

ЖУРНАЛ «ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ»

№ 4 (92), 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Памяти выдающегося ученого-материаловеда Георгия Павловича Карзова7

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Оленин М. И., Горынин В. И. Влияние среднетемпературного дополнительного отпуска на глубину азотированного слоя деталей из стали 38ХЗМ1Ф1А 11

Алиев А. А. Исследование и разработка низкоуглеродистой стали с заданной структурой и свойствами для статоров автомобильных генераторов с целью повышения их выходных характеристик.....22

Гурьев В. В., Шавкин С. В., Иродова А. В., Круглов В. С. Особенности фазового расслоения сильно текстурированной ленты из сплава Ti – 33 ат. % Nb в результате искусственного старения29

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Герашенков Д. А., Аскинази А. Ю. Особенности тепловых эффектов при термическом нагружении покрытий, полученных методом холодного газодинамического напыления37

Фармаковский Б. В. Литые микропровода с высоким значением термоЭДС47

Прибытков Г. А., Криницын М. Г., Фирсина И. А., Дураков В. Г. Твердость и абразивная износостойкость электронно-лучевых покрытий карбид титана – титановая связка, наплавленных синтезированными композиционными порошками 52

Лю Сян Яо. Ионообменный способ получения частиц гидроксида алюминия микронных размеров.....62

Злобина И. В., Бекренев Н. В., Павлов С. П. Влияние СВЧ электромагнитного поля на микроструктуру изделий, сформированных путем трехмерной печати из неметаллических композиционных материалов71

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Павловский К. А., Серкова Е. А., Мельников Д. А., Гуняева А. Г. Производство изделий из полимерных композиционных материалов методом пултрузии для гражданских отраслей промышленности81

Петрова П. Н., Маркова М. А., Готовцева М. Е. Разработка материалов триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена и углеродных волокон марки УВИС-АК-П90

Бахарева В. Е., Никитина И. В., Саргсян А. С., Аристов В. Ф., Вихров И. А. Теплостойкие электроизоляционные стеклопластики в судостроении..... 100

Анисимов А. В., Трясунов В. С., Шульцева Е. Л., Соколов Ю. В., Мудрый Ф. В. Эпоксивинилэфирное связующее для огнестойких стеклопластиков судостроительного назначения 120

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Тимофеев М. Н., Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Литвинов С. Г., Александрин А. Г., Башулин Д. Л., Шубин О. В. Повышение служебных характеристик металла монтажных сварных соединений транспортных атомных энергетических установок из теплоустойчивых сталей. Часть 1. Технология сварки теплоустойчивых сталей углеродистыми сварочными материалами в условиях отсутствия термической обработки и опыт применения сварочных материалов 131

Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Шубин О. В. Повышение служебных характеристик металла монтажных сварных соединений транспортных атомных энергетических установок из теплоустойчивых сталей. Часть 2. Исследование механических свойств металла «силовых» малоуглеродистых наплавов в зависимости от технологических параметров сварки 140

Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Михалева Э. И. Повышение служебных характеристик металла монтажных сварных соединений транспортных атомных энергетических установок из теплоустойчивых сталей. Часть 3. Исследование влияния легирующих элементов в наплавленном металле

на его характеристики применительно к выполнению «силовых» малоуглеродистых наплавов и монтажных сварных швов энергетических установок атомных ледоколов 149

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Кузьмин Ю. Л., Трощенко В. Н. Электрохимические характеристики протекторных сплавов в морской воде и других агрессивных средах, содержащих сероводород..... 162

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Луценко А. Н., Гриневиц А. В., Скрипачев С. Ю., Баканов А. В. К вопросу определения расчетных характеристик авиационных металлических материалов с учетом воздействия коррозионной среды. .. 169

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Воеводин В. Н., Ожигов Л. С., Митрофанов А. С., Василенко Р. Л., Рыбальченко Н. Д., Гоженко С. В., Крайнюк Е. А. Эволюция микроструктуры металла главного циркуляционного трубопровода реактора ВВЭР-1000 в процессе его длительной эксплуатации 183

Марголин Б. З., Пирогова Н. Е., Потапова В. А., Сорокин А. А., Бардашова Н. В., Петров С. Н., Михайлов М. С. Исследование механизмов коррозионного растрескивания стали для ВКУ ВВЭР на основе имитационных испытаний 193

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Мусяенко А. Ю., Леонов В. П., Козлова И. Р., Петров С. Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в титановых сплавах с учетом микроструктуры и результатов измерений кристаллографических ориентировок методом EBSD-анализа 219

ХРОНИКА

Конференции 2018 235

Перечень статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вопросы материаловедения» в 2017 году 241

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов 245

УДК 621.785.532:669.15–194.55

ВЛИЯНИЕ СРЕДНЕТЕМПЕРАТУРНОГО ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОТПУСКА НА ГЛУБИНУ АЗОТИРОВАННОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 38ХЗМ1Ф1А

М. И. ОЛЕНИН, канд. техн. наук, В. И. ГОРЫНИН, д-р техн. наук

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

Статья поступила 25.05.2017, в окончательной редакции – 2.11.2017

Предложена технология, позволяющая увеличить глубину азотирования поверхностного слоя деталей из стали бейнитно-мартенситного класса. Применение среднетемпературного дополнительного отпуска после термического улучшения обеспечивает более чем двукратное увеличение глубины азотированного слоя деталей из стали 38ХЗМ1Ф1А без изменения механических свойств.

Ключевые слова: сталь бейнитно-мартенситного класса, азотирование, глубина азотированного слоя, среднетемпературный дополнительный отпуск

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков И. И., Строганов Г. Б., Новиков А. И. Металловедение, термообработка и рентгенография. – М.: МИСИС, 1994. – 480 с.

2. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.

3. Джиолитти Ф. Азотирование стали. – Л.: Изд-во литературы по черной металлургии, 1937. – 240 с.

4. Устиновщиков Ю. И., Банных О. А. Природа отпускной хрупкости сталей. – М.: Наука, 1984. – 240 с.

5. Зотова А. О., Теплухина И. В. Исследование влияния термического старения на склонность к хрупкому разрушению корпусной стали с содержанием никеля 0,6–0,8% // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 2(58). – С. 24–32.

6. Астафьев А. А., Юханов В. А., Шур А. Д. Исследование термического старения и его влияние на склонность к хрупкому разрушению корпусных сталей // МиТОМ. – 1988. – № 2. – С. 13–15.

7. Марков С. И. Металловедческие основы производства заготовок высоконадежных элементов энергетических и трубопроводных систем // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2013. – 83 с.

8. Пигрова Г. Д. Влияние длительной эксплуатации на карбидные фазы в Cr–Mo–V сталях // МиТОМ. – 2003. – № 3. – С. 6–9.

9. Гладышев С. А., Григорян В. А. Броневые стали. – М.: Интернет Инжиниринг, 2010. – 335 с.

10. Горицкий В. М. Тепловая хрупкость. – М.: Metallurgizdat, 2007. – 384 с.

11. Бокштейн С. З. Структура и механические свойства легированной стали. – М.: Металлургия, 1954. – 270с.

12. Бокштейн С. З. Диффузия и структура металлов. – М.: Металлургия, 1973. – 206 с.

13. Горынин В. И., Оленин М. И. Повышение хладостойкости низколегированных термоупрочняемых сталей за счет коагуляции карбидных фаз // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 3 (79). – С. 5–14.

14. Оленин М. И., Горынин В. И., Михайлов М. С. Изменение карбидной фазы в термоупрочняемой стали марки 09Г2СА-А после среднетемпературного дополнительного отпуска // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 2 (86). – С. 26–32.

15. Ляхович Л. С. Химико-термическая обработка металла и сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.

16. Оленин М. И., Горынин В. И., Тимофеев Б. Т., Павлов В. Н., Рогожкин В. В. Природа тепловой хрупкости сталей оборудования АЭС и методы ее снижения // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 3 (79) – С. 167–173.

17. Горынин В. И., Оленин М. И. Пути повышения хладостойкости сталей и сварных соединений. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2017. – 341 с.

18. Оленин М. И., Горынин В. И., Федосеев М. Л. Некоторые аспекты повышения хладостойкости сталей перлитного класса // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 2 (74). – С. 5–12.

19. Горынин В. И., Кондратьев С. Ю., Оленин М. И. Повышение сопротивляемости хрупкому разрушению перлитных и мартенситных сталей при термическом воздействии на морфологию карбидной фазы // МиТОМ. – 2013. – № 10. – С. 22–29.

20. Филимонов Г. Н. Создание и совершенствование материалов для крупногабаритных изделий машиностроения. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2012. – 169 с.

21. Патент РФ № №2574944. Способ химико-термической обработки деталей из сталей мартенситного класса // Оленин М. И., Горынин В. И., Бережко Б. И., Филимонов Г. Н., Ованесьян К. К., Фадеев А. Н. Опубликовано 10.03.2016. Бюл. № 4.

