanzaki A. Dynamic Recrystallization Behavior of a Fe–Cr–Ni Super-Austenitic Stainless Steel // *J. Mater. Sci. Technol*. – 2009. – V. 25, N 5. – P. 603–606.
35. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

УДК 669.15'786–194.56:621.789:620.186.5

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ
04X20H6Г11M2АФБ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ. Часть 2. Влияние фазового состава и
условий горячей деформации на процесс динамической рекристаллизации**

О. В.ФОМИНА, канд. техн. наук, Т. В. ВИХАРЕВА

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

Статья поступила 26.01.2018

Проведено исследование влияния δ -феррита в высокопрочной коррозионно-стойкой азотсодержащей стали марки 04X20H6Г11M2АФБ на сопротивление деформации при горячей деформации сжатием в интервале температур 900–1200°C и скоростей деформирования 0,1–10 с⁻¹. Анализ диаграмм деформации показал, что динамическая рекристаллизация в стали, содержащей δ -феррит, начинается при меньшем значении пороговой степени деформации, чем в чисто аустенитной стали. Определены значения пороговой степени деформации, необходимой для зарождения и развития процессов динамической рекристаллизации в исследуемых диапазонах температур и скоростей деформирования в зависимости от фазового состава азотсодержащей стали. В результате комплексного анализа структуры стали установлено, что наличие δ -феррита в исследуемой стали способствует при температурах 1200–1000°C зарождению и развитию процессов динамической рекристаллизации (ее начало соответствует наименьшему значению пороговой степени

деформации), формированию рекристаллизованной структуры в большем объеме, чем в чисто аустенитной структуре.

Ключевые слова: азотсодержащая аустенитная сталь, δ -феррит, структура, динамическая рекристаллизация, горячая деформация, скорость деформации, сопротивление деформации

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю., Нестерова Е. В., Фомина О. В., Харьков А. А. Исследование структуры и свойств высокопрочной коррозионно-стойкой азотистой стали 04X20H6Г11M2АФБ // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1 (45). – С. 45–53.
2. Малышевский В. А., Цуканов В. В., Калинин Г. Ю., Фомина О. В. Современные маломагнитные стали для судостроения // Судостроение. – 2009. – № 5. – С. 19–21.
3. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю., Малахов Н. В., Ямпольский В. Д. Создание перспективных принципиально новых коррозионно-стойких корпусных сталей, легированных азотом // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2 (45). – С. 40–54.
4. Горынин И. В., Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю., Банных О. А., Блинов В. М., Костина М. В. Коррозионно-стойкие высокопрочные азотистые стали // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3 (59). – С. 7–16.
5. Малышевский В. А., Калинин Г. Ю., Тепленичева А. С., Фомина О. В., Мушникова С. Ю., Харьков А. А. Высокопрочные аустенитные свариваемые стали для судостроения // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 26–35.
6. Казаков А. А., Орыщенко А. С., Фомина О. В., Житенев А. И., Вихарева Т. В. Управление природой δ -феррита в азотсодержащих хромоникельмарганцевых сталях // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 1(89). – С. 1–14.
7. Kane R. H. The Hot Deformation of Austenite. – Pergamon Press, 1977. – P. 457.
8. Pickering F. V. Physical Metallurgy and the Design of Steels. – London: Applied Science Publishers, 1978.
9. Лившиц Л. С. Металловедение для сварщиков. – М.: Машиностроение, 1979. – 253 с.
10. Demk H. Deformation under Hot Working Conditions. – London: The Iron and Steel Institute, 1968. – P. 135.
11. Сокол И. Я. Двухфазные стали. – М.: Металлургия. – 1974. – 216 с.

УДК 669.14.018.295:621.791.051.6

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

О. В. СЫЧ, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук, У.А. ПАЗИЛОВА, канд. техн. наук,
Е. А. ЯШИНА

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

Статья поступила 27.04.2018

Представлены результаты комплексного исследования изменения на наиболее опасных участках зоны термического влияния структуры и свойств низколегированных хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 355–390 МПа до и после проведения послесварочного отпуска, в том числе при совместном воздействии температуры нагрева при отпуске и деформации, в сравнении с основным металлом. Имитационное моделирование выполнено на dilatометре DIL 805 и комплексе Gleeble 3800. Представлены результаты исследования структуры и свойств реальных сварных соединений после сварки с погонной энергией 3,5 и 6 кДж/мм.

Ключевые слова: основной металл, крупнозернистый участок ЗТВ, участок частичной рекристаллизации ЗТВ, послесварочный отпуск, бейнит, ферритно-карбидная смесь, рекристаллизация, скорость деформирования, деформационная способность, характер разрушения, сварное соединение

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыч О. В., Хлусова Е. И., Яшина Е. А. Особенности создания технологии производства толстолистового проката из низкоуглеродистых низколегированных хладостойких сталей с индексом «Агс» в промышленных условиях // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 11–12. – С. 2–10.
2. Harrison P. L., Hart P. H. M. HAZ microstructure and its role in the fracture of microalloyed steels welds // 2nd Griffith Conference on micromechanisms of fracture and their structural significance, Sheffield, UK, 13–15 September 1995, p. 57–68.
3. Круглова А. А., Орлов В. В., Шарапова Д. М. Моделирование тепловых воздействий на зону термического влияния высокопрочной трубной стали К70 при двухпроходной дуговой сварке под флюсом // Металлург. – 2014. – № 9. – С. 98–104.
4. Хлусова Е. И., Орлов В. В. Изменение структуры и свойств в зоне термического влияния сварных соединений из низкоуглеродистых судостроительных и трубных сталей / Металлург. – 2012. – № 9. – С. 63–76.
5. Голи-Оглу Е. А. Влияние постсварочной термической обработки на микротвердость сварного соединения термомеханически упрочненной стали для фиксированных морских платформ // Сталь. – 2016. – № 5 – С. 54–56.
6. Пазилова У. А., Ильин А. В., Круглова А. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние температуры и скорости деформации на структуру и характер разрушения высокопрочных сталей при имитации термического цикла сварки и послесварочного отпуска // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116, № 6. – С. 1–10.
7. Влияние термического цикла сварки на структуру и свойства низколегированных конструкционных сталей / В. А. Костин, Г. М. Григоренко, В. Д. Позняков и др. // Автоматическая сварка. – 2012, – № 12. – С. 10–16.
8. Кархин В. А. Тепловые процессы при сварке. – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2013. – 646 с.
9. Грабин В. Ф., Денисенко А. В. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. – Киев: Наукова Думка, 1978. – 205 с.
10. Микроструктура металла ЗТВ соединений высокопрочной конструкционной стали WELDOX 1300 / В. А. Костин, Г. М. Григоренко, Т. Г. Соломийчук и др. // Автоматическая сварка. – 2013. – № 3. – С. 7–14.
11. Zhao H., Wynne B. P., Palmiere E. J. Conditions for the occurrence of acicular ferrite transformation in HSLA steels. – DOI 10.1007/s10853-017-1781-3.
12. Wan X. L., Wei R., Wu K. M. Effect of acicular ferrite formation on grain refinement in the coarse-grained region of heat-affected zone // Materials Characterization. – 2010. – N 61. – P. 726–731.
13. Lee S. G., Lee D. H., Sohn S. S., Kim W. G., Um K.-K., Kim K.-S., Lee S. H. Effects of Ni and Mn addition on critical crack tip opening displacement (CTOD) of weld-simulated heat-affected zones of three high-strength low alloy (HSLA) steels // Materials Science & Engineering A 2017. – V. 697. – P. 55–65.
14. Bhadeshia H. K. D. H., Honeycombe R. Steels: Microstructure and Properties. – Elsevier Ltd., Oxford, UK, 2006. – 290 p.
15. Komizo Y., Fukada Y. CTOD properties and M–A constituent in the HAZ of C–Mn microalloyed steel // Quarterly J. Japan Weld. Soc. – 1988. – V. 6, N 1. – P. 41–46.
16. Cao R., Li J., Liu D. S., Ma J. Y., Chen J. H. Micromechanism of decrease of Impact Toughness in coarse-grain heat-affected zone of HSLA steel with increasing welding heat input // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – V. 46A, N 7. – P. 2999–3014.
17. Longfei L., Wangyue Y., Zuqing S. Dynamic recrystallization of ferrite in a low-carbon steel // Metallurgical and Materials Transactions. – 2006A. – N 37(3). – P. 609–619.
18. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. – С. 54.
19. Сыч О. В., Орлов В. В., Круглова А. А., Хлусова Е. И. Изменение структуры высокопрочной трубной стали класса прочности К70–К80 при варьировании режимов высокотемпературного отпуска после термомеханической обработки // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 1 (65). – С. 89–99.

20. Yang B., Xuan F.-Z. Creep behavior of subzones in a CrMoV weldment characterized by the in situ creep test with miniature specimens // *Materials Science & Engineering A*. – 2018. – N 723. – P. 148–156.

21. Земзин В. Н., Шрон Р. З. Термическая обработка и свойства сварных соединений. – Л.: Машиностроение, 1978. – 367 с.

22. Орлов А. Н., Перевезенцев В. Н., Рыбин В. В. Границы зерен в металлах / М.: Металлургия, 1980. – 156 с.

УДК 669.017.165:621.746.62

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ NiAl–Ni₃Al, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Ю. А. БОНДАРЕНКО, д-р техн. наук, Н. А. КУЗЬМИНА, канд. геол.-минер. наук,
О. А. БАЗЫЛЕВА, канд. техн. наук, А. Н. РАЕВСКИХ

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
(ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: admin@viam.ru

Статья поступила 21.02.2018

Исследованы структура и фазовый состав образцов интерметаллидных сплавов системы NiAl–Ni₃Al. Методом высокоградиентной направленной кристаллизации удалось сформировать ориентированную вдоль оси образцов дендритную структуру, состоящую из интерметаллидов NiAl и Ni₃Al. Сплав с такой структурой обладает хорошей жаростойкостью, повышенными прочностью и пластичностью.

Ключевые слова: высокоградиентная направленная кристаллизация, интерметаллидный жаропрочный сплав, структура, фазовый состав, кратковременная прочность, пластичность, жаропрочность

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / Под общ. ред. Е. Н. Каблова. Изд. 2-е. – М.: Наука, 2006. – 632 с.

3. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Светлов И. Л., Демонис И. М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // *Технология легких сплавов*. – 2007. – № 2. – С. 6–16.

4. Walston S., Cetel A., MacKay R., O'Hara K., Duhl D., Dreshfield R. Joint development of a fourth generation single crystal superalloys // *Seven Springs Mountain Resort "Superalloys 2004"*, Champion (Pennsylvania). – Minerals, Metals & Materials Society, 2004. – P. 15–24.

5. Koizumi Y., Kobayashi T., Yokokawa T., Zhang J., Osawa M., Harada H., Aoki Y., Arai M. Development of next-generation Ni-base single crystal superalloys. // *Seven Springs Mountain Resort "Superalloys 2004"*, Champion (Pennsylvania). – Minerals, Metals & Materials Society, 2004. – P. 35–43.

6. Ечин А. Б., Бондаренко Ю. А. Особенности высокоградиентной направленной кристаллизации и современное оборудование, используемое при производстве лопаток газотурбинных двигателей // *Труды ВИАМ*. – 2014. – № 12. Ст.03 URL:<http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.02.2018). DOI:10.18577/2307-6046-2014-0-12-3-3.

7. Ечин А. Б., Бондаренко Ю. А. Особенности структуры и свойства никелевого монокристаллического жаропрочного сплава, полученного в условиях переменного температурного градиента на фронте роста // *Труды ВИАМ*. – 2015. – № 8. Ст.01 URL:<http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-1-1.

8. Каблов Е. Н., Бунтушкин В. А., Базылева О. А. Малолегированные легкие жаропрочные литейные сплавы на основе интерметаллида Ni₃Al // *Металлы*. – 1999. – № 1. – С. 56–65.

9. Базылева О. А., Оспенникова О. Г., Аргинбаева Э. Г., Летникова Е. Ю., Шестаков А. В. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 5. – С. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115.

10. Бондаренко Ю. А., Базылева О. А., Ечин А. Б., Сурова В. А., Нарский А. Р. Высокоградная направленная кристаллизация деталей из сплава ВКНА-1В // *Литейное производство*. – 2012. – № 6. – С. 12–16.

11. Базылева О. А., Бондаренко Ю. А., Тимофеева О. Б., Хвацкий К. К. Влияние кристаллографической ориентации на структуру и свойства сплава ВКНА-1В // *Металлургия машиностроения*. – 2012. – № 4. – С. 8–12.

12. Hubert-Protopopescu M., Hubert H. Aluminium–cobalt–nickel. Ternary alloys: a comprehensive compendium of evaluated constitutional data and phase diagrams / Ed. G. Petzow, G. Effenberg. – Weinheim – N.Y.: VCH Corp., 1991. – P. 234–244.

13. Корнилов И. И. Физико-химические основы жаропрочности сплавов. – М.: Изд-во АН СССР. 1961. – 516 с.

14. Корнилов И. И., Минц Р. С. Исследование системы Ni–Cr–NiAl // *Неорганическая химия*. – 1958. – Т. III, вып. 5. – С. 699–707.

15. Бондаренко Ю. А., Каблов Е. Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом // *МИТОМ*. – 2002. – № 7. – С. 20–23.

УДК 669.293:621.785

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НИОБИЯ

О. С. ЮЛЬМЕТОВА, канд. техн. наук

АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30,
E-mail: office@eprib.ru

НИУ ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

Статья поступила 21.02.2018

Представлены результаты исследования состава, структуры и оптических свойств пленок, формируемых на поверхности ниобия в ходе лазерной обработки. Эмпирически определены режимы окисления ниобия при однопроходной и многопроходной лазерной обработке с формированием изображения контрастностью в инфракрасном спектре 0,2 и 0,5 соответственно. Показаны особенности модификации поверхности, связанные с тем, что с увеличением числа проходов лазером происходит насыщение пленки ниобия кислородом с образованием оксида ниобия NbO₂. Выявлено, что оксидные пленки ниобия, полученные в ходе однопроходной лазерной обработки, – голубого оттенка и имеют стехиометрию NbO, а полученные при многопроходной обработке, – зеленого оттенка со стехиометрией NbO₂.

Ключевые слова: лазерная обработка, ниобий, оксиды ниобия, лазерная полировка, оптический контраст

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукьянченко В. В., Малясова М. Г. Металлы в имплантологии. Ортопедия, травматология и протезирование. – 2010. – № 3. – С. 130–132.

2. Montenegro P., Gomes J., Rego R., Borille A. Potential of niobium carbide application as the hard phase in cutting tool substrate // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2018. – V. 70. – P. 116–123.

3. Никишина Е. Е., Дробот Д. В., Лебедева Е. Н. Ниобий и тантал: состояние мирового рынка, области применения, сырьевые источники // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2013. – № 5. – С. 28–34.

4. Veiko V., Odintsova G., Vlasova E., Andreeva Ya., Krivososov A., Ageev E., Gorbunova E. Laser coloration of titanium films: New development for jewelry and decoration // *Optics & Laser Technology*. – 2017. – V. 93. – P. 9–13.

5. Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity / C. W. F. Everitt, D. B. DeBra, B. W. Parkinson et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2011. – V. 106, Is. 22. – Art. 221101, URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.221101>.
6. Balat-Pichelin M., Sans J. L., Escape C., Combes H. Emissivity of Elgiloy and pure niobium at high temperature for the Solar Orbiter mission // *Vacuum.* – 2017. – V. 142. – P. 87–95.
7. Бабакова Е. В., Химич М. А., Сапрыкин А. А., Ибрагимов Е. А. Применение селективного лазерного сплавления для получения низкомолекулярного сплава системы титан – ниобий // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение.* – 2016. – № 1. – С. 117–131.
8. Zhao L., Klopff J. M., Reese Ch. E., Kelley M. J. Laser polishing of niobium for superconducting radio-frequency accelerator applications // *Phys. Rev. ST Accel. Beams.* – 2014. – V. 17, Is. 8. – Art. 083502.
9. Lee S. J., Park C. J., Lim Y. S., Kwon H. S. Influences of laser surface alloying with niobium on corrosion resistance of Zircaloy-4 / et al. // *Journal of Nuclear Materials.* – 2003. – V. 321, Is. 2–3. – P. 177–183.
10. Левин С. Л., Машичев В.А., Святой В. В., Степченко М. В., Цветков В. Н., Чесноков П. А., Щербак А. Г. Результаты разработки конструкции и технологии изготовления элементов криогироскопа // *Сб. докл. «Материалы XXX конференции памяти Н.Н. Острякова», 2016.* – С. 99–106.
11. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Белаш А. А., Ландау Б. Е., Филиппов А. Ю. Сравнительная оценка электрофизических и электрохимических способов создания рисунка на роторах электростатических гироскопов // *Металлообработка.* – 2016. – № 4 (94). – С. 39–45.
12. Diamanti M. V., Del Curto B., Pedefferri M. Interference colors of thin oxide layers on titanium // *Color Res. Appl.* – 2008. – V. 33. – P. 221–228.
13. Юльметова О. С., Туманова М. А., Щербак А. Г., Юльметова Р. Ф. Анализ свойств модифицированных тонкопленочных структур, формируемых в процессе лазерной обработки поверхности нитрида титана // *Вопросы материаловедения.* – 2017. – № 2 (90). – С. 83–91.
14. Veiko, V.P., Slobodov, A.A., Odintsova, G.V., Availability of methods of chemical thermodynamics and kinetics for the analysis of chemical transformations on metal surfaces under pulsed laser action // *Laser Physics.* – 2013. – V. 23, N 6. – Art. 066001.
15. Scherbak A., Yulmetova O. Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system // *Optics & Laser Technology.* – 2018. – N 101. – P. 242–247.
16. Разинкин А. С. Оксидные наноструктуры на поверхности ниобия (110): РФЭС-, РФД- и СТМ-исследование // *Автореф. дис. ... канд. хим. наук, Екатеринбург.* – 2009.
17. Gibbs J. W., Bumstead H. A., Van Name R. G., Longley W. R. // *The Collected Works of J. Willard Gibbs: Two volumes.* – Longmans, Green and Co., 1928.
18. Rao C. N. R., Rao G. V. S. *Transition metal oxides.* – Wash., 1974. – P. 92–99.
19. Вейко В. П., Шахно Е. А. *Сборник задач по лазерным технологиям.* – СПб: ГУ ИТМО, 2007. – 67 с.
20. Jacob, K. T., Shekhar, Ch., Vinay, M., Waseda, Y. Thermodynamic Properties of Niobium Oxides // *J. Chem. Eng. Data*, 2010, 55 (11). – P. 4854–4863. DOI: 10.1021/jc1004609.

УДК 667.657.2:620.193.8

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ МОРСКИХ НЕОБРАСТАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

А. В. АНИСИМОВ, д-р. техн. наук, М. А. МИХАЙЛОВА, канд. техн. наук, Е. А. УВАРОВА

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

Статья поступила 22.12.2017

В настоящее время 75–80% текущих эксплуатационных затрат владельца обычного контейнерного судна приходится на топливо. По данным Международной морской организации, ежегодно мировым флотом сжигается 300 млн. т топлива, при этом ежегодно в воздух выбрасывается 960

млн. т CO₂ и 9 млн. т SO₂. Если не внедрять новые технологии, снижающие расход топлива, то с учетом постоянно увеличивающихся объемов перевозок количество выбросов в атмосферу может значительно увеличиться. В результате обрастания скорость судов может снизиться на 50%, при этом расход топлива увеличивается на 40%. Поэтому разработка методов защиты от морского обрастания является актуальной проблемой, и многие ведущие фирмы ведут разработки для решения данной проблемы. Рассмотрены основные средства защиты от обрастания с помощью полимерных лакокрасочных покрытий: контактного типа; с регулируемым выщелачиванием; самополирующиеся покрытия; безбицидные покрытия. Описан механизм действия представленных полимерных покрытий, а также их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: обрастание, покрытия с низкой поверхностной энергией, необрастающие покрытия, безбицидные покрытия, покрытия контактного типа, покрытия с регулируемым выщелачиванием, самополирующиеся покрытия

ЛИТЕРАТУРА

1. Дринберг С. А., Калинин Т. В., Уденко И. А. Технология судовых покрытий. – М.: ЛКМ-пресс, 2016. – 670 с.
2. Гуревич Е. С. Защита от обрастания. – Л.: Судостроение, 1989. – 199с.
3. Карпов В. А., Ковальчук Ю. Л., Полтаруха О. П., Ильин И. Н. Комплексный подход к защите от морского обрастания и коррозии. – М.: Товарищество научных изданий, 2007. – 155 с.
4. Christian M., Moeller P. D. R., Ballard T. E., Richards J. J., Huigens III R. W., Cavanagh J. Evaluation of dihydrouridine as an antifouling additive in marine paint // Biodeterior Biodegradation. – 2009. – Jun., N 63(4). – P. 529–532.
5. Chambers L. D., Walsh F. C., Wood R. J. K., Stokes K. R. Modern approaches to marine antifouling coatings // Surface and Coatings Technology. – 2006. – V. 201. – P. 3642–3652.
6. Munger C. G. Corrosion Prevention by Protective Coatings // Mater. Perfome. – 1987. – April. –P. 57–58.
7. Фрост А. М. Противообрастающие покрытия с длительным сроком службы – Л.: ЛДНТП, 1989. – 20 с.
8. Раилкин А. И. Процессы колонизации и защита от обрастания. – СПб: Изд-во СПб ун-та, 1998. – 262 с.
9. Лакокрасочные материалы для окраски судов и офшорных сооружений (По материалам журнала Coatings World 2010, May, с. 39–42) // Лакокрасочная промышленность. – 2010. – № 7. – С. 12–14.
10. Новые лакокрасочные материалы для судостроения (По материалам зарубежной печати) // Лакокрасочная промышленность. – 2010. – № 7. – С. 20–23.
11. Ламбурн Р. Лакокрасочные материалы и покрытия / Пер. с англ. / Под ред. Л. Н. Машляковского, А. М. Фроста. – СПб.: Химия, 1991. – 512 с.
12. Southward A. J., Balkema A. A. Baranacle Biology. – Rotterdam: Crustacean Issues, 1987. – V. 5. – 443 p.
13. Helio C., Yebra D. Advances in Marine Antifouling Coatings and Technology. –Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2009. – May. – 784 p.
14. Thouveunin M., Peron J.-J., Langlois V., Guerin P., Langlois J.-Y., Vallee-Rehel K. Formulation and antifouling activity of marine paints: A study by a statistically based experiments plan // Progress in Organic Coatings. – 2002. – N 44. – P. 85–92.
15. Thomas K.V., McHugh M., Hilton M., Waldock M. Increased persistence of antifouling paint biocides when associate with paint particles // Environ. Pollut. – 2003. – N 123. – P. 153–161.
16. Konstantinou I. K., Albanis T. A. Worldwide occurrence and effects of antifouling paint booster biocides in the aquatic environment a review // Environ. Int. – 2004. – N 30. – P. 235–248.
17. Kiil S., Weinell C. E., M. S. Pedersen, Dam-Johansen K. Analysis of Self-Polishing Antifouling Paints Using Rotary Experiments and Mathematical Modeling // Ind. Eng. Chem. Res. – 2001. – N 40 (18). – P. 3906–3920.

18. Миронова Г. А., Ильдарханова Ф. И., Коптева В. В., Богословский К. Г. Пути совершенствования противокоррозионно-противообрастающих покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2010. – № 1–2. – С. 84–86.
19. Миронова Г. А., Ильдарханова Ф. И., Коптева В. В., Богословский К. Г. Повышение гидрофобности противокоррозионно-противообрастающих лакокрасочных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2010. – № 7. – С. 26–29.
20. Бойнович Л. Б., Емельяненко А. М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // Успехи химии. – 2008. – № 77(7). – С. 619–638.
21. Яковлев Д. А., Яковлев С. А. Лакокрасочные покрытия функционального назначения. – СПб.: Химиздат, 2016. – 267 с.
22. Миронова Г. А., Ильдарханова Ф. И., Коптева В. В., Богословский К. Г. Силикон-эпоксидные смолы – новые пленкообразователи в ЛКМ // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2009. – № 12. – С. 23–25.
23. Квасников М. Ю., Крылова И. А., Пачино А. В. Фторсодержащие эпоксидные композиции, модифицированные перфторуглеродами // Лакокрасочные материалы и их применение – 2005. – № 6. – С. 12–16.
24. Ильдарханова Ф. И., Миронова Г. А., Коптева В. В., Богословский К. Г. Создание супергидрофобных наномодифицированных противокоррозионно-противообрастающих лакокрасочных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2010. – № 8. – С. 18–21.
25. Анисимов А. В., Михайлова М. А., Степанова И. П., Уварова Е. А. Влияние модификации эпоксидного олигомера перфторполиэфирными жидкостями на свойства необрастающих покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – №4(80). – С. 129–134.
26. Пат. 2602553 РФ, МПК51, С09D 163/00, С09D 5/16. Необрастающая эмаль «Прогидроф» / Анисимов А. В., Михайлова М. А., Степанова И. П., Уварова Е. А.
27. Berglin M., Lonn N., Gatenholm P. Coating modulus and barnacle bioadhesion (Supplement) / M. Berglin // Biofouling. – 2003. – N 19. – P. 63–69.
28. Wang X. M., Wang H. J., Liu D. L. Non-toxic low surface energy antifouling coatings // Paint Coat. Ind. – 2004. – N 34 (1). – P. 40–43.
29. Yebra D. M., Kiil S., Dam-Johansen K. Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings // Progress in Organic Coatings. – 2004. – N 50 – P. 75–104.
30. Харитонов А. П., Логинов Б. А. Прямое фторирование полимерных изделий – от фундаментальных исследований к практическому использованию // Ж. Рос. хим. общ. им. Д. И. Менделеева. – 2008. – Т. LII, № 3. – С. 106–111.
31. De Rossi D., Ahluwalia A. Biomimetics: New Tools for an Old Myth // 1st Annual International IEEEEMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine & Biology, Lyon, France, 12–14 October 2000. – P. 15–17.
32. Nail R. R., Brott L. L., Rodriguez F., Agarwal G., Kirkpatrick S. M., Stone M. O. Bio-inspired approaches and biological derived materials for coatings // Progress in Organic Coatings – 2003.– N 47 – P. 249–255.