УДК 669.15–194.2:621.313.12:629.33

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С ЗАДАННОЙ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ ДЛЯ СТАТОРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

А. А. АЛИЕВ, канд. техн. наук

*ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» НИИАЭ, 105187, Москва, ул. Кирпичная, 39,
E-mail: test-eng@mail.ru*

Статья поступила 23.10.2017

Проведен анализ свойств холоднокатаной ленты из стали 08кп-ОМ, предназначенной для изготовления статоров с наборным пакетом, и установлено, что причинами относительно невысоких магнитных и токоскоростных характеристик автомобильных генераторов являются неоднородная структура стали (размер зерна феррита 6–9 баллов) и относительно невысокая пластичность (не

более 23%). С целью повышения магнитных характеристик статора и выходных характеристик отечественных генераторов разработана низкоуглеродистая сталь 035Ю с заданной структурой (размер зерна феррита 7–8 баллов) и повышенной пластичностью (35–41%). Внедрение разработанной стали 035Ю для изготовления на автоматической линии статоров по методу «свернутые на ребро» позволило повысить магнитные и выходные характеристики автомобильных генераторов 94.3701 и их модификаций до уровня аналогичных генераторов КС фирмы Bosch.

Ключевые слова: статор, генератор, низкоуглеродистая сталь, размер зерна феррита, холоднокатаная лента, магнитные свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение / Под ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1996. – С. 165.
2. Материаловедение. Изд. 3-е, перераб. и доп. / Под ред. Б. Н. Арзамасова и Г. Г. Мухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 260 с.
3. Уваров В. В., Носова Е. А. Структура и свойства листовых сталей для холодной штамповки. – Самара: СГАУ, 2004. – 73 с.
4. Попов Е. А., Ковалев В. Г., Шубин И. Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 480 с.
5. Парамонов Р. А. Многопозиционная холодная штамповка листовых профилей // Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Тула, 2010. – 17 с.
6. Алиев А. А. Металловедческие аспекты в производстве автотракторного электрооборудования. – М.: Изд-во МГТУ «МАМИ», 2009. – 267 с.
7. Алиев А. А. Использование низкоуглеродистой стали при изготовлении деталей электрооборудования транспортных средств холодной штамповкой // Вестник машиностроения. – 2013. – № 3. – С. 81–83.
8. Харсеев В. Е. Совершенствование процессов холодной штамповки на основе оценки использования ресурса пластичности материала заготовки // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: Изд-во МГТУ «МАМИ». – 2016. – 14 с.
9. Алиев А. А. Новые материалы и технологии их обработки для автомобильных генераторов // Сб. тр. Всероссийского электротехнического конгресса с международным участием ВЭЛК-99 «На рубеже веков: итоги и перспективы». Т. 3. – М., 1999. – С. 363–364.
10. Патент РФ на полезную модель № 118636. Холоднокатаная лента, выполненная из низкоуглеродистой термически обработанной стали, предназначенная для изготовления деталей электрооборудования транспортных средств / Алиев А. А., Алиев Ак., Алиев Аз. – Опубл. 27.07. 2012.

УДК 669.295'293:621.785.784

ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВОГО РАССЛОЕНИЯ СИЛЬНО ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА Ti – 33 ат.%Nb В РЕЗУЛЬТАТЕ ИСКУССТВЕННОГО СТАРЕНИЯ

В. В. ГУРЬЕВ, С. В. ШАВКИН, А. В. ИРОДОВА, д-р физ.-мат. наук,
В. С. КРУГЛОВ, канд. техн. наук

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

Статья поступила 6.10.2017

Ключевые для практического использования сверхпроводящих титанониобиевых сплавов физические свойства, такие как плотность сверхпроводящего тока и модули упругости, определяются фазовым составом и микроструктурой. Приведены результаты исследования фазового расслоения в тонкой сильно текстурированной холоднокатаной ленте из сверхпроводящего сплава Ti–33 ат.%Nb, подвергнутой искусственному старению при температуре 385°C в течение 25 ч. Обнаружено, что термическая обработка приводит к выпадению в исходной сверхпроводящей β -фазе с объемно центрированной кубической структурой (ОЦК) сильно текстурированных микрочастиц несверхпроводящей α -фазы с гексагональной плотно упакованной структурой (ГПУ). Установлено, что α -фаза наследует кристаллографическую текстуру исходной β -фазы в соответствии с законом Бюргерса для мартенситного превращения ОЦК→ГПУ. На основе обобщения экспериментальных данных

сделан вывод, что термообработка холоднокатаной ленты Ti – 33 ат.%Nb способствует повышению содержания в ней α -фазы с менее чем 1 до 6 об.%.

Ключевые слова: титанониобиевый сплав, кристаллографическая текстура, фазовое расслоение, фазовый переход, термическая обработка, наследование текстуры

ЛИТЕРАТУРА

1. Collings E. W. Applied superconductivity, metallurgy, and physics of titanium alloys. – New York: Plenum Press, 1986. – 808 p.
2. Sharma R. G. Superconductivity Basics and Applications to Magnets. – New York: Springer, 2015. – 414 p.
3. Kolli R. P., Joost W. J., Ankem S. Phase stability and stress-induced transformations in beta titanium alloys // JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2015. – N 40. – P. 1273–1280.
4. Guo S., Zhang J., Cheng X., Zhao X. A metastable β -type Ti–Nb binary alloy with low modulus and high strength // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – N. 644. – P. 411–415.
5. Hermann R., Hermann H., Calin M., Buchner B., Eckert J. Elastic constants of single crystalline β -Ti70Nb30 // Scripta Materialia. – 2012. – V. 66. – P. 198–201.
6. Panigrahi A., Sulkowski B., Waitz T., Ozaltinc K., Chrominski W., Pukenas A., Horkya J., Lewandowskac M., Skrotzki W., Zehetbauer M. Mechanical properties, structural and texture evolution of biocompatible Ti–45Nb alloy processed by severe plastic deformation // J. Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2016. – N 62. – P. 93–105.
7. Völker B., Jäger N., Calin M., Zehetbauer M., Eckert J. Hohenwarter A. Influence of testing orientation on mechanical properties of Ti45Nb deformed by high pressure torsion // Materials and Design. – 2017. – N 144. – P. 40–46.
8. Geetha M., Singh A. K., Asokamani R., Gogia A. K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants. – A review // Progress in Materials Science – 2009 – N 54. – P. 397–425.
9. Дергунова Е. А., Потанина Л. В., Губкин И. Н. Основы материаловедения NbTi сверхпроводников. Применение сверхпроводников: Учеб.-метод. пособие. – М.: Изд-во МИФИ, 2009. – 48 с.
10. Потанина Л. В. Исследование качества двойных NbTi и тройных NbTiTa сплавов и разработка сверхпроводников на их основе для различных технических применений // Автореф. дис. ... к.т.н.: 05.16.01. – М., 2006.
11. Guryev V. V., Shavkin S. V., Kruglov V. S., Volkov P. V., Vasiliev A. L., Ovcharov A.V., Likhachev I. A., Pashaev E. M., Svetogorov R. D., Zubavichus Y. V. Apparent anisotropy effects of upper critical field in high-textured superconducting Nb–Ti tapes // J. of Phys.: Conf. Ser. – 2016 – V. 747–012034
12. Texture Analysis with MTEX – Free and Open Source Software Toolbox / Bachmann F. et al. (Eds) // Solid State Phenomena. – 2010. – V. 160 – P. 63–68.
13. Roisnel T., Rodriguez-Carvajal J. WinPLOTR: a Windows tool for powder diffraction patterns analysis // Mater. Sci. Forum, 2001. – V. 118–123. – P. 378–381. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.561.2063&rep=rep1&type=pdf>
14. Gepreel M. A.-H. Texturing Tendency in β -Type Ti-Alloys // Recent developments in the study of recrystallization / Ed. by P. Wilson. – Rijeka: InTech, 2013. – P. 117–138. URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/42424/InTech-Texturing_tendency_in_type_ti_alloys.pdf
15. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Анализ аксиальной текстуры фотографическим методом // Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСИС, 1994. – С. 153–156.
16. Wenk H.-R., Van Houtte P. Texture and anisotropy // Rep. Prog. Phys. – 2004. – V. 67 – P. 1367–1428. <http://eps.berkeley.edu/~wenk/TexturePage/Publications/TexRevRPP.pdf>

УДК 621.793.7:620.149.13

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, А. Ю. АСКИНАЗИ, канд. физ.-мат. наук
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
Шпалерная ул., 49, E-mail: mail@crism.ru

Статья поступила 29.05.2017, в окончательной редакции – 12.09.2017

Изложены результаты работы по исследованию методом дифференциальной сканирующей калориметрии тепловых процессов при термическом нагружении при температурах от 20 до 1100°C покрытий, полученных методом холодного газодинамического напыления порошковых смесей на основе алюминия, никеля и титана.