УДК 621.793.7

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Н. А. СОКОЛОВА, А. М. МАКАРОВ,
Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. 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

Статья поступила 17.01.2018

Разработана технология получения порошковых композиционных материалов, состоящих из пластичной матрицы Fe–Cr–Al, плакирующей составляющей на основе нитридов хрома и алюминия и твердых наноразмерных композитов карбида вольфрама. На базе разработанных композиционных порошков с помощью микроплазменного напыления получены функционально-градиентные покрытия, сочетающие высокую адгезионную и когезионную прочность с высокой твердостью периферийных слоев. Это делает покрытия весьма перспективными для защиты деталей и узлов прецизионного и энергетического машиностроения от износа в условиях больших механических нагрузок.

Ключевые слова: порошковые композиционные материалы, микроплазменное напыление, функционально-градиентные покрытия, плакирование, карбид вольфрама, прецизионное и энергетическое машиностроение

ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин В. И., Потапов А. А., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Развитие нанотехнологий на основе нанокompозитов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 190 с.
2. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков. // Автореф. дис. ... канд. тех. наук. – СПб.: 2017.
3. Бобкова Т. И., Быстров Р. Ю., Фармаковский Б. В., Асташов А. Г., Синайский М. А. Плазмохимический синтез наноразмерных порошков оксида алюминия и их использование в качестве армирующей компоненты при микроплазменном напылении покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 1 (77). – С. 73–79.
4. Kaupp G. Mechanochemistry: the varied applications of mechanical bond-breaking // Crystal Engineering Communication. – 2009. – V. 11, is. 3. – P. 388–403.
5. Носкова Н. И., Мулюков Р. Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 279 с.
6. Бутягин П. Ю. Разупорядоченные структуры и механохимические реакции в твердых телах. // Успехи химии. – 1984. – Т. 33, № 11.
7. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
8. Глейзер А. М., Пермякова И. Е. Нанокристалл, закаленный из расплава. – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.
9. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех. Большое – в малом. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 434 с.
10. Гоголинский К. В., Решетов В. Н. Применение сканирующих зондовых микроскопов для анализа с субмикронным и нанометровым разрешением структуры и распределения механических свойств материалов (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. – Т. 64, № 6. – С. 30–43.
11. Патент РФ № 2551037 Способы получения износо- и коррозионно-стойкого градиентного покрытия / Бобкова Т. И., Прудников И. С., Васильев А. Ф., Фармаковская А. Я., Фармаковский Б. В. Заявл. 3.09.2013 г. Опубликовано 20.05.2016.
12. Геращенко Д. А., Юрков М. А., Фармаковский Б. В. Создание функционально-градиентных износостойких покрытий с регулируемой твердостью, получаемых методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления // Сб. тр. XIV междунар. науч.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века», 17–22 сентября 2007 г. Севастополь. Т. 1 – С. 163–171.
13. Gorynin I. V., Malishevsky V. A., Farmakovskiy B. V. Projects of Federal State Unitary Enterprise CRISM “Prometey” in the Field of Structural Nanomaterials in Russia // Innovations and Nanotechnologies of Russia. – 2012. – N 1(2), from April.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ В КОМПОЗИТАХ СТАЛЬ ШХ15 – МЕДЬ НА ИЗНОС ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ ПО МЕДИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА КОНТАКТНОЙ ПЛОТНОСТИ БОЛЕЕ 100 А/см²

М. И. АЛЕУТДИНОВА^{1,2}, канд. техн. наук, В. В. ФАДИН¹, канд. техн. наук

^{1,2}ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения» СО РАН, 634056, Томск, Академический пр., 2/4, E-mail: aleut@ispms.ru

¹ФГБОУ ВПО «Северский технологический институт» НИЯУ МИФИ, 636036, Томская область, г. Северск, пр. Коммунистический, 65. E-mail aleut@ispms.ru.

Статья поступила 26.01.2018

Проведено спекание порошковых композитов составов сталь ШХ15 – медь в воздушной среде в окружении частиц порошка керамики Al₂O₃ и графита. Порошковая сталь получена путем восстановления из шлифовального шлама производства подшипников. Показано, что стальной каркас имеет низкий уровень механических свойств, но высокую перколяцию пор в поровом пространстве. Увеличение концентрации меди приводит к увеличению концентрации изолированных пор, что препятствует пропитке композита индустриальным маслом. Установлено, что этот эффект не позволяет осуществить длительный и устойчивый скользящий электроконтакт с плотностью тока более 150 А/см². Отмечено, что спеченные композиты на основе восстановленной стали ШХ15, содержащие около 15%Cu, способны проявить высокую износостойкость при скольжении с контактной плотностью тока 150–200 А/см² в условиях граничной смазки.

Ключевые слова: скользящий электрический контакт, поверхностный слой, удельная поверхностная электрическая проводимость контакта, спеченный композит, поровое пространство, самосмазывающееся трение

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang Q., Xu A., Xue P., He D., Li J., Bjorkman B. Briquette Smelting in Electric Arc Furnace to Recycle Wastes from Stainless Steel Production // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2015. – V. 22 (Supplement 1) . – P. 10–16.
2. Simon L., Moraes C. A. M., Modolo R. C. E., Vargas M., Calheiro D., Brehm F. A. Recycling of contaminated metallic chip based on eco-efficiency and eco-effectiveness approaches // Journal of Cleaner Production. – 2017. – V.153. – P. 417–424.
3. Kolubaev A. V., Sizova O. V., Fadin V. V., Aleutdinova M.I. Fabrication of antifriction and friction materials from metal-cutting waste // Journal of friction and wear. – 2003. – V. 24 (5). – P. 81–86.
4. Федорченко И. М., Пугина Л. И. Композиционные спечённые антифрикционные материалы. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 346.
5. Braunovic M., Konchits V., Myshkin N. Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. – P. 150.
6. Алеутдинов К. А., Алеутдинова М. И., Фадин В. В. Влияние структуры контртела на характеристики скользящего электроконтакта металлических композитов // Сб. трудов международной конференции «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении». – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 231.
7. Kovalchenko A. M., Blau P. J., Qu J., Danyluk S. Scuffing tendencies of different metals against copper under non-lubricated conditions // Wear. – 2011. – V. 271. – P. 2998–3006.
8. Зозуля В. Д. Эксплуатационные свойства порошковых подшипников. – Киев: Наукова думка, 1989. – С. 5–6.
9. Фадин В. В., Алеутдинова М. И. Об увеличении фактической площади скользящего контакта металлических графитсодержащих композитов под влиянием электрического тока и расплава Pb-Sn в контактном пространстве // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 3 (79) . – С. 60–65.
10. Богданович П. Н., Прушак В. Я. Трение и износ в машинах. Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1999. – С. 195.

11. Argibay N., Bares J. A., Keith J. H., Bourne G. R., Sawye W. G. Copper–beryllium metal fiber brushes in high current density sliding electrical contacts // *Wear*. – 2010. – V. 268.

УДК 621.793.7:66.097.5

КАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА: СИНТЕЗ И КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

М. Л. ШИШКОВА, Н. В. ЯКОВЛЕВА

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

Статья поступила 7.02.2018

Рассмотрены научно-технические и технологические аспекты создания каталитически активных композиций для иммобилизованных катализаторов систем паровой конверсии углеводородного сырья в водородное топливо. Исследованы процессы синтеза каталитических порошковых смесей и получения на их основе функциональных покрытий с использованием перспективного метода сверхзвукового холодного газодинамического напыления. Приведены результаты экспериментальных исследований в области создания катализаторов паровой конверсии метана в водородсодержащее топливо на металлическом носителе (лента Х15Ю5) при использовании в качестве исходных материалов композиционных порошковых смесей $\text{Ni-Al-Al}(\text{OH})_3 - \text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{Mg}(\text{OH})_2$.

Ключевые слова: системы паровой конверсии, порошковая каталитически активная смесь, функциональное покрытие, морфология поверхности, ленточный носитель, промотор

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов Б. П., Лотоцкий М. В. Водородная энергетика: прошлое, настоящее, виды на будущее. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева)*. – 2006. – Т. 1, № 6. – С. 5–18.
2. Куранов А. Л., Корабельников А. В., Михайлов А. М. Принципы управления и моделирования тепловой защиты гиперзвукового летательного аппарата. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 227 с.
3. Боресков Г. К. Периодический закон и каталитические свойства элементов // *Сто лет Периодического закона химических элементов*. – М.: Наука, 1971. – С. 231–241.
4. Ашмор П. Катализ и ингибирование химических реакций. – М.: Мир, 1966. – С. 508.
5. Хауффе К. Реакции в твердых телах и на их поверхности: В 2 кн. – М.: Иностранная литература, 1963. – С. 273.
6. Сабирова З. А., Данилова М. М., Зайковский В. И. Никелевые катализаторы на основе пористого никеля для реакции паровой конверсии метана // *Кинетика и катализ*. – 2008. – № 3, т. 49. – С. 449–456.
7. Власов Е. А., Прокопенко А. Н. Получение водорода из углеводородного сырья на никельсодержащих катализаторах // *Вестник ИНЖЭКОНа. Сер. Технические науки*. – 2005. – Вып. 3(8). – С. 7–13.
8. Van Beurden P. On the catalytic aspects of steam methane reforming. – 2004. – P. 27.
9. Wu H.-G., La Parola V., Pantaleo G., Puleo F., Venezia A. M., Liotta L. F. Ni-Based Catalysts for Low Temperature Methane Steam Reforming: Recent Results on Ni–Au and Comparison with Other Bi-Metallic Systems // *Catalysts*. – 2013. – N 3. – P. 563–583.
10. Liu J. A. Kinetics, catalysis and mechanism of methane steam reforming: Master Thesis of Science in Chemical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2006.
11. Lu Z., Guo Y., Zhang Q., Yagi M., Hatakeyama J., Li H., Chen J., Sakurai M., Karneyama H. A novel catalyst with plate-type anodic alumina supports, Ni/NiAl₂O₄/γ-Al₂O₃/alloy, for steam reforming of methane // *Applied Catalysis A*. – 2008. – N 347. – P. 200–207.
12. Choi J. S., Moon K. I., Kim Y. G., Lee J. S., Kim C. H., Trimm D. L. Stable carbon dioxide reforming of methane over modified Ni/Al₂O₃ catalysts // *Catalysis Letters*. – 1998. – N. 52. – P. 43–47.

13. Пахомов Н. А. Научные основы приготовления катализаторов: Курс лекций. – Новосибирск: НГУ, 2010. – 278 с.
14. Lemonidou A., Vasalos I. A. Carbon dioxide reforming of methane over 5 wt.% Ni / CaO–Al₂O₃ catalyst // Applied Catalysis A: General. – 2002. – V. 228, is.1–2. – P. 227–235.
15. Asencios J. O., Bellido J. D., Assaf E. M. Synthesis of NiO–MgO–ZrO₂ catalysts and their performance in reforming of model biogas // Applied Catalysis A: General. – 2011. – V. 397, is.1–2. – P. 138–144.
16. Promoting effect of noble metals addition on activity and resistance to carbon deposition in oxidative steam reforming of methane over NiO–MgO solid solution. Catalysis Communications / K. Nurunabi, K. Fujimoto, B. Suzuki, S. Li, K. Kado et al. – 2006. – V. 7, is. 2. – P. 73–78.
17. Патент РФ № 2354749. Способ получения наноструктурированных функционально-градиентных износостойких покрытий / Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Горынин И. В., 2009.
18. 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. – № 1 (77). – С. 87–89.
19. Виноградова Т. С. Разработка высокоэффективных пористых носителей на металлической основе // II симпозиум «Термохимические процессы в плазменной аэродинамике», СПб, 10–12 сентября, 2001.
20. Патент РФ № 2417841 Способ изготовления каталитического композиционного покрытия / Виноградова Т. С., Тараканова Т. А., Фармаковский Б. В., Юрков М. А. – Оpubл. 10.05.2011.
21. Яковлева Н. В., Марков А. М., Повышев А. М., Шишкова М. Л. Исследование фазовых превращений при синтезе каталитических покрытий на металлическом носителе // Журнал прикладной химии. – 2018. – Т. 91, вып. 1. – С. 148–156.
22. 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. – № 1 (77). – С. 87–89.
23. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. Т. 1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
24. Jung S. B., Minamino Y., Yamane T., Saji S. Reaction diffusion and formation of Al₃Ni and Al₃Ni₂ phases in the Al–Ni system // Journal of materials science letters. – 1993. – V. 12. – P. 1684–1686.

УДК 621.74:621.315.3

ЛИТЫЕ ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫЕ МИКРОПРОВОДА В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ С ВЫСОКИМ ЗНАЧЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ

Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

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

Статья поступила 21.02.2018

Приведены результаты исследований по созданию прецизионного сплава для литья терморезистивных микропроводов в стеклянной изоляции на основе интерметаллидной композиции Ni₃Sn + SiB₃. Полученные по типовой технологии литья микропровода имеют температурный коэффициент сопротивления $(7,8–8,2) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и удельное сопротивление 0,68–0,83 Ом·мм²/м и рекомендуются для получения миниатюрных датчиков температуры.