Ключевые слова: покрытия, порошковые смеси, холодное газодинамическое напыление, термическое нагружение, дифференциальная сканирующая калориметрия

ЛИТЕРАТУРА

1. Deevi S. C., Sikka V. K. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications // *Intermetallics*. – 1996. – V. 4, N 5. – P. 357– 375.
2. Симс Ч. Т. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных установок. – М.: Металлургия, 1995.
3. Колесников М. И. Катализ и производство катализаторов. – М.: Техника, 2004. – 400 с.
4. Мухленов И. П., Добкина Е. И., Дерюжкина В. И., Сороко В. Е. Технология катализаторов. Изд. 3-е. – М.: Химия, 1989. – 272 с.
5. Бегун П. И. Гибкие элементы медицинских систем. – СПб.: Политехника, 2002. – 296 с.
6. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. – М.: Техносфера, 2006. – 224 с.
7. Кожемякин Г. Б., Белоконов К.В. Исследование процесса каталитического обезвреживания оксида углерода и пропана с использованием интерметаллидных катализаторов // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. – 2012. – С. 125– 133.
8. Шалин Р. Е. Монокристаллы никелевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1997.
9. Тарасенко Ю. П., Царева И. Н., Леванов Ю. К., Кривина Л. А., Бердник О. Б., Ильичев В. А. О возможности получения защитного покрытия интерметаллидного состава методом газодинамического порошкового напыления // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – Т. 3, № 83. – С. 91–99.
10. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. – Новосибирск: Физматлит, 2010. – 536 с.
11. Oryshchenko A. S., Gerashchenkov D. A. Aluminum matrix functional coatings with high microhardness on the basis of Al–Sn + Al₂O₃ composite powders fabricated by cold gas dynamic spraying // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2016. – V. 7. – P. 863– 867.
12. Геращенко Д. А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом «холодного» газодинамического напыления на основе армированных порошков системы Al–Sn + Al₂O₃ // Автореф. дис.... канд. техн. наук. – ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2015.
13. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Машек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // *Вопросы материаловедения*. – 2014. – № 2(77). – С. 87–96.

УДК 621.74:621.315.3

ЛИТЫЕ МИКРОПРОВОДА С ВЫСОКИМ ЗНАЧЕНИЕМ ТЕРМОЭДС

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 21.08.2017

Рассмотрены специфические особенности процесса литья микропроводов методом высокоскоростной закалки расплава. Определены условия подбора пары металл – стекло для достижения требуемых технологических и механических свойств микропроводов. Проведено исследование сплава системы Cu–Zr–Si–B и определен его оптимальный состав, перспективный для литья мик-

ропроводов с высокой термоэлектродвижущей силой (термоЭДС) по типовой технологии. ТермоЭДС полученных микропроводов составляет более $40 \text{ мкВ}\cdot\text{К}^{-1}$, что делает их весьма перспективными для изготовления микротермопар.

Ключевые слова: литые микропровода, термоэлектродвижущая сила, состав сплава, технология литья

ЛИТЕРАТУРА

1. Литой микропровод и его свойства / Е. Я. Бадинтер и др. – Кишинев: Штиинца, 1973.
2. Горынин И. В., Фармаковский Б. В. Длинномерные литые микропровода в стеклянной изоляции с жилкой из интерметаллических соединений // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 4(84). – С. 58–61.
3. Glimois J. L., Forey P., Feron J. L. // J. Less-Common Met. – 1985. – V. 113, № 2. – P. 213–224.
4. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабрев В. А. Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск: Удмуртия, 2014. – 480 с.
5. 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.
6. Масайло Д. В., Смелов А. И., Песков Т. В., Фармаковский Б. В. Разработка тензо- и терморезисторных сплавов для литья микропроводов // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 3(79). – С. 73–78.
7. 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.
8. Масайло Д. В., Ковалева А. А., Фармаковский Б. В. Повышение прочности литых микропроводов после их получения // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3(59). – С. 108–113.
9. Патент РФ № 2 393 257. Аморфный сплав для литья микропроводов / Б. В. Фармаковский, А. И. Беляева, А. Ф. Васильев, Е. Ю. Земляницын, К.А. Кузьмин, П. А. Кузнецов // Оpubл. 02.10.2008.
10. Фармаковский Б. В., Улин И. В. Функциональные материалы и покрытия – пути и надежды // По пути созидания. Т 2. / Под ред. акад. РАН И. В. Горынина. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. – С. 149–163.

УДК 621.791.92:621.762:620.178.1

ТВЕРДОСТЬ И АБРАЗИВНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ПОКРЫТИЙ КАРБИД ТИТАНА – ТИТАНОВАЯ СВЯЗКА, НАПЛАВЛЕННЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ ПОРОШКАМИ

Г. А. ПРИБЫТКОВ, д-р техн. наук, М. Г. КРИНИЦЫН, И. А. ФИРСИНА, канд. техн. наук,
В. Г. ДУРАКОВ, канд. техн. наук

*ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения» СО РАН (ИФПМ СО РАН),
634055, Томск, Академический пр., д. 2/4,*

Статья поступила 06.09.2017

Методом электронно-лучевой наплавки композиционных порошков карбид титана – титан с различным содержанием титановой связки получены покрытия толщиной до 3–5 мм на подложках из титана ВТ1-0. Исследована структура наплавленных покрытий. Обнаружено частичное или полное растворение карбидной фазы исходных композиционных порошков в расплаве наплавочной ванны, благодаря чему в покрытиях формируется структура, содержащая как исходные, так и перекристаллизованные карбидные частицы. Исследованы твердость и абразивная износостойкость наплавов всех составов, а также трещиностойкость карбидных частиц, построены профили микротвердости в переходной зоне покрытие – подложка. Максимальная твердость покрытий соответственно в 3,7 и 2,2 раза, а износостойкость – в 21,6 и 13,8 раза выше по сравнению со свойствами титана ВТ1-0 и титанового сплава ВТ6. Полученные результаты могут быть использованы при раз-

работке технологий нанесения износостойких покрытий на поверхность ответственных деталей из титана и его сплавов.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, металломатричные композиты, карбид титана, титан, наплавка, растворение в наплавочной ванне, микроструктура, твердость, абразивная износостойкость, механизм изнашивания, вязкость разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zwicker U. Titan und Titanlegierungen. – Springer-Verlag, 1974. – 717 p.
2. Hamedy M. J., Torkamany M. J., Sabbaghzadeh J. // Effect of pulsed laser parameters on in-situ TiC synthesis in laser surface treatment // Optics and lasers in engineering. – 2011. – V. 49. – P. 557–563.
3. Ke-min Z., Jian-xin Z., Jun L., Zhi-shui Y., Hui-ping W. Surface modification of TC4 alloy by laser cladding with TiC + Ti powders. // Nonferrous Met. Soc. China. – 2010. – V. 20. – P. 2192–2197.
4. Bataev I. A., Bataev A. A., Golkovski M. G., Krivizhenko D. S., Losinskaya A. A., Lenivtseva O. G. Structure of surface layers obtained by atmospheric electron beam cladding of graphite-titanium powder mixture on to titanium surface // Applied Surface Science. – 2013. – V. 284. – P. 472–481.
5. Liu W., Du Pont J. N. Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by Laser Engineering Net Shaping // Scripta Materialia. – 2003. – V. 48, Iss. 9. – P. 1337–1342.
6. Прибытков Г. А., Криницын М. Г., Коржова В. В. Исследование продуктов СВ-синтеза в порошковых смесях титана и углерода, содержащих избыток титана // Перспективные материалы. – 2016. – № 5. – С. 59–68.
7. Панин В. Е., Белюк С. И., Дураков В. Г., Прибытков Г. А., Ремпе Н. Г. Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование, технология, свойства покрытий // Сварочное производство. – 2000. – № 2. – С. 34–38.
8. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справ. изд. / Под ред. Т. Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.
9. Anstis G. R., Chantikul P., Lawn B. R., Marshall D. B. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I, direct crack measurements // Journal of the American Ceramic Society. – 1981. – V. 64, N 9. – P. 533–538.
10. Jang J., Pharr G. M. Influence of indenter angle on cracking in Si and Ge during nanoindentation // Acta Materialia. – 2008. – T. 56, №. 16. – С. 4458–4469.
11. Кипарисов С. С., Левинский Ю. В., Петров А. П. Карбид титана: получение, свойства, применение. – М.: Металлургия, 1987. – 216 с.
12. Guemmaz M., Mosser A., Ahujab R., Johansson B. Elastic properties of substoichiometric titanium carbides: comparison of FP-LMTO calculations and experimental results // Solid state communications. – 1999. – T. 110, N. 6. – P. 299–303.
13. Криницын М. Г., Прибытков Г. А., Корчагин М. А. СВС композиционные порошки TiC – титановая связка для наплавки и напыления // Сб. тр. VI Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», Юрга, 21–23 мая 2015 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 90–94.
14. Liu D., Zhang S. Q., Li A., Wang H. M. Microstructure and tensile properties of a laser melting deposited TiC/TA15 titanium matrix composite // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – V. 485. – P. 156–162.

УДК 661.183.12

ИОНООБМЕННЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ЧАСТИЦ ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ МИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ

ЛЮ СЯН ЯО

*Северо-Восточный нефтяной университет, Китайская Народная Республика,
163318, Дацин, ул. Фачжань, 199. E-mail: liuxianguao1@126.com*

Статья поступила 13.09.2017

Ионообменным методом получены частицы гидроксида алюминия микронных размеров. Этот метод обеспечивает диспергирование и кристаллизацию геля под воздействием ионообменных смол после смешивания их с воздухом, изменение его микроструктуры. При этом модифицирование, диспергирование и очищение геля выполняются одной операцией. В результате применения данного метода получены ультрамелкие (1 мкм) частицы сверхчистой (98,5%) гидроокиси алюминия. Проведен анализ характеристик полученного продукта с помощью инструментальных методов анализа: СЭМ, ИК-спектроскопии, РФА и т. д.

Ключевые слова: микронные частицы, гидроксид алюминия, гель, ионообменный метод

ЛИТЕРАТУРА

1. Dickson R., Saleem M., Bhatti M. A. The Production of Al(OH)₃ from Indigenous High-Silica Bauxite // *Arabian journal for science and engineering*. – 2017. – V. 42, N 4. – P. 1529–1535.
2. Степанова Е. В., Шарыгин Д. Е., Швалев Ю. Б. Влияние условий осаждения на физико-химические характеристики геля гидроксида алюминия // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2004. – № 1. – С. 99–101.
3. Huang J., Xia J., Luo Z. Preparation and growth mechanism of aluminium hydroxide by precipitation method with sodium carbonate // *Chemical industry and engineering progress*. – 2017. – V. 36, N 3. – P. 1120–1125.
4. Jiang Q., Lei L. Preparation of nanoaluminium hydroxide with high crystallinity from aluminiumisopropoxide through a hydrolysis-hydrothermal process // *Materials Review*. – 2008. – V. 22, N 3. – P. 23–25.
5. Петрова Е. В., Дресвянников А. Ф., Цыганова М. А., Губайдуллина А. М., Власов В. В. Физико-химические свойства наночастиц гидроксидов и оксидов алюминия, полученных электрохимическим способом // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2008. – № 5. – С. 302–310.
6. Курбангалеева А. Р., Куркин А. И., Хакимуллин Ю. Н., Петрова Е. В., Дресвянников А. Ф. Возможности стабилизации наночастиц гидроксида алюминия, полученных электрохимическим способом // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2010. – № 9. – С. 704–707.
7. Venkatesan Anand, Wankat Phillip C. Simulation of ion exchange water softening pretreatment for reverse osmosis desalination of brackish water mulation of ion exchange water softening pretreatment for reverse osmosis desalination of brackish water // *DESALINATION*. – 2011. – V. 271, N 1–3. – С. 122–131.
8. Лин Маунг Маунг, Шитова В. О., Каграманов Г. Г. Очистка сточных вод от тяжелых металлов методом ионного обмена // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2016. – Т. 30, № 2. – С. 109–110.
9. Satyajit D. Sarker, Lutfun Nahar. Natural products isolation: methods and protocols. – New Jersey: Humana press, 2012.
10. Zhou S., Li Y., Zhang Z. Reactive ion exchange synthesis of nano-ZnO and its photocatalytic properties // *Chinese journal of catalysis*. – 2010. – Т. 31, № 4. – С. 380–382.
11. Уханьский университет. Эксперимент аналитической химии. – Пекин: Издательство высшего образования, 1985. – С. 145–147.
12. Zhou H., Sun S., Ding H. Surface Organic Modification of TiO₂ Powder and Relevant Characterization // *Advances in materials science and engineering*. – 2017 [Article ID 9562612.8 pages].
13. Ostroski I. C., Borba C. E., Silva E. A., Arroyo P. A., Guirardello R., Barros M. A. S. D. Mass transfer mechanism of ion exchange in fixed bed columns // *Journal of chemical&engineering data*. – 2011. – N 56(3). – P. 375–382.
14. Sanjeev K., Sapna J. History, introduction, and kinetics of ion exchange materials // *Journal of chemistry*. – 2013. – Т. 2013. – С. 1–13.

УДК 621.762.5:678:621.9.048

ВЛИЯНИЕ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ИЗДЕЛИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ПУТЕМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. В. ЗЛОБИНА, канд. техн. наук, Н. В. БЕКРЕНЕВ, С. П. ПАВЛОВ

*Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина,
410054, Саратов, ул. Политехническая, 17*

Статья поступила 10.11.2017

Аддитивные технологии являются одним из перспективных направлений цифрового многономенклатурного производства изделий различного назначения. Однако для данных объектов, в частности изготовленных из неметаллических материалов, характерна значительная анизотропия физико-механических свойств и низкий уровень прочности в сложном деформированном состоянии и в условиях динамических знакопеременных нагрузок, особенно при изгибе. В настоящей работе исследованы изменения микроструктуры и макрогеометрии объектов, сформированных путем трехмерной печати, после воздействия на них сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля различной мощности. Применены технологии 3DP (изготовление изделий с использованием порошковых материалов) и FDM (с использованием плавящейся в экструдере полимерной нити). СВЧ электромагнитное поле со средней удельной мощностью частотой 2450 МГц способствует повышению плотности и однородности структуры как порошковых, так и полимерных материалов, размер пор уменьшается на 24% и почти на 30% снижается их дисперсия. Уменьшаются диаметральные размеры образцов из термопласта ABS и повышается геометрическая точность в поперечном сечении на порядок по сравнению с контрольными образцами. Исследование микроструктуры полученных объектов подтвердило, что в основе механизма воздействия СВЧ электромагнитного поля может лежать повышение прочности связующего в изделиях, полученных по технологии 3DP, и основного полимерного материала в изделиях, полученных по технологии FDM, за счет увеличения количества сшивок больших молекул полимера и определенной ориентации молекулярных диполей, стягивания их к осям симметрии и заращивания макро- и мезопор.

Ключевые слова: аддитивные технологии, порошковые композиционные материалы, полимерная нить, межслоевое взаимодействие, сверхвысокочастотное электромагнитное поле, удельная мощность, время воздействия, микроструктура, поры, геометрическая форма

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.
2. Каблов Е. Н. *Материалы и химические технологии для авиационной техники* // *Вестник Российской академии наук*. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 520–530.
3. Bourell D. L., Beaman J. J., Leu Jr. M. C., Rosen D. W. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead // *U. S. Turkey Workshop on Rapid Technologies*, 2009.
4. Ehrenberg R. The 3D Printing Revolution: Dreams Made Real One Layer at a Time // *Science News*. – 2013. – V. 183, N 5. – P. 20–25.
5. Holmes Jr L. R. and Riddick J. C. Research Summary of an Additive Manufacturing Technology for the Fabrication of 3D Composites with Tailored Internal Structure // *JOM*. – 2014. – V. 66, N 2. – P. 270–274.
6. Архангельский Ю. С. *Справочная книга по СВЧ-электротермии*. – Саратов: Научная книга, 2011. – 560 с.
7. Estel L., Lebaudy Ph., Ledoux A., Bonnet C., Delmotte M. Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles // *Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications*. – 2004. – № 11. – P. 33.
8. Калганова С. Г. *Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле* // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Саратов: СГТУ, 2009.

9. Zlobina I. V., Bekrenev N. V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials // *Наукоемкие технологии*. – 2016. – Т. 17. – № 2. – С. 25–30.

10. Zlobina, I. V., Bekrenev, N. V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural // *Solid State Phenomena*. 2016. – V. 870. – P. 101–106.

11. Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Muldasheva G. K. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field // *AIP Publishing*, 020236-1 – 020236-4.

12. Злобина И. В., Бекренев Н. В. Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий // *Вестник РГАТУ*. – 2017. – № 1(40). – С. 236–242.

13. Злобина И. В., Бекренев Н. В. Исследование изгибной прочности объектов 3D печати из диэлектрических материалов, модифицированных в СВЧ электромагнитном поле // *Динамика систем, механизмов и машин*. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 308–312.

14. Злобина И. В., Бекренев Н. В. Воздействие СВЧ электромагнитного поля на объекты 3D печати из композиционных порошковых материалов // *Вопросы электротехнологии*. – 2016. – № 1 (10). – С. 110–115.

УДК 678.067.5

ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПУЛТРУЗИИ ДЛЯ ГРАЖДАНСКИХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

К. А. ПАВЛОВСКИЙ, Е. А. СЕРКОВА, Д. А. МЕЛЬНИКОВ, А. Г. ГУНЯЕВА, канд. техн. наук

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

Статья поступила 26.10.2016, в окончательной редакции – 19.10.2017

Приведено описание технологии изготовления изделий из стеклопластика и исследовано влияние антипиренов на снижение горючести полимерных материалов. Представлены результаты исследований по разработке и оптимизации режимов изготовления образцов стеклопластика методом пултрузии. Приведены результаты исследования электрофизических, термо- и физико-механических характеристик образцов стеклопластиков, результаты испытания внешней резьбы на стеклопластиковой шпильке.

Ключевые слова: пултрузия, полимерные композиционные материалы, эпоксидное связующее, стекломат, стеклопластик, пожаробезопасность, резьба, стяжки.

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. Каблов Е. Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России. Сб. науч.-информац. материалов. Изд. 3-е. – М.: ВИАМ, 2015. – 720 с.

3. Каблов Е. Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. – 2014. – № 3. – С. 8–13.

4. Курносов А. О., Мельников Д. А. Характеристики стеклопластиков на основе высокодеформативных расплавных связующих в условиях воздействия эксплуатационных факторов // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. – 2015. – № 11. – С. 14–18.

5. Черфас Л. В., Гуняева А. Г., Комарова О. А., Антюфеева Н. В. Анализ срока годности наномодифицированного препрега при хранении по его реакционной способности // *Труды ВИАМ*. – 2016. – № 1. – Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-12-12.