Ключевые слова: литой микропровод в стеклянной изоляции, температурный коэффициент сопротивления, удельное сопротивление

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В. Размышления с оптимизмом. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. – 526 с.

2. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Под ред. Ж. И. Алферова и др. –СПб: Изд-во И П Пермяков С.А. – 2015. – С. 137–163.
3. Горынин И. В., Фармаковский Б. В. Высокопрочные литые микропровода системы Ni–Cr–Mo, полученные высокоскоростной закалкой расплава // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4(88) – С. 35–41.
4. Масайло Д. В., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А., Мазеева А. К. Литые микропровода в стеклянной изоляции из сплавов на основе меди с минимальным температурным коэффициентом сопротивления // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 3(75). – С. 81–87.
5. Патент РФ №2393257. Аморфный сплав для литья микропроводов / Фармаковский Б. В., Беляева А. И., Васильев А.Ф., Земляницын Е. Ю., Кузьмин К. А., Кузнецов П. А. Опубл. 02.10.2008.
6. Литой микропровод и его применение в науке и технике / Под ред. акад. АН СССР Д. В. Гицу. – Кишинев: Изд-во АН МССР «Штиинца». – 1988. – 424 с.
7. Волков А. И., Жарский И. М. Большой химический справочник. – М., 2005. – 1008 с.
8. Бурханов Г. С., Киселева Н. Н. Прогнозирование интерметаллических соединений // Успехи химии. – 2009. – Т. 78, № 6. – С. 615–634.
9. По пути созидания: Сб. исторических очерков о научном вкладе института в развитие отечественной промышленности: Т. 1 / Под ред. акад. РАН И. В. Горынина. – СПб: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. – С. 149–164.
10. Уорден Н. К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. – М.: Техносфера, 2006. 224 с.

УДК 621.762.5:549.211:539.219.3

ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ МЕЖФАЗНОЙ ЗОНЫ АЛМАЗ – МАТРИЦА С РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ ИНСТРУМЕНТА, ПОЛУЧЕННОГО ТЕХНОЛОГИЕЙ, СОВМЕЩАЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЮ АЛМАЗОВ СО СПЕКАНИЕМ МАТРИЦЫ

П. П. ШАРИН¹, канд. физ.-мат. наук, М. П. АКИМОВА¹, В. И. ПОПОВ², канд. физ.-мат. наук

¹ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН»,
Республика Саха (Якутия), 677891, Якутск, ул. Октябрьская, 1,
E-mail:administration@iptpn.ysn.ru

²ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
(СВФУ)», Республика Саха (Якутия), 677000, Якутск, ул. Кулаковского, д. 48

Статья поступила 15.04.2018

Методами растровой электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализов, рамановской спектроскопии изучены структура, химический и фазовый составы межфазной зоны алмаз – матрица правящего карандаша, полученного по технологии, в которой совмещены термодиффузионная металлизация алмаза хромом и спекание матрицы. В процессе спекания матрицы компактное размещение частиц порошка хрома вокруг алмазных зерен и экранирующий эффект медной фольги создают условия, обеспечивающие термодиффузионную металлизацию алмаза.

Установлено, что при заданных в эксперименте условиях и температурно-временном режиме спекания на поверхности алмаза формируется металлизированное покрытие, химически сцепленное с алмазом и состоящее из фаз карбида хрома, твердого раствора кобальта в хrome, что обеспечивает прочное закрепление алмаза в твердосплавной матрице.

Показано, что удельная производительность опытного правящего карандаша, полученного по гибридной технологии, при правке шлифовального круга из зеленого карбида кремния составила 51,50 см³/мг, что на 44,66% превышает аналогичный показатель однотипного контрольного карандаша, полученного без металлизации алмазов методом спекания с пропиткой медью.

Ключевые слова: природный алмаз, твердосплавная матрица, металлизация алмаза, металлокарбидное покрытие, спекание с пропиткой, межфазная граница, алмазоудержание, удельная производительность инструмента

ЛИТЕРАТУРА

1. Tönshoff H. K., Hillmann-Apmann H., Asche J. Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications // *Diamond and Related Materials*. – 2002. – N 11. – P. 736–741.
2. Бакуль В. Н., Никитин Ю. И., Верник Е. Б., Селех В. Ф. Основы проектирования и технологии изготовления абразивного и алмазного инструмента. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
3. Artini C., Muolo M. L., Passerone A. Diamond – metal interfaces in cutting tools: a review // *Journal of Materials Science*. – 2012. – V. 47, N 7. – P. 3252–3264.
4. Яхутлов М. М., Карамурзов Б. С., Беров З. Ж., Батыров У. Д., Нартыжев Р. М. Направленное формирование межфазной границы алмаз–матрица с использованием нанопокровов // *Изв. Кабардино-Балкарского госуниверситета*. – 2011. – Т. 1, № 4. – С. 23–25.
5. Исонкин А. М., Дуда Т. М., Бежавина Н. Н., Ткач В. Н. Влияние металлизации алмазов на структурообразование и прочность композиционного материала // *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна»*. – 2013. – № 2(19). – С. 146–154.
6. Peterson A., Agren J. Sintering shrinkage of WC–Co materials with bimodal grain size distribution // *Acta Materialia*. – 2005. – V. 53. – P. 1665–1671.
7. Витязь П. А., Жорник В. И., Кукареко В. А. Исследование структурно-фазового состояния и свойств спеченных сплавов, модернизированных наноразмерными алмазосодержащими добавками // *Изв. национальной академии наук Беларуси. Серия физ.-тех. наук*. – 2011. – № 3. – С. 5–17.
8. Zeren M., Karagöz S. Sintering of polycrystalline diamond cutting tools // *Materials and Design*. – 2007. – V. 28. – P. 1055–1058.
9. Шарин П. П., Яковлева С. П., Гоголев В. Е., Васильева М. И. Структурная организация высокоизносостойких алмазосодержащих композитов на основе твердосплавных порошков, полученных методом спекания с пропиткой медью // *Перспективные материалы*. – 2015. – N 6. – С. 66–77.
10. Qiu W. Q., Liu Z. W., He L. X., Zeng D. C., Mai Y.-W. Improved interfacial adhesion between diamond film and copper substrate using a Cu (Cr) – diamond composite interlayer // *Mater. Lett.* – 2012. – V. 81. – P. 155–157.
11. Molinari A., Marchetti F., Cialanella S., Scardi P., Tiziani A. Study of the diamond–matrix interface in hot-pressed cobalt-based tools // *Materials Science and Engineering*. – 1990. – V. A130. – P. 257–262.
12. Сидоренко Д. А., Левашов Е. А., Логинов П. А., Швындина Н. В., Скрылева Е. А., Ускова И. Е. О механизме самопроизвольного плакирования алмаза карбидом вольфрама в процессе спекания инструмента с наномодифицированной металлической связкой Cu–Fe–Co–Ni // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2015. – N 5. – С. 53–63.
13. Локтюшин В. А., Гуревич Л. М. Получение нанотолщинных металлических покрытий на сверхтвердых материалах методом термодиффузионной металлизации // *Известия Волжского государственного технического университета*. – 2009. – Т. 11, N 3. – С. 50–54.
14. Tillmann W., Ferreira M., Steffen A., Ruster K., Möller J., Bieder S., Paulus M., Tolan M. Carbon reactivity of binder metals in diamond – metal composites – characterization by scanning electron microscopy and X-ray diffraction // *Diamond and related materials*. – 2013. – V. 38. – P. 118–123.
15. Li W.-S., Zhang J., Dong H.-F., Chu K., Wang S.-C., Liu Y., Li Y.-M. Thermodynamic and kinetic study on interfacial reaction and diamond graphitization of Cu–Fe-based diamond composite // *Chin. Phys. B*. – 2013. – V. 22, N 1. – P. 018102.
16. Tillmann W., Tolan M., Lopes-Dias N. F., Zimpel M., Ferreira M., Paulus M. Influence of chromium as carbide forming doping element on the diamond retention in diamond tools // *Proceedings of the International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM)*. – 2015. – V. 3. – P. 21–30.
17. Romansky A. Factors affecting diamond retention in powder metallurgy diamond tools // *Archives of metallurgy and materials*. – 2010. – V. 55, N 4. – P. 1073–1081.
18. Патент РФ № 2607393. Способ получения композиционной алмазосодержащей матрицы с повышенным алмазоудержанием на основе твердосплавных порошковых смесей // Шарин П. П., Никитин Г. М., Лебедев М. П., Гоголев В. Е., Атласов В. П., Попов В. И. Опубликовано 10.01.2017 // *Бюл. № 1*.

19. Шарин П. П., Яковлева С. П., Винокуров Г. Г., Попов В. И. Повышение эксплуатационных характеристик твердосплавных алмазосодержащих композитов при диффузионной металлизации алмазной компоненты в процессе спекания с пропиткой. I. Обоснование эффективности гибридной технологии синтеза // Наука и образование. – 2016. – № 4. – С. 94–100.

20. Патент РФ №2478455. Способ изготовления алмазного инструмента // Шарин П. П., Лебедев М. П., Гоголев В. Е., Ноговицын Р. Г., Атласов В. П., Слободчиков П. А. Опубликовано 10.04.2013 // Бюл. №10.

21. Шарин П. П., Яковлева С. П., Гоголев В. Е., Попов В. И. Строение и прочность переходной зоны при твердофазном высокотемпературном взаимодействии алмаза с карбидообразующими металлами – хромом и кобальтом // Перспективные материалы. – 2015. – № 7. – С. 47–60.

22. Bushmer C. P., Crayton P. H. Carbon self-diffusion in tungsten carbide // J. Mater. Sci. – 1971. – V. 6. – P. 981–988.

23. Цыпин Н. В., Симкин Э. С., Костенецкая Г. Д. Металлографическое исследование взаимодействия алмазов с металлами при высоких температурах // Адгезия и пайка материалов. – 1979. – № 4. – С. 78–80.

24. Стасюк Л. Ф., Кушатлова И. П., Ускокович Д. П., Крстанович И., Радич С. М., Ристич М. М. Реакционное спекание в системе алмаз – карбид титана – хром под высоким давлением // Гласник хемијског друштва Београд. Bulletin de la societe chimique Beograd. – 1984. – Т. 49, № 9. – С. 563–569.

25. Аникина В. И., Ковалева А. А. Фрактография в материаловедении. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. – 143 с.

УДК 678.742:621.891

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНИКИ СЕВЕРА (Опыт Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова)

А. А. ОХЛОПКОВА, д-р техн. наук, С. А. СЛЕПЦОВА, канд. техн. наук,
П. Г. НИКИФОРОВА, канд. филос. наук, Т. С. СТРУЧКОВА, канд. техн. наук,
Т. А. ОХЛОПКОВА, З. С. ИВАНОВА, канд. хим. наук

*ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова (СВФУ),
677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Кулаковского, д. 48, E-mail: ivprge@rambler.ru*

Статья поступила 15.01.2018

Материаловедение как наука, изучающая связь между структурой и свойствами материалов, а также их изменения при внешних воздействиях, сегодня относится к приоритетным направлениям развития науки и техники. Ее главной целью является создание новых материалов, усовершенствование существующих, а также разработка эффективных технологий их переработки. Сегодня материаловедами создано множество новых материалов для разных отраслей хозяйственно-экономической деятельности: металлические сплавы с особыми свойствами, керамические и композиционные, наноструктурные и полимерные материалы, функциональные порошковые материалы, синтетические сверхтвердые материалы и покрытия, многофункциональные покрытия и т. д. Создание новых материалов и технологий всегда остается актуальной проблемой, что обусловлено поступательным развитием материального производства, требующего создания материалов с все более адаптивными эксплуатационными свойствами и более эффективных технологий их переработки.

Приведен обзор научно-исследовательских направлений Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова в области разработки триботехнических материалов для техники Севера. Выявлены направления научных исследований, основными из которых являются разработка новых технологий получения полимерных композиционных материалов (ПКМ) и улучшение их эксплуатационных свойств. Показана перспективность таких технологических приемов совмещения полимера и наполнителя, как жидкофазное совмещение под действием ультразвуковых колебаний и химическая модификация поверхности полимерной матрицы. Анализируются физико-механические и триботехнические свойства разработанных антифрикционных ПКМ. Представлены

результаты основных теоретических обобщений в области изучения надмолекулярных структур ПКМ: влияние критических концентраций наполнителей на структуру и свойства ПКМ; гипотеза о характере межфазового взаимодействия между наполнителем и полимером. Показаны современные тенденции научно-исследовательских работ, одной из которых является изучение трибоокислительных процессов в ПКМ. Выявлена специфика развития полимерного материаловедения в Арктическом регионе.