6. Павловский К. А., Ямщикова Г. А., Гуняева А. Г., Улькин М. Ю. Разработка связующего, не поддерживающего горение углепластика, для изготовления толстостенных изделий из ПКМ методом прессового формования. // Труды ВИАМ. – 2016. – № 4. – Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-8-8.
7. Кодолов В. И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. – М.: Химия, 1976. – 160 с.
8. Аниховская Л. И., Батизат Д. В., Батурина Е. И., Лещун Е. В., Сахаров А. М. Негорючий пленочный клей и клеевой препрег на его основе // Клеи. Герметики. Технологии. – 2013. – № 6. – С. 2–6.
9. Копылов В. В., Новиков С. Н. Полимерные материалы пониженной горючести. – М.: Химия, 1986. – 224 с.
10. Кулезнев П. В. Исследование влияния фосфорсодержащих антипиренов на горючесть и диэлектрические свойства эпоксидных компаундов // Пластические массы. – 2012. – № 9. – С. 8–9.
11. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. – СПб.: НОТ, 2011. – 416 с.
12. Бобылев В. А. Отвердители эпоксидных смол // Композитный мир. – 2006. – № 4. – С. 20–24.
13. Пахаренко В. А., Пахаренко В. В., Яковлева Р. А. Пластмассы в строительстве. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 350 с.
14. Мошинский Л. М. Эпоксидные смолы и отвердители. – Тель-Авив: Аркадия-пресс ЛТД, 1995. – 370 с.
15. Федосеев М. С., Девятериков Д. М., Шелудяков В. Д. Синтез и свойства полимеров, полученных при отверждении эпоксидных олигомеров различной функциональности метилэндиксидом // Химическая технология. – 2013. – Т. 14. № 12. – С. 739–744.
16. Пат. 2420542 РФ. Способ получения огнестойкого связующего для создаваемых в пултрузионном технологическом процессе композиционных материалов, огнестойкое связующее и изделие. Опубл. 10.11.2010.
17. Гуняев Г. М., Чурсова Л. В., Комарова О. А., Гуняева А. Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 277–286.
18. Гуняев Г. М., Чурсова Л. В., Раскутин А. Е., Комарова О. А., Гуняева А. Г. Конструкционные полимерные угленанокомпозиты – новое направление материаловедения // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2011. – № 12. – С. 2–9.
19. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: Машиностроение. 1990. – 368 с.

УДК 678.743.41:621.891

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН МАРКИ УВИС-АК-П

П. Н. ПЕТРОВА¹, канд. техн. наук, М. А. МАРКОВА¹, М. Е. ГОТОВЦЕВА²

¹ФГБУН «Институт проблем нефти и газа» Сибирского отделения РАН, 677007, Якутск,
ул. Автодорожная, 29, E-mail: inm@ysn.ru

²ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова»,
677000, Якутск, ул. Кулаковского, 48

Статья поступила 28.06.2017, в окончательной редакции – 26.09.2017

Представлены результаты исследований по разработке перспективных полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена, содержащих углеродные волокна марки УВИС-АК-П. Показано, что технологический прием смешения компонентов с использованием сов-

местной механической активации позволяет в значительной степени повысить уровень триботехнических свойств полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, углеродные волокна, износостойкость, механическая активация, трение

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по применению фторопластовых композитов для уплотнительных устройств. – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1988. – 56 с.
2. Паншин Ю. А., Малкевич С. Г., Дунаевская Ц. С. Фторопласты. – Л.: Химия, 1978. – 232 с.
3. Логинов Б. А. Удивительный мир фторполимеров. – М.: Девятый элемент, 2007. – 128 с.
4. Петрова П. Н., Федоров А. Л. Разработка полимерных композитов на основе политетрафторэтилена с повышенной износостойкостью для узлов сухого трения // Вестник машиностроения. – 2010. – № 9. – С. 50–53.
5. Кузьмин В. Р., Ишков А. М. Прогнозирование хладостойкости конструкций и работоспособности техники на Севере. – М.: Машиностроение, 1996. – 304 с.
6. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Байбарацкая М. Ю., Мамаев О. А. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. – М.: ООО «Недра-Бизнес-центр», 2004. – 262 с.
7. Машков Ю. К. Трибофизика и свойства наполненного фторопласта. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1997. – 192 с.
8. Мелешко А. И., Половников С. П. Углерод. Углеродные волокна. Углеродные композиты. – М.: Сайнс-пресс, 2007. – 194 с.
9. Охлопкова А. А., Адрианова О. А., Попов С. Н. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями. – Якутск: Изд-во ЯФ СО РАН, 2003. – 224 с.
10. Машков Ю. К. Трибофизика металлов и полимеров. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 240 с.
11. Branrup J., Immergun E.H., Gruike E. A. Polymer Handbook. 4th ed. // J. Wiley and Sons (New York). – 1999. – V. 31.
12. Рамбиди Н. Г., Березкин А. В. Физические и химические основы нанотехнологий – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 456с.
13. Баженов С. Л., Берлин А. А., Кульков А. А., Ошмян В. Г. Полимерно-композиционные материалы: научное издание. – Долгопрудный: Взд. дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
14. Дорожин В. П., Галиуллина Р. Х., Галимова Е. М., Кочнев А. М. Влияние механоактивации полиэтилена на его гранулометрический состав // Вестник казанского технологического университета. – 2012. – № 2, Т. 15. – С. 45–46.
15. Соломко В. П., Нижник В. В., Гордиенко В. П., Лашко Т. Р. Исследование кристаллизации и плавления наполненных полимеров // Синтез и физикохимия полимеров. – 1973. – Вып. 16 – С. 91–94.
16. Белый В. А., Свириденко А. И., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. – Минск: Наука и техника, 1976. – 423 с.

УДК 678.067.5:621.777:621.396.67

ТЕПЛОСТОЙКИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СТЕКЛОПЛАСТИКИ В СУДОСТРОЕНИИ

В. Е. БАХАРЕВА¹, д-р техн. наук, И. В. НИКИТИНА¹, канд. хим. наук,
А. С. САРГСЯН¹, канд. техн. наук, В. Ф. АРИСТОВ², канд. физ.-мат. наук,
И. А. ВИХРОВ², канд. хим. наук

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

Статья поступила 22.09.2017

Работа посвящена решению актуальной научной проблемы – созданию и внедрению в судостроении отечественных высокопрочных теплостойких электроизоляционных стеклопластиков с максимальной температурой эксплуатации выше 200°C. Разработана технология горячего прессования и изготовлены изделия из стеклопластиков для электрической изоляции деталей судового движительного комплекса (главных и вспомогательных дизель-генераторов, турбогенераторов, электромоторов и др.), а также для высоковольтных изоляторов линий электропередач, железных дорог (взамен фарфоровых). Исследованы физико-механические и диэлектрические свойства электроизоляционных стеклопластиков (низкочастотных диэлектриков) при температурах от 20 до 300°C.

Ключевые слова: теплостойкие электроизоляционные стеклопластики, горячее прессование, физико-механические и диэлектрические свойства

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы. Справ. / Под ред. И. В. Горынина, А. С. Орыщенко, В. Е. Бахарева, Г. И. Николаева. – СПб.: НПО «Профессионал», 2014. – 903 с.
2. Бахарева В. Е., Орыщенко А. С. Высокопрочные стеклопластики для арктического машиностроения. – СПб.: АНО ЛА Профессионал, 2017. – 222 с.
3. Саргсян А. С., Бахарева В. Е. Новые теплостойкие стеклопластики электроизоляционного назначения // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 1 (85). – С.92–98.
4. Dawson, D., The Curiosity Mars rover: Descent stage composites // High-Performance Composites. May 2014. <https://www.compositesworld.com/articles/the-curiosity-mars-rover-descent-stage-composites>
5. Hexcel's Website (Reference date 10/11/2017). URL: [http://www.hexcel.com/Solutions/Aerospace/AJames-Webb-Telescope other site](http://www.hexcel.com/Solutions/Aerospace/AJames-Webb-Telescope%20other%20site)
6. Sommer M. Tailor-made composite performance properties for high temperature applications, presented at AVK Tagung Essen, Germany, 2010, September 14, <http://www.nasa.gov/hubble>
7. Radiation Resistant Electrical Insulation Qualified for ITER TF Coils / Naseem A. Munshi N. A. et al. // IEEE transactions on applied superconductivity. – 2013. – V. 3, N 3.
8. Wood K. HPC for Aircraft Interiors Conference review, 2012, December 31 (Reference date 10/11/2017). URL: <http://www.compositesworld.com/articles/hpc-for-aircraft-interiors-conference-review>
9. Roberts J. C. Handbook of Thermoset Plastics // 2014 Elsevier Inc. Composites: Part B. – 1999. – V. 30. – P. 177–187.
10. Бахарева В. Е., Конторовская И. А., Петрова Л. В. Полимеры в судовом машиностроении. – Л.: Судостроение, 1975. – 237 с.
11. Стекланные волокна / Под ред. М. С. Асланова. – М.: Химия, 1979. – 256 с.
12. Гуртовник И. Г., Спортсмен В. Н. Стеклопластики радиотехнического назначения. – М.: Химия, 1987. – 160 с.
13. Гуртовник И. Г., Соколов В. И., Трофимов Н. Н., Шалгунов С. И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. – М.: Мир, 2003. – 369 с.
14. Химическая обработка поверхности стеклнного волокна / Э. И. Бадалова, В. П. Бардушкина, Н. Я. Войцехович и др. / Под ред. М. С. Аслановой. – М.: Химия, 1966. – 112 с.
15. Давыдова И. Ф., Кавун Н. С. Стеклопластики – многофункциональные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии / Под ред. Е. Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2012. – С. 253–260.
16. Николаев А. Ф., Крыжановский В. К. Технология полимерных материалов / Учебное пособие. – СПб: Профессия, 2008. – 544 с.
17. Андрианов. К. А. Кремнийорганические соединения. – М.: Химия, 1955. – 505 с.

18. Кузнецов А. А., Семенова Г. К. Перспективные высокотемпературные термореактивные связующие для ПКМ // Российский химический журнал. – 2009. – Т. LIII, № 4. – С. 87–96.
19. Цегельская А. Ю., Семенова Г. К., Кузнецов А. А. Изучение процессов отверждения бисциановых эфиров методами ДСК и ИК спектроскопии // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 4 (72). – С. 185–189.
20. Интернет-сайт фирмы Lonza <http://www.lonza.com>
21. Интернет-сайт фирмы Isovolta <http://www.isovolta.com>
22. Вихров И. А., Аристов В. Ф., Гуров Д. А. Новые олигоциануратные связующие, содержащие фрагменты адамантана // V Международная конференция-школа по химии и физикохимии олигомеров. Волгоград, июнь 2015.
23. Вихров И. А., Аристов В. Ф., Гуров Д. А. Адамантан-олигоциануратные связующие для размерно-стабильных углепластиковых конструкций космических аппаратов // Решетневские чтения. Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2015. – Т. 1, № 19. – С. 91–93.
24. Брызгин А. А., Коробейников М. В., Пупков Ю. А., Михайленко М. А., Вихров И. А., Здвижков А. Т. Влияние больших доз ионизирующего излучения на механические свойства композитных материалов / Труды XXVII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела», Севастополь 2017.
25. Циркин М. З., Кострицкий С. Н. Стеклопластики в электромашиностроении. – СПб.: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.

УДК 678.067.5:678.744.52

ЭПОКСИВИНИЛЭФИРНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ ДЛЯ ОГНЕСТОЙКИХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. АНИСИМОВ¹, д-р техн. наук, В. С. ТРЯСУНОВ¹, Е. Л. ШУЛЬЦЕВА¹,
Ю. В. СОКОЛОВ², Ф. В. МУДРЫЙ², канд. техн. наук

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

²ООО «Волгоградпромпроект» 400057, г. Волгоград, ул. Промысловая, 47.

Статья поступила 19.04.2017, в окончательной редакции – 4.12.2017

Рассмотрены проблемы повышения огнестойкости смол, применяемых в судостроительной отрасли. Разработана огнестойкая фосфорсодержащая эпоксивинилэфирная смола марки ВЭ-ФАС и связующее на ее основе. Исследованы свойства связующих в зависимости от состава отверждающей системы, а также определены механические свойства и пожаробезопасность стеклопластика на основе разработанной смолы марки ВЭ-ФАС.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, стеклопластик, эпоксивинилэфирная смола, связующее, фосакрилат, антипирен

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячева И. Г., Бахарева В. Е., Анисимов А. В., Никитина И. В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов для изделий железнодорожной техники и инфраструктуры железных дорог // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – М.: Изд-во ОАО «РЖД», 2016. – С. 46–57.
2. Елисеев Ю. С., Крымов В. В., Колесников С. А., Васильев Ю. Н. Неметаллические композиционные материалы в элементах конструкций и производстве авиационных газотурбинных двигателей // Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 368 с.
3. Горев Ю. А., Ривкинд В. Н. Композиционные материалы на основе полиэфирных смол // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. общ-ва им. Д. И. Менделеева), 2009. – Т. LIII, № 4. – С. 19–34.
4. Середохо В. А., Горев Ю. А., Трясунов В. С. Проблемы выбора полимерного связующего для изготовления крупногабаритных конструкций из композита методом инфузии // Сб. «ВОКОР-2011», 2012. – С. 158–163.

5. Седов Л. Н., Михайлова З. В. Ненасыщенные полиэферы. – М.: Химия, 1977. – 231 с.
6. Альшиц И. М. Полиэфирные стеклопластики для судостроения. – Л.: Судостроение, 1964. – 285 с.
7. А. с. СССР № 132819 «Способ получения связующего для стеклопластиков», 1960.
8. Жуйков Ю. Г., Кушелев В. В., Лукьянов Н. П. Начало пластмассового судостроения // Вестник технологии судостроения. – 1997. – № 3. – С. 63–70.
9. Кодолов В. И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. – М.: Химия, 1976. – С. 157, 274.
10. А. с. СССР № 334226 «Способ отверждения ненасыщенных полиэфиров», 1972.
11. Халтуринский Н. А., Берлин А. А. Физические аспекты горения полимеров и механизм действия ингибиторов горения // Материалы IV Международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести», Волгоград, 2000. – С. 9–12.
12. Новаков И. А. Полимерные композиционные материалы в судостроении // Российский химический журнал. – 2009. – Т. LIII, № 4. – С. 35–40.
13. А. с. РФ № 1210444 «Связующее для стеклопластиков», 1992.
14. Бондаренко С. Н., Дхайбе М. Х., Хохлова Т. В., Тужиков О. И. Модификация композиций на основе реакционноспособных олигомеров фосфорсодержащим метакрилатом // Перспективные полимерные композиционные материалы, альтернативные технологии, переработка применение, экология / Тез. докл. междунар. конф. «КОМПОЗИТ-98», Саратов, 24–26 июня, 1998. – Саратов: Изд-во СГТУ, 1998. – С. 20.
15. Бахтина Г. Д., Кочнов А. Б., Кондрашова Е. В. Модификация ненасыщенного полиэфера сополимеризацией с фосфорсодержащим диметакрилатом // Пластические массы. – 2001. – № 1. – С. 10–11.
16. Бахтина Г. Д., Кочнов А. Б. Синтез и полимеризация фосфорсодержащих метакрилатов в присутствии хромоорганического катализатора // Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов: Сб. научн. трудов ВолгГТУ. – Волгоград. – 1997. – С. 20–23.

УДК 621.791.052:669.14.018.44:629.561.5

ПОВЫШЕНИЕ СЛУЖЕБНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА МОНТАЖНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ИЗ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ. Часть 1. Технология сварки теплоустойчивых сталей углеродистыми сварочными материалами в условиях отсутствия термической обработки и опыт применения сварочных материалов

М. Н. ТИМОФЕЕВ¹, канд. техн. наук, **Г. П. КАРЗОВ**¹, д-р техн. наук,
С. Н. ГАЛЯТКИН¹, канд. техн. наук, Э. И. МИХАЛЕВА¹, канд. техн. наук, С. Г. ЛИТВИНОВ²,
А. Г. АЛЕКСАНДРИН², Д. Л. БАШУЛИН², О. В. ШУБИН³

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

²АО «ОКБМ-Африкантов», 603074, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15

³АО ВМЗ «Красный Октябрь», 400007, Волгоград, пр. Ленина, 110

Статья поступила 2.08.2017

Приведено описание технологии выполнения монтажных сварных соединений при изготовлении оборудования энергетических установок атомных ледоколов из теплоустойчивых сталей типа 15Х2МФА с применением «силовых» малоуглеродистых наплавов.

Применение данной технологии – надежный способ обеспечения работоспособности оборудования энергетических установок атомных ледоколов в условиях отсутствия возможности применения термической обработки монтажных сварных соединений. Однако металл «силовой» малоуглеродистой наплавки имеет склонность к разупрочнению под воздействием многократных технологических отпусков, которым подвергаются сборочные единицы оборудования.

Ключевые слова: энергетические установки атомных ледоколов, монтажные сварные соединения, «силовые» малоуглеродистые наплавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров Э. Л., Якушин Б. Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов / Под ред. Э. Л. Макарова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 487 с.
2. Андреев С. Б., Головченко В. С., Горбач В. Д., Руссо В. Л. Основы сварки судовых конструкций. Учебник / Под общ. ред. В. Л. Руссо. – СПб.: Судостроение, 2006. – 552 с.
3. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения (ПНАЭГ-7-009–89). Сварные соединения и наплавки. Правила контроля (ПНАЭГ-7-010–89) / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 320 с.
4. Dupont J. N., Kusko C. S. Technical Note: Martensite Formation in Austenitic/Ferritic Dissimilar Alloy Welds // *Welding Journal*. – February 2007. – P. 51s–54s.
5. Земзин В. Н. Сварные соединения разнородных сталей – М.: Машиностроение, 1966. – 232 с.
6. Rowe M. D., Nelson T. W., Lippold J. C. Hydrogen-Induced Cracking along the Fusion Boundary of Dissimilar Metal Welds // *Welding Journal*. – February 1999. – P. 31s–37s.
7. Gupta K. Structural Integrity of Bimetallic Welds at Elevated Temperature // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2012. – V. 3 (1). – P. 235–243.
8. Gittos M. F., Gooch T. G. The Interface below Stainless Steel and Nickel-Alloy Claddings // *Welding Journal*. – December 1992. – P. 461s–472s.
10. Pressure Vessel Welding Requirements. – KLM Technology Group Project Engineering Standard, 2013. – 45 p.
11. Hänninen H. Dissimilar metal weld joints and their performance in nuclear power plant and oil refinery conditions. – VTT tiedotteita Notes, 2006. – 208 p.
12. King J. F., Sullivan M. D., Slaughter G. M. Development of an Improved Stainless Steel to Ferritic Steel Transition Joint // *Welding Journal*. – November 1997. – P. 354s–358s.
13. Сварочные материалы для дуговой сварки. Справочное пособие. В 2-х т. Т. 1: Защитные газы и сварочные флюсы / Б. П. Конищев, С. А. Курланов, Н. Н. Потапов и др. / Под общ. ред. Н. Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
14. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭГ-7-002–86). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
15. Горынин И. В., Карзов Г. П., Тимофеев Б. Т., Галяткин С. Н. Совершенствование сварочных материалов и технологии сварки для повышения безопасности и ресурса АЭС с реакторами ВВЭР // *Автоматическая сварка*. – 2006. – № 8. – С. 1–6.
16. Морфологические особенности структуры низколегированного металла шва и их влияние на свойства сварных соединений / А. В. Денисенко, В. Ф. Грабин, А. О. Корсун и др. // *Автоматическая сварка*. – 1990. – № 10 (451). – С. 32–37.
17. Evans G. M. The Effect of Sulphur and Phosphorus on Microstructure and Properties of C–Mn All-Weld-Metal Deposits // *Welding Research Abroad*. – 1991. – N 37 (2/3). – P. 20–31.
18. Перспективы развития атомного ледокольного флота / М. М. Кашка, А. А. Смирнов, С. А. Головинский и др. // *Арктика: экология и экономика*. – 2016. – № 3 (32). – С. 98–107.