Ключевые слова: композиционные материалы, политетрафторэтилен, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, наночастицы, дисперсные наполнители, слоистые силикаты, механоактивация, износостойкость, коэффициент трения, триботехнические свойства, деформационно-прочностные свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охлопкова А. А., Виноградов А. В., Пинчук Л. С. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 164 с.
2. Попов С. Н. Морозостойкие подвижные уплотнения для машин в северном исполнении // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, Новосибирск, 1996. – 32 с.
3. Аргунова А. Г. Охлопкова А. А., Петрова П. Н. Трибологические свойства нанокompозитов на основе ПТФЭ при различных условиях трения // Арктика XXI век. Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 3–12.
4. Безопасность Республики Саха (Якутия): социальные, экологические и техногенные проблемы / Под ред. В. Ю. Фридовского, В. А. Прохорова. – Новосибирск: Наука, 2008. – 296 с.
5. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности / И. Н. Андреева, Е. В. Веселовская, Е. И. Наливайко и др. – Л.: Химия, 1982. – 80 с.
6. Kurtz S. M. The UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices, Second Edition. – Academic Press, Burlington, 2009. – P. 530.
7. Белый В. А., Свириденюк А. И., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. – Минск: Наука и техника, 1976. – 432 с.
8. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Байбарацкая М. Ю. Мамаев О. А. Полимерные композиционные материалы в трибологии. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – 262 с.
9. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Суриков В. И., Калистратова Л. Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. – М.: Машиностроение, 2005. – 240 с.
10. Хасанов О. Л. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 148 с.
11. Рыжонков Д. И., Левина В. В., Дзидзигури Э. Л. Наноматериалы. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2008. – 365 с.
12. Патент РФ № 2586979. Способ получения композиций из полимера и наноразмерных наполнителей / Охлопкова Т. А., Шарин П. П., Охлопкова А. А., Борисова Р. В. – Опубликовано 10.06.2016 // Бюл. № 16, 2015.
13. Охлопкова Т. А., Борисова Р. В., Никифорова Л. А., Спиридонов А. М., Шарин П. П., Охлопкова А. А. Технология жидкофазного совмещения сверхвысокомолекулярного полиэтилена с наночастицами неорганических соединений под действием ультразвуковых колебаний // Журнал прикладной химии. – 2016. – Т. 89, вып. 9. – С. 1179–1186.
14. Vaisman L., González M. F., Gad Marom. Transcrystallinity in brominated UHMWPE fiber reinforced HDPE composites: morphology and dielectric properties // Polymer. – 2003. – V. 44, is. 4. – P. 1229–1235.
15. Патент РФ № 2633523. Способ бромирования поверхности СВМПЭ / Борисова Р. В., Охлопкова Т. А., Никифоров Л. А., Спиридонов А. М., Охлопкова А. А. – Опубликовано 13.10.2017 // Бюл. № 29, 2016.
16. Пинчук Л. С., Гольдаде В. А. Электретные материалы в машиностроении. – Гомель: Инфотрибо, 1998. – 288 с.

17. Липатов Ю. С. Физико-химические основы наполнения полимеров. – М.: Химия, 1991. – 260 с.
18. Липатов Ю. С. Межфазные явления в полимерах. – Киев: Наукова Думка, 1980. – 260 с.
19. Соломко В. П. Химия и технология высокомолекулярных соединений. Т. 7. – 1975. – С. 115–156.
20. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Попов С. Н., Слепцова С. А. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена // Рос. хим. журнал об-ва им. Д. И. Менделеева. – 2008. – Т. LII, № 3. – С. 147–152.
21. Охлопкова А. А., Адрианова О. А., Попов С. Н. Модификация полимеров ультрадисперсными полимерами. – Якутск: ЯФ изд-во СО РАН, 2003. – 224 с.
22. Слепцова С. А. Исследование межфазного взаимодействия и разработка машиностроительных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных керамик // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Якутск, 2000. – 18 с.
23. Белый В. А., Егоренков Н. И., Плескачевский Ю. М. Термотрибоокислительные процессы. – М.: Химия, 1987. – 342 с.
24. Слепцова С. А., Охлопкова А. А., Капитонова Ю. В., Лазарева Н. Н., Макаров М. М., Никифоров Л. А. Спектроскопические исследования трибоокислительных процессов модифицированного ПТФЭ // Трение и износ. – 2016. – Т. 37, № 2. – С. 168–176.
25. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Попов С. Н., Аввакумов Е. Г. Химия в интересах устойчивого развития. – 2004. – № 2. – С. 627–636.

УДК 678.074:539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОЙ РЕЗИНЫ, НАПОЛНЕННОЙ ПОЛЫМИ КОРУНДОВЫМИ МИКРОСФЕРАМИ

Н. В. ШАДРИНОВ¹, канд. техн. наук, У. В. ЕВСЕЕВА²

¹ФГБУН «Институт проблем нефти и газа» Сибирского отделения РАН, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, E-mail: nshadrinov@gmail.com

²ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова (СВФУ), 677000, Республика Саха (Якутия), Якутск, ул. Кулаковского, д. 58, E-mail: ivprge@rambler.ru

Статья поступила 1.02.2018

Приведены результаты исследования влияния полых корундовых микросфер НСМ-S (5–100 мкм) и НСМ-L (70–180 мкм) на свойства бутадиен-нитрильной резины БНКС-18. Показана зависимость стойкости эластомера к абразивному воздействию и его физико-механических показателей от дисперсности и концентрации вводимых полых корундовых микросфер. С помощью разработанного растяжного механизма, совмещенного с атомно-силовым микроскопом, установлен механизм отслоения полых корундовых микросфер от эластомерной матрицы, который во многом определяет изменение физико-механических показателей.

Ключевые слова: полые корундовые микросферы, бутадиен-нитрильный каучук, износостойкость, физико-механические свойства, атомно-силовая микроскопия, отслоение, адгезия

ЛИТЕРАТУРА

1. Mammadov S. M., Rzayeva S. A., Garibov A. A., Akperov O. N., Gojayeva T. F., Mammadov J. S., Hajiyeva N. M. Study of Influence of Copolymer Vinyl Chloride and Vinyl Acetate on the Properties of Butadiene Nitrile Rubber // International Journal of Composite Materials. – 2012. – V. 2(6). – P. 137–141.
2. Машуков В. И., Машушкина И. В., Максимов Д. А., Казаков Ю. М., Егоров А. В. Анализ микроструктуры бутадиен-нитрильных каучуков методами ¹H и ¹³C ЯМР-спектроскопии // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2010. – Т. 316, № 3. – С. 106–108.
3. Попов А. Н., Kazachenko V. P., Popova M. A., Shilko S. V., Ryabchenko T. V. Mechanical and Antifrictional Properties of Elastomeric Composites Based on a Rubber for Sealing Elements // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – V. 53, is. 4. – P. 505–514.

4. Wu Y, Zhou Y., Li J., Zhou H, Zhao H., Chen J. Influence of fillers dispersion on friction and wear performance of solution styrene butadiene rubber composites // *Journal of Applied Polymer science*. – 2016. – V. 133, is. 26. DOI:10.1002/app.43589
5. Muravyeva T. I., Gainutdinov R. V., Morozov A. V., Shcherbakova O. O., Zagorskiy D. L., Petrova N. N. Influence of antifriction fillers on the surface properties of elastomers based on propylenoxide rubbers // *Journal of Friction and Wear*. – 2017. – V. 38, is. 5. – P. 339–348.
6. Ulfah I. M., Fidyarningsih R., Rahayu S., Fitriani D. A., Saputra D. A., Winarto D. A., Wisojodharmo L. A. Influence of Carbon Black and Silica Filler on the Rheological and Mechanical Properties of Natural Rubber Compound // *Procedia Chemistry*. – 2015. – V. 16. – P. 258–264.
7. Gent A. N., Hamed G. R., Hung W.-J. Adhesion of elastomer layers to an interposed layer of filler particles // *The Journal of Adhesion*. – 2003. – V. 79, is. 10. – P. 905–913.
8. Park S.-J., Kim J.-S., Rhee K.-Y., Min B.-G. Filler-elastomer interactions: surface and mechanical interfacial properties of chemical surface treated silica/rubber composites // *Material physics and mechanics*. – 2001. – V. 4. – P. 81–84.
9. Bagrov D. V., Yarysheva A. Y., Rukhlya E. G., Yarysheva L. M., Volynskii A. L., Bakeev N. F. Atomic force microscopic study of the structure of high-density polyethylene deformed in liquid medium by crazing mechanism // *Journal of Microscopy*. – 2014. – V. 253, is. 2. – P. 151–160.
10. Opdahl A., Somorjai G. A. Stretched polymer surfaces: Atomic force microscopy measurement of the surface deformation and surface elastic properties of stretched polyethylene // *Journal of polymer science*. – 2001. – V. 39, is. 19. – P. 2263–2274.
11. Oderkerk J., De Schaetzen G., Goderis B., Hellemans L., Groeninckx G. Micromechanical Deformation and Recovery Processes of Nylon-6/Rubber Thermoplastic Vulcanizates As Studied by Atomic Force Microscopy and Transmission Electron Microscopy // *Macromolecules*. – 2002. – N 35. – P. 6623–6629.
12. Титова Т. В., Золкина А. Е., Пичугин А. М., Кудряш М. Н., Тарасов А. М. Исследование влияния полых корундовых микросфер на свойства протекторных резин грузовых шин // *Тр. XXI научно-практической конференции «Резиновая промышленность: сырье, материалы, технологии»*. – М.: ООО «Научно-исследовательский центр НИИШП», 2016. – С. 82–84.
13. Valiev H. H., Karnet Yu. N., Kochurov N. L., Parshina M. S., Semenov N. A., Yumashev O. B., Yanovsky Yu. G. Atomic force microscopy and physical-mechanical properties of new elastomer composites // *Materials Physics and Mechanics*. – 2016. – N 26. – P. 45–48.
14. Морозов И. А. Анализ микроструктуры наполненной резины при атомно-силовой микроскопии // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2009. – № 15 (1). – С. 83–93.
15. Шадрин Н. В., Соколова М. Д. Исследование влияния активированного цеолита на деформацию полимерэластомерных композитов методом атомно-силовой микроскопии // *Материаловедение*. – 2014. – № 7. – С. 17–22.
16. Шадрин Н. В., Халдеева А. Р., Павлова Л. В. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на механические и деформационные свойства бутадиен-нитрильной резины // *Перспективные материалы*. – 2017. – № 6. – С. 50–59.
17. Патент РФ№2521267 Устройство для исследования материалов в деформированных состояниях методом атомно-силовой микроскопии / Н. В. Шадрин. Опубл. 29.04.14 // *Бюл. № 18*.

УДК 678.7:620.198

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПОЛИИМИДНОЙ ПЛЕНКИ И КОНДЕНСИРОВАННЫХ НА НЕЙ ВЕЩЕСТВ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ НА ОРБИТАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «МИР»

И. С. ДЕЕВ¹, канд. техн. наук, Е. Ф. НИКИШИН²

¹ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: admin@viam.ru

²ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М. В. Хруничева», 121087, Москва, Новозаводская ул., 18

Методами сканирующей электронной микроскопии, электронно-зондового микроанализа и инфракрасной спектроскопии проведены комплексные исследования изменения микроструктуры и химического состава поверхностных слоев полиимидной пленки марки ПМ-1Э и конденсированных на ней веществ, в течение длительного времени (1218 сут) экспонированной на орбитальной космической станции «Мир».

Показано, что в процессе экспозиции в космосе микроструктура и химический состав пленки изменяется только в первом слое пакета, а в слоях, расположенных ниже, подобных превращений не наблюдается. На открытой поверхности первого слоя полиимидной пленки обнаружены новые фазовые образования различных формы и размеров как с пленочной, так и с игольчатой структурами, отличающимися химическим составом.

Установлено, что образовавшиеся конденсированные вещества состоят из соединений кремния, железа, меди, цинка, хлора, калия и кальция, которые, вероятно, осаждаются из собственной внешней атмосферы орбитальной станции.

Ключевые слова: полиимидная пленка, конденсированные вещества, микроструктура, химический состав, орбитальная космическая станция «Мир», длительная экспозиция

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 520–530.
3. Dever J., Banks B., de Groh K., Miller S. Degradation of Spacecraft Materials: // *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. 2nd ed., 2012. – P. 717–770.
4. Деев И. С., Никишин Е. Ф. Натурные исследования стойкости полимерных композиционных материалов к воздействию факторов космического пространства // *Модель космоса. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов*. – М.: КДУ, 2007. – С. 1056–1067.
5. Изучение свойств материалов в эксперименте «КОМПЛАСТ» на орбитальном космическом комплексе «Мир» и международной космической станции / Ю. О. Бахвалов, Н. Г. Александров, Т. Н. Смирнова В. К. Э. Р. Клишпонт и др. // *Модель космоса. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов*. – М.: КДУ, 2007. – С. 1039–1055.
6. Deev I. S., Nikishin E. F. Effect of outer space factors on the polymer composite structure under long-term staying conditions in the nearearth orbit // *Space Forum, Moscow, Russian, May, 1996. OPA, V.1.* – P. 297–302.
7. Deev I. S., Nikishin E. F. Effect of long-term exposure in the space environment on the microstructure of fibre-reinforced polymers // *Composites Science and Technology*. – 1997. – V. 57. – P. 1391–1401.
8. Kablov E. N., Minakov V. T., Deev I. S., Nikishin E. F. Study of Polymer Specimen Coating Resistance After the Long Term Exposure on “MIR” Space Complex // *Proc. 6 international conference on Protection of Materials and Structures from Space Environment. ICPMSE-6 / Ed. by Ja. I. Kleiman and Z. Iskanderova*. – Kluwer Academic Publishers, 2003. – P. 217–233–3, 2002.
9. Kablov E. N., Minakov V. T., Deev I. S., Nikishin E. F. Study of Material Microstructure Stability for the Micrometeoritic Protection of “Mir” Space Complex // *Proc. of the 10th ISMSE & the 8th ICPMSE, Collioure, France, 19–23 June, 2006*. – ESA, SP-616, 2006. – P. 1–9.
10. Каблов Е. Н., Минаков В. Т., Деев И. С., Никишин Е. Ф. Исследования структуры и состава полимерных композиционных материалов после длительной экспозиции на космических станциях САЛЮТ-6, САЛЮТ-7 и орбитальном комплексе МИР // *Тр. междунар. науч.-технич. конф. «Актуальные вопросы авиационного материаловедения», ФГУП «ВИАМ», 2007*. – С. 108–109.