УДК 621.791.052:669.14.018.44:629.561.5

ПОВЫШЕНИЕ СЛУЖЕБНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА МОНТАЖНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ИЗ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ. Часть 2. Исследование механических свойств металла «силовых» малоуглеродистых наплавов в зависимости от технологических параметров сварки

М. Н. ТИМОФЕЕВ¹, канд. техн. наук, С. Н. ГАЛЯТКИН¹, канд. техн. наук,
Э. И. МИХАЛЕВА¹, канд. техн. наук, О. В. ШУБИН²

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

²АО ВМЗ «Красный Октябрь», 400007, Волгоград, пр. Ленина, 110

Статья поступила 2.08.2017

Исследовано влияние режимов сварки, температуры и продолжительности технологических отпусков, типа сварочного флюса на прочностные свойства наплавленного металла применительно к «силовым» малоуглеродистым наплавкам оборудования транспортных АЭУ.

Ключевые слова: транспортные АЭУ, «силовые» малоуглеродистые наплавки, технологические параметры сварки, наплавленный металл, механические свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сварочные материалы для дуговой сварки. Справочное пособие. Т. 1: Защитные газы и сварочные флюсы / Б. П. Конищев, С. А. Курланов, Н. Н. Потапов и др./ Под общ. ред. Н. Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
2. Larson F. R., Miller J. A time-temperature relationship for rupture and creep stresses // Trans. ASME, 1952. – N 5. – P. 765–775.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
4. Evans G. M. The effect of Silicon on the microstructure and properties of C–Mn all-weld metal deposits // Metal Construction. – 1986. – № 18 (7). – P. 438–444.
5. Саррак В. И. Природа хладноломкости конструкционных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1977. – № 7. – С. 64–67.
6. Подгаецкий В. В. О влиянии химического состава металла шва на его микроструктуру и механические свойства // Автоматическая сварка. – 1991. – № 2. – С. 1–9.
7. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Михалева Э. И. Исследование свойств металла шва, выполненного с использованием агломерированного флюса, применительно к сварке корпусов водо-водяных атомных реакторов // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 4 (80). – С. 148–155.
8. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Шекин С. И., Михалева Э. И. Новый агломерированный флюс для автоматической сварки низколегированных теплоустойчивых сталей // Сварка и диагностика. – 2017. – № 2. – С. 44–48.
9. Касаткин О. Г., Миходуй Л. И. Выбор системы легирования швов при сварке высокопрочных сталей // Автоматическая сварка. – 1992. – № 5. – С. 19–25.
10. Evans G. M. The effect of Titanium in SMA C–Mn Steel Multipass Deposits // Welding Journal. – 1992. – December. – P. 447-s–454-s.
11. Tokuhisa M., Hirai Y., Nishiyama N., Yamashita I., Nisho K., Nakatsuji K. Development of High-Quality Narrow Gap Submerged Arc Welding Consumables for Cr–Mo Steel // Kawasaki Steel Technical Report. – 1986. – N 15 October.

УДК 621.791.052:669.14.018.44:629.561.5

ПОВЫШЕНИЕ СЛУЖЕБНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА МОНТАЖНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ИЗ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ. Часть 3. Исследование влияния легирующих элементов в наплавленном металле на его характеристики применительно к выполнению «силовых» малоуглеродистых наплавов и монтажных сварных швов энергетических установок атомных ледоколов

М. Н. ТИМОФЕЕВ, канд. техн. наук, С. Н. ГАЛЯТКИН, канд. техн. наук,
Э. И. МИХАЛЕВА, канд. техн. наук

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

Статья поступила 2.08.2017

Исследовано влияние легирующих элементов – кремния, марганца, никеля, молибдена – в составе сварочной проволоки на механические свойства металла шва, выполненного автоматической сваркой под флюсом.

Установлено, что прочностные и пластические свойства, а также критическая температура хрупкости металла шва как в исходном после сварки состоянии, так и после высоких отпусков, на требуемом уровне обеспечивает применение сварочной проволоки, содержащей в своем составе ~0,6% кремния и ~1,5% марганца.

Ключевые слова: транспортные АЭУ, «силовые» малоуглеродистые наплавки, агломерированный флюс, легирующие элементы, стойкость против хрупких разрушений, механические свойства наплавленного металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Шекин С. И., Михалева Э. И. Новый агломерированный флюс для автоматической сварки низколегированных теплоустойчивых сталей // Сварка и диагностика. – 2017. – № 2. – С. 44–48.

2. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Комолов В. М., Королев С. Ю. Новые материалы для автоматической сварки оборудования из стали 15Х2МФА-А перспективных АЭУ типа ВВЭР, обеспечивающие свойства металла шва на уровне требований к основному металлу // XIII международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», Санкт-Петербург, 2014.

3. Сварочные материалы для дуговой сварки: Справочное пособие: В 2-х т. Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы / Б. П. Конищев, С. А. Курланов, Н. Н. Потапов и др. / Под общ. ред. Н. Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.

4. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Михалева Э. И. Исследование свойств металла шва, выполненного с использованием агломерированного флюса, применительно к сварке корпусов водо-водяных атомных реакторов // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 4 (80). – С. 148–155.

5. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения (ПНАЭГ-7-009–89). Сварные соединения и наплавки. Правила контроля (ПНАЭГ-7-010–89). – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 320 с.

6. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭГ-7-002–86). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

7. Касаткин О. Г., Миходуй Л. И. Выбор системы легирования швов при сварке высокопрочных сталей // Автоматическая сварка. – 1992. – № 5. – С. 19–25.

8. Счастливец В. М., Калетина Ю. В., Фокина Е. А. Остаточный аустенит в легированных сталях. – Екатеринбург: НИСО УрО РАН, 2013. – 235 с.

9. Evans G. M. The effect of Silicon on the microstructure and properties of C–Mn all-weld metal deposits // Metal Construction. – 1986. – N 18 (7). – P. 438–444.

10. Солнцев Ю. П., Андреев А. К., Гречин Р. И. Литейные хладостойкие стали. – М.: Металлургия, 1991. – 176 с.

11. Рыбаков А. А., Филипчук Т. Н., Костин В. А. Особенности микроструктуры и ударная вязкость металла сварных соединений труб из высокопрочной стали с ниобием и молибденом // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3–4. – С. 17–24.

УДК 620.193.4

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОТЕКТОРНЫХ СПЛАВОВ В МОРСКОЙ ВОДЕ И ДРУГИХ АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ, СОДЕРЖАЩИХ СЕРОВОДОРОД

Ю. Л. КУЗЬМИН, д-р. техн. наук, В. Н. ТРОЩЕНКО, канд. техн. наук

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

Статья поступила 28.09.2017

Приведены результаты исследований по определению электрохимических характеристик алюминиевых и цинковых протекторных сплавов (защитный потенциал, токоотдача, коэффициент полезного использования) в морской воде и других агрессивных средах, содержащих сероводород.

Электрохимические характеристики алюминиевых протекторных сплавов в меньшей степени, чем характеристики цинковых протекторных сплавов, зависят от химического состава среды и наличия сероводорода. Сероводород, даже при небольших концентрациях (10%), снижает эффективность использования цинковых протекторных сплавов на 40% и более.

Ключевые слова: алюминиевые протекторные сплавы, цинковые протекторные сплавы, электрохимические характеристики, агрессивные среды, химический состав, сероводород

ЛИТЕРАТУРА

1. Гоник А. А. Сероводородная коррозия и меры ее предупреждения. – М.: Недра, 1966. – 177 с.
2. Гутман Э. М. Защита нефтепромыслового оборудования от коррозии. – М.: Недра, 1983. – 150 с.
3. Пассивность и коррозия металлов. Вып. 67 / Под ред. А. М. Сухотина. – Л.: Химия, 1971. – 210 с.
4. Колотыркин Н. Д. Коррозия и защита от коррозии. Т. 4. – М., 1975. – 180 с.
5. Отс А. А. Коррозия и износ поверхностей нагрева котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 272 с.
6. Бурмистрова О. Н., Тимохова О. М. Влияние сероводорода на скорость коррозии деталей лесных машин // Успехи современной науки и оборудования (Ухтинский государственный технический университет). – 2016. – № 12. – С. 82–84.
7. Быстрова О. Н. Влияние сероводорода на анодное поведение углеродистой стали в солевых растворах // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – С. 98–103.
8. Люблинский Е. Я. Критерии для оценки и создания протекторной защиты металлов от коррозии // Коррозия и защита от коррозии в нефтегазовой промышленности. – 1973. – № 11. – С. 19.
9. Люблинский Е. Я., Пирогов В. Д. Расчет протекторной защиты балластируемых танков и цистерн морских судов // Судостроение. – 1977. – № 8.
10. Люблинский Е. Я. Протекторная защита морских судов и сооружений. – Л.: Судостроение, 1977. – 188 с.
11. Бондаренко О. Н., Колябина И. Л., Маринич О. В. Проблема извлечения сероводорода из глубинных вод Черного моря // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2009. – № 2. – С. 92–97.
12. Протекторы для защиты от коррозии. Технические условия. ГОСТ 26251–84. – Издательство стандартов, 1987. – 28 с.