11. Барбашов Е. А., Богатов В. А., Деев И. С., Никишин Е. Ф., Перов Б. В., Старцев О. В., Шевченко Ю. Н. Вклад факторов космического пространства (ФКП) в изменение свойств полимерных материалов // Тр. междунар. науч.-технич. конф. «Актуальные вопросы авиационного материаловедения», ФГУП «ВИАМ», 2007. – С. 118–120.
12. Deev I. S., Nikishin E. F., Kurshev E. V., Lonskii S. L. The Structure and Composition of Samples Made of Carbon-Fiber-Reinforced Plastic KMU-4I Exposed for 12 Years on the Exterior Surface of the International Space Station: 1. Macrostructure and Surface Composition // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2016. – V. 7, N 6. – P. 840–846. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016.
13. Deev I. S., Nikishin E. F., Kurshev E. V., Lonskii S. L. The Structure and Composition of Samples Made of Carbon-Fiber-Reinforced Plastic KMU-4I Exposed for 12 Years on the Exterior Surface of the International Space Station: 2. Microstructure and Surface Composition // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2016. – V. 7, N 6. – P. 847–854. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016.
14. Надирадзе А. Б., Шапошников В. В., Хартов В. В., Максимов И.А., Иванов В. В., Смирнов В. А. Моделирование процессов формирования собственной внешней атмосферы и загрязнения поверхности космических аппаратов // *Модель космоса. Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов*. – М.: КДУ, 2007. – С. 39–59.
15. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую природную среду. Справочное пособие. – М.: Анкил, 2000.
16. Платов Ю. В., Куликова Г. Н., Черноус С. А. Классификация газопылевых образований в верхней атмосфере, связанных с выбросами продуктов сгорания ракетных двигателей // *Космические исследования*. – 2003. – Т. 41. – № 2. – С. 168–173.
17. Касаев К. С., Новиков Л. С., Панасюк М. И. Новые наукоемкие технологии в технике // *Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов*. – М.: ЗАО НИИ ЭНЦИТЕХ. – 2000. – Т. 16: Гл. 1. – С. 14–39; Т. 17: Гл. 9. – С. 1–97.
18. Надирадзе А. Б., Калаев М. П., Семкин Н. Д. Воздействие метеороидов и техногенных частиц на солнечные батареи космических аппаратов // *Космические исследования*. – 2016. – Т. 54, № 5. – С. 392–401.
19. Kablov E. N., Chursova L. V., Deev I. S., Nikishin E. F., Letin V. A. Effect of space and own external atmosphere of orbital space stations on materials and design // *Poster presentation at the 10th International Conference on “Protection of Materials and Structures of Space Environment, 12–17 June 2011, Okinawa, Japan*.
20. Letin V. A., Gatsenko L. S., Deev I. S., Bakina E. A., Malenkov A. V., Nikishin E. F. Structure and composition of non-metallic solar array materials retrieved after long-term exposure overboard the “MIR” orbital space station // *Proc. 6 international conference on Protection of Materials and Structures from Space Environment. ICPMSE-6 / Edited by Ja. I. Kleiman and Z. Iskanderova*. – Kluwer Academic Publishers. 2003. – P. 217–233.
21. Милинчук В. К., Пасевич О. Ф., Клишпонт Э. Р., Шелухов И. П., Загорский Д. Л., Смирнова Т. Н. Изменение свойств и структуры поверхности полиимидных пленок при экспонировании на низких земных орбитах // *Высокомолекулярные соединения*. – 2003. – Т. 45, № 12. – С. 2017–2023.
22. Ананьева О. А. Исследование пленочных полимерных материалов, экспонированных на орбитальной космической станции «Мир»: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – М., 2007. – 25 с.
23. Деев И. С., Никишин Е. Ф. Исследование структурных и химических превращений в полимерных пленках после длительной экспозиции на орбитальной космической станции «Мир» // *Радиационное и космическое материаловедение*. – Обнинск. ООО «Эрмис», 2011. – С. 32–33.
24. Пасевич О. Ф., Милинчук В. К. Спектроскопическое исследование полиимидных пленок, экспонированных на низких земных орбитах // *Химия высоких энергий*. – 2005. – Т. 39, № 6. – С. 423–429.
25. Zatekin V. V., Kulikauskas V. S., Novikov L. S., Petukhov V. P., Chernik V. N., Chernykh P. N., Bakhvalov Yu. O., Aleksandrov N. G., Smirnova T. N. RBS and XFA Analysis of Polyimide Films from the Mir Space Station // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2008. – V. 2, N 2. – P. 282–285. © Pleiades Publishing, Ltd., 2008.

26. Деев И. С., Каблов Е. Н., Кобец Л. П., Чурсова Л. В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2014. – № 7. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 5.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.

27. Новиков Л. С. Современное состояние и перспективы исследований взаимодействия космических аппаратов с окружающей средой // Модель космоса: Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КДУ, 2007. – С. 10–38.

УДК 678.067.5:629.5

ОРГАНОПЛАСТИК ДЛЯ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

В. С. ТРЯСУНОВ, М. С. ГАЛАКТИОНОВ, канд. физ.-мат. наук, Е. Л. ШУЛЬЦЕВА,
А. М. БАГАНИК

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

Статья поступила 6.04.2018

Рассмотрены результаты разработки трехслойного полимерного композиционного материала для корпусных конструкций, эксплуатирующихся в условиях морской среды, со средним слоем из органопластика. Исследованы физико-механические свойства органопластика для обоснования выбора исходных материалов, структуры конструкции и технологии ее изготовления.

Ключевые слова: стеклопластик, органопластик, трехслойная конструкция, эпоксидная смола

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимов А. Н., Зарубина А. Ю., Симонов-Емельянов И. Д. Структура, обобщение, параметры и реологические свойства эпоксидных сферопластиков // Пластические массы. – 2014. – № 11–12. – С. 3–8.

2. Оснос М. С., Оснос С. П. Применение материалов из базальтовых волокон в автомобильной промышленности // Композитный мир. – 2015. – № 3. – С. 66–74.

3. Горев Ю. А., Ривкинд В. Н. Композиционные материалы на основе полиэфирных смол // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2009. – Т. LIII, № 4. – С. 19–34.

4. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.

5. Сферопластики. Аквасинт // http://aquasint.ru/sph_pr.html [Электронный ресурс]. – Режим доступа 14.03.2018.

6. Зарубина А. Ю. Композиционные материалы на основе модифицированного эпоксидного олигомера с повышенной теплостойкостью и регулируемым комплексом реологических и эксплуатационных свойств // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 25 с.

7. Ким А. А., Курденкова А. В., Шустов Ю. С. Исследование прочности баллистических тканей при воздействии конусообразной насадкой // Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 6. – С. 31–33.

УДК 621.791.722

МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАЗВЕРТКИ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

Н. И. ШАРОНОВ¹, М. Г. ШАРАПОВ², д-р техн. наук

¹ОАО НПК «Уралвагонзавод» – ОАО «ЦНИИ материалов», 191014, Санкт-Петербург,
ул. Парадная, 8

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

Статья поступила 13.02.2018

Взамен морально устаревшего генератора управления разверткой электронного луча ГУР-1 предлагается модернизированная система, в которой используется цифровое управление лучом для реализации специальной схемы сканирования «сжатая скоба». Новая система успешно прошла апробацию при сварке алюминия на установке типа ЭЛУ-20.

Ключевые слова: сварка электронно-лучевая, электронный луч, развертка луча, цифровое управление разверткой, качество сварных швов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mayer R. E. New high-speed beam current control and deflection systems improve electron beam welding – applications // *Welding Journal*. – 1977. – V. 56, N 6. – P. 35–41.
2. Акопьянц К. С. Предотвращение образования корневых дефектов при электронно-лучевой сварке // *Автоматическая сварка*. – 1984. – № 6. – С. 59–61.
3. Васильев А. М., Гончаров В. А., Кривков Б. Г., Солянкин В. В., Шаронов Н. И. Прибор управления электронным пучком при сварке // *Судостроительная промышленность, серия Сварка*. – 1988. – Вып. 6. – С. 11–12.
4. Zhao Hug, Han Zhong, Chen Xiao-Feng. Влияние сканирования на формирование структуры соединений из Ti–6Al–4V при электронно-лучевой сварке // *Hanjie xuebao [Trans. China Weld. Inst.] School of Materials Science & Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, КНР*. – 2005. – V. 26, № 1. – С. 78–80.
5. Баякин С. Г., Лаптенко В. Д., Угрюмов В. Г. Анализ и оптимизация процесса сварки сканирующим электронным лучом // *Материалы конференции «Электронно-лучевая сварка»*. М., 1986. – С. 43–48.
6. Кайдалов А. А. *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии*. 2-е изд. – Киев: Экология, 2004. – 260 с.
7. Ольшанская Т. В., Язовских В. Я. Влияние развертки луча на формирование макроструктуры металла шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением. (Пермский государственный технический университет). *Вестник ПГТУ. Мех. технол. матер. и конструкций*. 1999. – С. 225–230.
8. Механизмы влияния динамических процессов при высокоскоростной лазерной, лазерно-дуговой и электронно-лучевой сварке на формирование дефектов сварных швов / Г. А. Туричин, Е. А. Валдайцева, О. Г. Климова и др. // *Сварка и диагностика*. – 2015. – № 3. – С. 23–27.
9. EVOSPARK – сварочное оборудование промышленного класса, изготовленное в России // *Мир сварки*. – 2016. – № 1–2 (45–46). – С. 24–25.
10. Колодяжный Д. Ю., Горбач В. Д. Сварочное производство в судостроении // *Цифровая эволюция*. – 2017. – № 1 (51). – С. 15–18.

УДК 621.791.722:669.715

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОВЫШЕННЫХ ТОЛЩИН

Н. И. ШАРОНОВ¹, М. Г. ШАРАПОВ², д-р техн. наук

¹ОАО НПК «Уралвагонзавод» – ОАО «ЦНИИ материалов», 191014, Санкт-Петербург, ул. Парадная, 8

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

Статья поступила 13.02.2018

Разработана технология электронно-лучевой сварки однородных и разнородных сварных соединений из алюминиевых сплавов 1561, 1560М и 1980Т1. Применение развертки электронного луча типа «сжатая скоба» обеспечило получение качественных сварных соединений с высоким

уровнем механических свойств. Определены схема сварки и оптимальные режимы, представлены результаты механических, коррозионных испытаний, а также испытаний на задержанное разрушение во времени. Технология внедрена при изготовлении крыльевых устройств для судов на подводных крыльях и в производстве деталей судового машиностроения.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, алюминиевые сплавы, сканирующий электронный луч, сварные соединения, механические свойства, коррозионные испытания, задержанное разрушение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбач В. Д., Суздалев И. В., Шарапов М. Г. Основные проблемы плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов, современное состояние и пути их решения // Вестник технологии судостроения и судоремонта. – 2010. – № 18. – С. 29–39.
2. Бондарев А. А., Рабкин Д. М., Кузменок О. С. Свариваемость сплава АМГб электронным лучом в различных пространственных положениях // Автоматическая сварка. – 1976. – № 12. – С. 34–37.
3. Ольшанская Т. В., Язовских В. Я. Влияние круговой развертки электронного луча на формирование микроструктуры шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением // Вестник ПГТУ. Механика технологических материалов и конструкций. – Пермь, 1999. – С. 225–230.
4. Баякин С. Г., Лаптенко В. Д., Угрюмов В. Г. Анализ и оптимизация процесса сварки сканирующим электронным лучом // Материалы конференции «Электронно-лучевая сварка», Москва, 1986. – С. 43–48.
5. Кайдалов А. А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Изд 2-е. – Киев: Эко-технология, 2004. – 260 с.
6. Шаронов Н. И., Вихман В. Б. Основные положения технологии ЭЛС алюминиевого сплава АМГ61 (1561) с применением развертки «сжатая скоба» // Доклады Санкт-Петербургской междунар. науч.-техн. конф «Технология и оборудование ЭЛС-2014», 24–26 июня 2014 г. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – С. 111–120.
7. Акопьянц К. С. Предотвращение образования корневых дефектов при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1984. – № 6. – С. 59–61.
8. Беленький В. Я. Развертка электронного пучка по X-образной траектории как средство уменьшения дефектов в корне шва при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1986. – № 9. – С. 35–37.
9. Шаронов Н. И., Зигер А. З., Никитина И. В. Тепловые процессы в околошовной зоне при ЭЛС алюминиевого сплава АМГ61 (1561) с применением развертки «сжатая скоба» // Доклады Санкт-Петербургской междунар. науч.-техн. конф «Технология и оборудование ЭЛС-2014», 24–26 июня 2014 г. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – С. 121–125.
10. Башенко В. В., Шаронов Н. И. Свойства сварных соединений пресовано-штампованных алюминиевых сплавов // Доклады Санкт-Петербургской междунар. науч.-техн. конф «Технология и оборудование ЭЛС-2011», 24–26 мая 2011 г. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – С. 66–70.
11. Макаров А. Г., Петров Г. Л. О склонности сварных соединений алюминиевоцинковомагнетических сплавов к задержанным разрушениям // Сварка. Сб. статей. – № 8. – Л.: Судостроение, 1965.

УДК 621.039.531:539.422.22

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННОГО ОХРУПЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР. Часть 1. Экспериментальные исследования

Б. З. МАРГОЛИН¹, д-р техн. наук, Е. В. ЮРЧЕНКО¹, канд. техн. наук,
В. И. КОСТЫЛЕВ¹, канд. техн. наук, А. М. МОРОЗОВ¹, канд. техн. наук,
А. Я. ВАРОВИН¹, канд. техн. наук, С. В. РОГОЖКИН², д-р физ.-мат. наук, А. А. НИКИТИН²

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

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

Рассмотрены особенности изготовления и эксплуатации опорных конструкций корпусов реакторов типа ВВЭР с точки зрения их сопротивления хрупкому разрушению. Показано, что опорные конструкции реакторов типа ВВЭР-440 проектов В-179 и В-230 могут ограничивать срок эксплуатации реактора в целом. Представлены результаты комплексных исследований материалов опорных конструкций в исходном и облученном состояниях, включающие определение стандартных механических свойств, вязкости разрушения, а также микроструктурные и фрактографические исследования.

Ключевые слова: опорная конструкция, корпус реактора, радиационное охрупчивание, стандартные механические свойства, вязкость разрушения, фрактографические исследования, микроструктурные исследования, атомно-зондовая томография.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеенко Н. Н., Амаев А. Д., Горынин И. В., Николаев В. А. Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов. – М.: Энергоиздат, 1981. –191 с.
2. Steel L. E., Hawthorne J. R. Neutron-induced changes in notch ductility of reactor pressure vessel steels // Proc. Hot Laboratories Equipment Conf., 9th [Trans. ANS4, No.1, 92–93, June 1961].
3. Влияние нейтронного облучения на свойства конструкционных материалов / Н. Ф. Правдюк, А. Д. Амаев, П. Л. Платонов и др. // Действие ядерных излучений на материалы. – М.: Изд. АН СССР, 1962.
4. Хоуторн Дж. Р. Радиационное охрупчивание // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Под ред. К. Л. Брейента и С. К. Бенерджи / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1988. – С. 423–479.
5. Nanstad R. K., Farrell K., Braski D. N., Corvin W. R. Accelerated neutron embrittlement of ferritic steels at low fluence flux and spectrum effects // J. of Nucl. Mat. – 1988. – V. 158, N 1–6.
6. Бурдаков Н. С., Васнин А. М., Ослин С. Г., Ривкин Е. Ю., Родин М. Е., Ушаков В. П., Цветков Л. А., Козлов А. В., Евсеев М. В. Исследование влияния облучения на прочностные характеристики материалов металлоконструкций реакторов // Атомная энергия. – 1990. – Т. 69, вып. 3. – С. 135–139.
7. Balesteros A. Irradiation Temperature, Flux and Spectral effect // IAEA Technical meeting on irradiation embrittlement and life management of reactor pressure vessels in Nuclear Power Plants, 18–22 October 2010, Znojmo.
8. Ortner S., English C. Contribution of laboratory experiments to unravelling the mechanisms of RPV embrittlement // PAMELA Workshop, Mol, Belgium September 19–21, 2011.
9. Jones R., Williams T. The dependence of radiation hardening and embrittlement on irradiation temperature. ASTM STP1270-EB. Paper ID: STP16495S.
10. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Пирогова Н. Е. Анализ связи механизмов радиационного охрупчивания и влияния флукса нейтронов применительно к материалам корпусов реакторов ВВЭР // Проблемы прочности. – 2013. – № 4. – С. 27–50.
11. ASTM E 1921–10^{e1}. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range // Annual Book of ASTM Standards. – 2010. – V. 03.01.
12. РД ЭО 1.1.2.09.0789–2012. Методика определения вязкости разрушения по результатам испытаний образцов-свидетелей для расчета прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР-1000. – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2012.
13. Марголин Б. З., Курсевич И. П., Сорокин А. А., Лапин А. Н., Кохонов В. И., Неустроев В. С. К вопросу о радиационном распухании и радиационном охрупчивании аустенитных сталей. Часть 1. Экспериментальные результаты // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 2(58). – С. 89–98.
14. Курсевич И. П., Марголин Б. З., Прокошев О. Ю., Кохонов В. И. Механические свойства аустенитных сталей при нейтронном облучении: влияние различных факторов // Вопросы материаловедения. – № 4 (48). – 2006. – С. 55–68.
15. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Фоменко В. Н., Костылев В. И. Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 2. Развитие метода Unified Curve // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4(88). – С.151–178.

16. МТ 1.1.4.02.1204–2017 «Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов ВВЭР-440 (В-179, В-230) с учетом их отжига при продлении срока эксплуатации до 60 лет. Методика». – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2017.
17. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Nikolaev V. A., Ryadkov L. N. A new engineering method for prediction of the fracture toughness temperature dependence for RPV steels // *Int. J. Pres. Ves. & Piping*. – 2003. – N 80. – P. 817–829.
18. Fracture toughness prediction for highly irradiated RPV materials: From test results to RPV integrity assessment / B. Margolin, B. Gurovich, V. Fomenko, et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2013. – V. 432. – P. 313–322.
19. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И., Швецова В. А. К вопросу сравнения методов Unified Curve и Master Curve и их применения к определению конструкционной прочности корпусов реакторов // *Проблемы прочности*. – 2016. – № 2. – С. 44–70.
20. Margolin B. Z., Fomenko V. N., Gulenko A. G., Kostylev V. I., Shvetsova V. A. Further improvement of the Prometey model and Unified Curve method. Part 1. Improvement of the Prometey model // *Eng. Fract. Mech.* – 2017. – N 182. – P. 467–486.
21. Wallin K. The scatter in K_{Ic} results // *Eng. Fract. Mech.* – 1984. – N 19. – P. 1085–1093.
22. Wallin K. The size effect in K_{Ic} results // *Eng. Fract. Mech.* – 1985. – N 22. – P. 149–163.
23. Wallin K. Fracture toughness transition curve shape for ferritic structural steels. Fracture of engineering materials & structures / S. Teoh and K. Lee, Eds. – Elsevier Applied Science, 1991. – P. 83–88.
24. Merkle J. G., Wallin K., McCabe D. E. Technical basis for an ASTM standard on determining the reference temperature, T_0 for ferritic steels in the transition range. NUREG/CR-5504. – ORNL/TM-13631, 1999.
25. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Shvetsova V. A. Improved probabilistic model for fracture toughness prediction for nuclear pressure vessel steels // *Int. J. Pres. Ves. Piping*. – 1998. – V. 75. – P. 843–855.
26. Бабич В. К., Гуль Ю. П., Долженков И. Е. Деформационное старение стали. – М: Металлургия, 1972. – 320 с.
27. Physical metallurgy. V 3. / Ed. by R.W. Cahn and P. Haasen. – North Holland Physics Publishing, 1996.
28. Рогожкин С. В., Алеев А. А., Лукьянчук А. А., Шутов А. С., Разницын О. А., Кириллов С. Е. Прототип атомного зонда с лазерным испарением // *Приборы и техника эксперимента*. – 2017. – № 3. – С. 129–134.
29. Рогожкин С. В., Никитин А. А., Алеев А. А., Залужный А. Г., Чернобаева А. А., Ерак Д. Ю., Штромбах Я. И., Забусов О. О. Исследование тонкой структуры материала сварного шва с высоким содержанием фосфора корпуса реактора ВВЭР-440 после облучения, отжига и повторного облучения // *Ядерная физика и инжиниринг*. – 2013. – Т. 4, № 1. – С. 73–82.
30. Pareige P., Radiguet B., Suvorov A., Kozodaev M., Krasikov E., Zabusov O., Massoud J. P. Three-dimensional atom probe study of irradiated, annealed and reirradiated VVER 440 weld metals // *Surface Interface Analysis*. – 2004. – V. 36. – P. 581–584.
31. Miller M. K., Chernobaeva A. A., Shtrombakh Ya. I., Russel K. F., Nanstad R. K., Erak D. Yu., Zabusov O. O. Evolution of the nanostructure of VVER-1000 RPV materials under neutron irradiation and post irradiation annealing // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – N 385. – P. 615–622.
32. Philippe T., Duguay S., Blavette D. Clustering and pair correlation function in atom probe tomography // *Ultramicroscopy*. – 2010. – N 110. – P. 862–865.
33. Baddeley A., Bárány I., Schneider R., Weil W. Spatial point processes and their applications. Stochastic Geometry // Lectures given at the C.I.M.E. Summer School held in Martina Franca, Italy, September 13–18, 2004 [Lecture Notes in Mathematics, V. 1892 (subseries: Fondazione C.I.M.E., Firenze)]. – P. 1–75.
34. Meslin E., Radiguet B., Pareige P., Barbu A. Kinetic of solute clustering in neutron irradiated ferritic model alloys and a French pressure vessel steel investigated by atom probe tomography // *J. Nucl. Mater.* – 2010. – N 399. – P. 137–145.
35. Рогожкин С. В., Никитин А. А., Алеев А. А., Германов А. Б., Залужный А. Г. Атомно-зондовые исследования радиационно-индуцированных сегрегаций в ферритно-мартенситной стали Eurofer 97, облученной в реакторе БОР-60 // *Перспективные материалы*. – 2012. – № 5. – С. 45–52.

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННОГО ОХРУПЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР. Часть 2. Анализ выполненных исследований

Б. З. МАРГОЛИН¹, д-р техн. наук, Е. В. ЮРЧЕНКО¹, канд. техн. наук,
В. И. КОСТЫЛЕВ¹, канд. техн. наук, А. М. МОРОЗОВ¹, канд. техн. наук,
А. Я. ВАРОВИН¹, канд. техн. наук, С. В. РОГОЖКИН², д-р физ.-мат. наук, А. А. НИКИТИН²

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

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

Статья поступила 2.02.2018

Рассмотрены особенности радиационного охрупчивания материалов опорных конструкций корпусов реакторов типа ВВЭР. Эти особенности связаны с низкой температурой эксплуатации, не превышающей 90°C, и с использованием сталей, предназначенных для изготовления строительных металлоконструкций, которые не имеют высокого сопротивления к радиационному охрупчиванию. Показано, что опорные конструкции реакторов типа ВВЭР-440 (проектов В-179 и В-230) могут ограничивать срок эксплуатации реактора в целом. Предложена модель для прогнозирования радиационного охрупчивания материалов опорных конструкций в зависимости от флюенса нейтронов и содержания примесных элементов – фосфора и меди. Рассмотрено влияние температуры облучения на различные механизмы, приводящие к радиационному охрупчиванию материала: за счет генерации точечных дефектов и формирования дислокационных петель, за счет упрочнения материала, обусловленного выпадением преципитатов меди, а также за счет образования сегрегаций фосфора.

Ключевые слова: опорная конструкция, корпус реактора, радиационное охрупчивание, дозовая зависимость, температура эксплуатации, примесные элементы.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпусов водо-водяных энергетических реакторов на стадии проектирования. Методика // РД ЭО 1.1.2.99.0920–2014. – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2014.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы. Изд. 2. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
4. Карзов Г. П., Николаев В. А., Юрченко Е. В. Дозовые зависимости радиационного охрупчивания российских материалов для корпусов энергетических реакторов ВВЭР-440 // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 4(60). – С. 124–135.
5. Марголин Б. З., Николаев В. А., Юрченко Е. В., Николаев Ю. А., Ерак Д. Ю., Николаева А. В. Новый подход к описанию охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации // Проблемы прочности. – 2010. – № 42 (1). – С. 7–26.
6. Margolin B. Z., Nikolaev V. A., Yurchenko E. V., Nikolaev Yu. A., Erak D. Yu., Nikolaeva A. V. Analysis of embrittlement of WWER-1000 RPV materials // Int. J. Pres. Ves. & Piping, – 2012. – P. 89. – С. 178–186.
7. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М. Пороговые и предельные значения концентраций примесных элементов в материале корпусов реакторов типа ВВЭР // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 2(86). – С. 152–163.
8. Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов / А. Д. Амаев, А. М. Крюков, И. М. Неклюдов и др. / Под ред. А. М. Паршина, П. А. Платонова. – СПб.: Политехника, 1997.
9. Алексеенко Н. Н., Амаев А. Д., Горынин И. В., Николаев В. А. Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 191 с.

10. Steel L. E., Hawthorne J. R. Neutron-induced changes in notch ductility of reactor pressure vessel steels // 9th Trans. Hot Laboratories Equipment Conf., ANS 4, 1961, June, No 1. – P. 92–93.
11. Влияние нейтронного облучения на свойства конструкционных материалов / Н. Ф. Правдюк, А. Д. Амаев, П. Л. Платонов и др. // Действие ядерных излучений на материалы. – М.: Изд-во АН СССР, 1962.
12. Хоуторн Дж. Р. Радиационное охрупчивание // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Под ред. К. Л. Брейента и С. К. Бенерджи / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1988. – С. 423–479.
13. Nanstad R.K., Farrell K., Braski D.N., Corvin W.R. Accelerated neutron embrittlement of ferritic steels at low fluence flux and spectrum effects // J. of Nucl. Mat. – 1988. – V. 158. – P. 1–6.
14. Бурдаков Н. С., Васнин А. М., Ослин С. Г., Ривкин Е. Ю., Родин М. Е., Ушаков В. П., Цветков Л. А., Козлов А. В., Евсеев М. В. Исследование влияния облучения на прочностные характеристики материалов металлоконструкций реакторов // Атомная энергия. – 1990. – Т. 69, вып. 3. – С. 135–139.
15. Balesteros A. Irradiation Temperature, Flux and Spectral effect // IAEA Technical meeting on irradiation embrittlement and life management of reactor pressure vessels in Nuclear Power Plants, 18–22 October 2010, Znojmo.
16. Ortnier S., English C. Contribution of Laboratory Experiments To Unravelling The Mechanisms of RPV Embrittlement // PAMELA Workshop, Mol, Belgium, September 19–21, 2011.
17. Jones R., Williams T. The Dependence of Radiation Hardening and Embrittlement on Irradiation Temperature // ASTM STP1270-EB. Paper ID: STP16495S.
18. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Пирогова Н. Е. Анализ связи механизмов радиационного охрупчивания и влияния флукса нейтронов применительно к материалам корпусов реакторов ВВЭР // Проблемы прочности. – 2013. – № 4. – С. 27–50.
19. Integrity of reactor pressure vessels in nuclear power plants: assessment of irradiation embrittlement effects in reactor pressure vessel steels // IAEA nuclear energy series. No. NP-T-3.11. – Vienna: International atomic energy agency, 2009.
20. Debarberis L., Kryukov A., Gillemot F., Acosta B., Sevini F. Semi-mechanistic analytical model for radiation embrittlement and re-embrittlement data analysis // Int. J. Pres. Ves. Piping. – 2005. – V. 82. – P. 195–200.
21. Todeschini P., Lefebvre Y., Churier-Bossennec H., Rupa N., Chas G., Benhamou C. Revision of the irradiation embrittlement correlation used for the EDF RPV fleet // Proceedings of Fontevraud 7, Paper A084-T01, 26–30 September 2010, Avignon, France.
22. United States Nuclear Regulatory Commission “Effect of residual elements on predicted radiation damage in reactor vessels materials”. Regulatory Guide. 1.99 (Rev.1), USNRC: Washington, DC, 1977.
23. Irradiation, annealing and reirradiation effects on American and Russian reactor pressure vessel steels / M. A Sokolov., A. A. Chernobaeva, R. K. Nanstad, et. al. // 19th International Symposium “Effects of Radiation on Materials”, ASTM STP1366. – West Conshohocken, PA: American Society of Testing and Materials, 2000.
24. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов ВВЭР-440 (В-179, В-230) с учетом их отжига при продлении срока эксплуатации до 60 лет. Методика МТ 1.1.4.02.1204–2017. – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2017.
25. Кулешова Е. А., Гурович Б. А., Штромбах Я. И., Фролов А. С., Федотова С. В., Мальцев Д. А., Крикун Е. В., Журко Д. А., Чернобаева А. А. Эволюция структуры и свойств стали 15Х2НМФАА КР ВВЭР-1000 под воздействием низкотемпературного облучения // 14-я международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС – Мейнстрим-2016», 6–10 июня 2016 г., Санкт-Петербург, Зеленогорск.
26. Pechenkin V. A. Stepanov I. A., Konobeev Yu. V. Modeling of phosphorus accumulation on grain boundaries in iron alloys under irradiation //: 20th Int. Symp. “Effects of Radiation on Materials”, ASTM STP 1405, 2001. – P. 174–187.
27. Dienes G. J., Damask A. C. J. Radiation enhanced diffusion in solids // Appl. Phys. – 1958. – V. 29. – P. 1713–1721.

28. Dienes G. J., Vineyard G. H. Radiation effects in solids. – New York: Interscience Publishers, 1957. – 226 p.
29. Okamoto P. R., Rehn L. E. Radiation-induced segregation in binary and ternary alloys // *J. Nucl. Mater.* – 1979. – V. 83, Is. 1. – P. 2–23.
30. McElroy R. J., English C. A., Foreman A. J., Gage G., Hyde J. M., Ray P. H. N., Vatter I. A. Temper embrittlement, irradiation induced phosphorus segregation and implications for post-irradiation annealing of reactor pressure vessels // 18th International Symposium “Effects of Radiation on Materials”, ASTM STP1325; ASTM; 1999. – P. 296–316.
31. Kimura A., Shibata M., Kasada R., Fujii K., Fukuya K., Nakata H. Assessment of Neutron Irradiation-Induced Grain Boundary Embrittlement by Phosphorous Segregation in a Reactor Pressure Vessel Steel // *ASTM Int.* 2 (JAI1239). – 2005. – V. 8.
32. Nishiyama Y., Onizawa K., Suzuki M., Anderegg J. W., Nagai Y., Toyama T., Hasegawa M., Kameda J. Effects of neutron-irradiation-induced intergranular phosphorus segregation and hardening on embrittlement in reactor pressure vessel steels // *Acta Mater.* – 2008. – V. 56. – P. 4510–4521.
33. Nishiyama Y., Yamagushi M., Onizawa K., Iwase A., Matsuzawa H. Irradiation-induced grain-boundary solute segregation and its effect on ductile-to-brittle transition temperature in reactor pressure vessel steels // *ASTM Int.* 6 (JAI10195). – 2009. – V. 9.
34. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Чистяков Д. А. Новый метод прогнозирования теплового старения сталей корпусов реакторов типа ВВЭР // *Вопросы материаловедения.* – 2013. – № 3(75). – С. 120–134.
35. Рыбин В. В., Николаев В. А. О механизмах, определяющих зависимость радиационного охрупчивания корпусной стали от ее химического состава // *Вопросы материаловедения.* – 1995. – № 1. – С. 27–54.
36. Mathon M. H., Barbu A., Dunstetter F., Maury F., Lorenzelli N., De Novion C. H. Experimental study and modeling of copper precipitation under electron irradiation in dilute FeCu binary alloys // *J. Nucl. Mater.* – 1997. – V. 245. – P. 224–237.
37. Рогожкин С. В., Никитин А. А., Алеев А. А., Залужный А. Г., Чернобаева А. А., Ерак Д. Ю., Штромбах Я. И., Забусов О. О. Исследование тонкой структуры материала сварного шва с высоким содержанием фосфора корпуса реактора ВВЭР-440 после облучения, отжига и повторного облучения // *Ядерная физика и инжиниринг.* – 2013. – Т. 4, № 1. – С. 73–82.
38. Boydon F., McElroy R., Gage G., Phythian W. Low Temperature Embrittlement of RPV Support Structure Steel // *ASTM STP1270*. DOI:10.1520/STR16482S.
39. McElroy R., Williams T., Boydon F., Hemsworth B. Low Temperature Embrittlement of LWR RPV Support Structures // *Int. J. Pres. Ves. Piping.* – 1993. – V. 54. – P. 171–211.
40. Miller M. K., Chernobaeva A. A., Shtrombakh Ya. I., Russel K. F., Nanstad R. K., Erak D. Yr., Zabusov O. O. Evolution of the nanostructure of VVER-1000 RPV materials under neutron irradiation and post irradiation annealing // *J. Nucl. Mater.* – 2009. – V. 385. – P. 615–622.
41. Gurovich B., Kuleshova E., Shtrombakh Ya., Erak D., Chernobaeva A., Zabusov O. Fine structure behaviour of VVER-1000 RPV materials under irradiation // *J. Nucl. Mater.* – 2009. – V. 389. – P. 490–496.
42. Kryukov A., Debarberis L., Ballesteros A., Krsjak V., Burcl R., Rogozhkin S. V., Nikitin A. A., Aleev A. A., Zaluzhnyi A. G., Grafutin V. I., Ilyukhina O., Funtikov Yu. V., Zeman A. Integrated analysis of WWER-440 RPV weld re-embrittlement after annealing // *J. Nucl. Mater.* – 2012. – V. 429. – P. 190–200.
43. Miller M. K., Russell K. F., Kocik J., Keilova E. Embrittlement of low copper VVER 440 surveillance samples neutron-irradiated to high fuences // *J. Nucl. Mater.* – 2000. – V. 282. – P. 83–88.
44. Kirk M. Assessment of flux effect exhibited by IVAR database // *Proc. of the IAEA Technical Meeting on Radiation embrittlement and Life Management of Reactor Pressure Vessels, Znojmo, Czech Republic, 18–22 October, 2010.*
45. D'Eason E. D., Odette G. R., Nanstad R. K., Yamamoto T. A. Physically Based Correlation of Irradiation-Induced Transition Temperature Shifts for RPV Steels. – ORNL/TM-2006/530, Nov. 2007.

46. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Application of Prometey local approach to brittle fracture: development and application // Eng. Fract. Mech. – 2008. – V. 75. – P. 3483–3498.

47. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G. Radiation embrittlement modeling in multi-scale approach to brittle fracture of RPV steels // Int. J. of Fracture. – 2013. – V. 179, Is. 1. – P. 87–108.

48. 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 // Proc. of the IAEA Technical Meeting. RRC “Kurchatov institute”, Gus khrustalny, Russia, 2008. – P. 38–53.

49. Kryukov A., Blagoeva D., Debarberis L. Flux effect analysis in wwer-440 reactor pressure vessel steels // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 443(1–3). – P. 171–175.

УДК 621.039.54:669.296

ЦИРКОНИЕВЫЕ СПЛАВЫ С Пониженной температурой плавления

А. М. САВЧЕНКО, канд. техн. наук, Ю. В. КОНОВАЛОВ, канд. техн. наук,
А. В. ЛАУШКИН, канд. техн. наук, Г. В. КУЛАКОВ, канд. техн. наук

ГНЦ РФ АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт
неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара (АО ВНИИНМ),
123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а, E-mail: post@bochvar.ru

Статья поступила 13.02.2018

Разработан новый класс циркониевых сплавов, представляющих собой глубокие тройные и четверные эвтектики с очень низкими для циркония температурами плавления – от 690 до 860°C. Они предназначены для использования в качестве матричного материала для ураноемкого дисперсного топлива, применяемого в реакторах, в частности тепловых. На базе новых циркониевых матричных сплавов разработаны ураноемкие (на 25–50% выше, чем для стандартного твэла реакторов ВВЭР и PWR) топливные композиции с высокими теплопроводностью и совместимостью. Использование нового дисперсного топлива может способствовать улучшению нейтронно-физических характеристик реакторов, увеличению выгорания топлива, снижению его температуры и повышению работоспособности в режиме переменных нагрузок.

Ключевые слова: циркониевые сплавы, легкоплавкие сплавы, эвтектика, атомная энергетика, тепловыделяющий элемент

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлов А. Г., Волков В. С., Солонин М. И. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 400 с.

2. Никулина А. В. Циркониевые сплавы в атомной энергетике // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 11. – С. 8–12.

3. Yokoyama Yo., Inoue H., Fukaura K., Inoue A. Relationship Between the Liquidus Surface and Structures of Zr–Cu–Al Bulk Amorphous Alloys // Materials Transactions, 2002. – V. 43, N 3. – P. 575–579.

4. Gupta K. P. The Ni–Ti–Zr System (Nickel–Titanium–Zirconium) // Journal of Phase Equilibria. – 1999. – V. 20, N 4. – P. 441–448.

5. Lee D. M., Sun J. H., Kang D. H., Shin S. Y. Experimental investigation of Zr-rich Zr–Zr₂Ni–(Zr,Ti)₂Ni ternary eutectic system // Journal of Materials Research. – 2009. – V. 24, N 7. – P. 2338–2345.

6. Sun J. H., Lee D. M., Lee C. H., Hong J. W., Shin S. Y. A novel Zr–Ti–Ni–Cu eutectic system with low melting temperature for the brazing of titanium alloys near 800°C // Journal of Materials Research. – 2010. – V. 25, N 2. – P. 296–302.

7. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3-х т.: Т. 2 / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.

8. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3-х т.: Т. 1 / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.

9. Savchenko E. M., Vatulin A. V., Kulakov G. V., Lipkina K. V., Sorokin V. I., Morozov A. V., Ershov S. A., Uferov O. I., Mainikov E. V., Kozlov A. V. Peculiarities of fuel cycle with advanced composite fuel for thermal reactors // Progress in Nuclear Energy. – 2014. – V. 72. – P. 119–125.

10. Savchenko A. M., Vatulin A. V., Morozov A. V., Kulakov G. V., Ershov S. A., Laushkin A. V., Maranchak S. V., Kononov Y. V., Malamanova E. K. Zirconium matrix alloys as innovative material for different types of fuel // Progress in Nuclear Energy. – 2012. – V. 57. – P. 138–144.