УДК 620.194.2:669.715

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ

А. Н. ЛУЦЕНКО, канд. техн. наук, А. В. ГРИНЕВИЧ, д-р техн. наук,
С. Ю. СКРИПАЧЕВ, А. В. БАКАНОВ

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

Статья поступила 15.11.2016, в окончательной редакции – 7.12.2017

Сформулирован подход к установлению расчетных характеристик авиационных металлических материалов в условиях воздействия коррозионной среды для сплошного твердого тела и тела

с трещиной с учетом характера действующих нагрузок. С помощью представленной матрицы предельных состояний определены направления исследований.

Оценка вязкости разрушения образцов алюминиевых сплавов при статическом нагружении с разной скоростью и в разных средах позволила установить возможность использования расчетных значений, полученных в лабораторных испытаниях на воздухе без воздействия коррозионной среды. Длительное воздействие коррозионной среды на образцы сплавов 1163АТВ и В95пчАТ2 с центральной трещиной, но без растягивающей нагрузки не привело к изменению вязкости разрушения, несмотря на коррозионные поражения поверхности образцов.

Предложена методика испытаний для оценки расчетных характеристик твердого тела с трещиной при длительном воздействии постоянной нагрузки и коррозионной среды. Методика расширяет возможности стандарта ASTM E1681, поскольку позволяет определять действующую в образце нагрузку и кинетику коррозионного поражения для тела с трещиной при длительном воздействии постоянной нагрузки и коррозионной среды.

Испытания в соответствии с предложенной методикой образцов из плит сплава В95пчТ2 показали парадоксальный факт роста вязкости разрушения, что, по-видимому, обусловлено «затуплением» коррозионной трещины.

Ключевые слова: авиационные металлические материалы, расчетные характеристики, коррозионная среда, вязкость разрушения

ЛИТЕРАТУРА

1. Авиационные правила. Ч. 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. // Межгосударственный авиационный комитет, 2015.
2. Применение конструкционных металлических материалов и определение их расчетных характеристик // Рекомендательный циркуляр РЦ-АП25-613. – Межгосударственный авиационный комитет, 2002.
3. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / Под ред. С. В. Серенсена. – М. Машиностроение, 1975. – 488 с.
4. Каблов Е. Н., Гриневич А. В., Ерасов В. С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 2. – С. 14–16.
5. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – Ижевск: ИКИ, 2012. – 872 с.
6. Ерасов В. С., Гриневич А. В., Сенник В. Я., Коновалов В. В., Трунин Ю. П., Нестеренко Г. И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 2. – С. 14–16.
7. Каблов Е. Н., Старцев О. В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 4. – С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
8. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Медведев И. М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 2. – С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
9. ASTM E1681–99e1. Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials. V.03 01, July 2001.
10. Пат. 148072 РФ. Устройство для оценки вязкости разрушения конструкционных материалов / Е. Н. Каблов, А. Н. Луценко, В. С. Ерасов, А. В. Гриневич, Г. А. Нужный, А. В. Лавров // БИ. 2014. – № 3. – Опубл. 27.11.14.
11. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении: – Введ. 1986–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.
12. Каблов Е. Н., Гриневич А. В., Луценко А. Н., Ерасов В. С., Нужный Г. А., Гулина И. В. Исследование кинетики разрушения конструкционных алюминиевых сплавов при длительном действии постоянной нагрузки и коррозионной среды // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 10. – С. 224.

13. Гриневич А. В., Ерасов В. С., Автаев В. В. Усовершенствованный метод определения релаксации напряжений в вершине трещины // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 9. – С. 40–44.

14. Гриневич А. В., Луценко А. Н., Ерасов В. С., Нужный Г. А. Методика оценки вязкости разрушения в коррозионной среде при длительной статической нагрузке // Заводская лаборатория и диагностика материалов. – 2017. – № 9. – С. 52–57.

15. 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.

УДК 669.15–194:621.039.53:620.186

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ГЛАВНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА РЕАКТОРА ВВЭР-1000 В ПРОЦЕССЕ ЕГО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. Н. ВОЕВОДИН, чл.-корр. НАНУ, д-р физ.-мат. наук, Л. С. ОЖИГОВ, канд. физ.-мат. наук,
А. С. МИТРОФАНОВ, канд. техн. наук, Р. Л. ВАСИЛЕНКО,
Н. Д. РЫБАЛЬЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук, С. В. ГОЖЕНКО, канд. техн. наук, Е. А. КРАЙНЮК

*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,
Академическая 1, Харьков, Украина. E-mail: nsc@kipt.kharkov.ua*

Статья поступила 10.10.2016, в окончательной редакции – 23.10.2017

Приведены результаты исследований металла главного циркуляционного трубопровода реактора ВВЭР-1000 после эксплуатации на ЮУ АЭС в течение 200 тыс. ч. С применением металлографии, сканирующей электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа были выявлены изменения в структуре стали 10ГН2МФА, имеющие признаки старения металла. Показано также, что для определения свойств металла трубопровода прямыми методами целесообразно применение методики маломасштабных вырезов без нарушения целостности конструкции.

Ключевые слова: главный циркуляционный трубопровод; ресурс, сталь 10ГН2МФА, свойства, структура, старение металла

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленский В. Ф., Неклюдов И. М., Ожигов Л. С., Пышный В. М., Митрофанов А. С., Гоженко С. В., Савченко В. И., Брык В. В., Рыбальченко Н. Д. Использование микрообразцов для контроля механических свойств и эволюции микроструктуры основного металла главного циркуляционного трубопровода (сталь 10ГН2МФА) энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС после 100 тыс. часов эксплуатации // ВАНТ. – 2000. – № 4. – С. 63–75.

2. Неклюдов И. М., Ожигов Л. С., Митрофанов А. С., Гоженко С. В., Савченко В. И., Брык В. В., Рыбальченко Н. Д., Крайнюк Е. А., Бажуков А. В., Мельник П. Е., Алексейчук В. В. Результаты исследований механических свойств металла трубопроводов энергоблока № 2 ЮУ АЭС после 100 тыс. часов эксплуатации // ВАНТ. – 2004. – № 3. – С. 52–58.

3. Неклюдов И. М., Ожигов Л. С., Гоженко С. В., Митрофанов А. С., Мищенко П. А. Оборудование и опыт применения методики определения механических свойств металла с помощью микрообразцов при контроле ГЦТ энергоблоков АЭС Украины после длительной эксплуатации // Сб. трудов СИАЭП. – 2004. – № 12. – С. 108–112.

4. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1978. – 647 с.

5. Скаков Ю. А. Старение металлических сплавов // Металловедение. Металлургия. – 1971. – С. 118–132.

6. Нохрин А. В., Чувильдеев В. Н. Старение сталей труб магистральных газопроводов // Вестник Нижегородского университета. – 2010. – № 5(2). – С. 171–180.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ СТАЛИ ДЛЯ ВКУ ВВЭР НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА, В. А. ПОТАПОВА,
А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук, Н. В. БАРДАШОВА, С. Н. ПЕТРОВ, канд. хим. наук,
М. С. МИХАЙЛОВ

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

Статья поступила 13.07.2017, в окончательной редакции – 20.11.2017

Проанализированы гипотезы коррозионного растрескивания материалов ВКУ, вызванного нейтронным облучением в среде I контура реакторов ВВЭР, – обеднение границ зерен хромом, локализация деформирования, упрочнение материала. Влияние нейтронного облучения смоделировано посредством проведения термической обработки и холодного пластического деформирования стали 08X18H10T.

Проведены автоклавные испытания в водной среде, имитирующей теплоноситель I контура ВВЭР, при температуре 290°C и скорости деформирования $3 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ образцов из стали 08X18H10T в различных состояниях: в исходном, после термической обработки, после термической обработки и холодного пластического деформирования. Выполнены исследования изломов и боковых поверхностей образцов методами сканирующей электронной микроскопии, а также исследования микроструктуры материала методами просвечивающей электронной микроскопии.

Показано, что обеднение границ зерен хромом и упрочнение материала не являются основными факторами, приводящими к коррозионному растрескиванию стали 08X18H10T в обескислороженной среде I контура ВВЭР. Одним из ключевых факторов коррозионного растрескивания стали при отсутствии межзеренного проскальзывания является локализация деформирования. Определены условия, при которых происходит развитие трещин по механизму коррозионного растрескивания.

Ключевые слова: сталь 08X18H10T, внутрикорпусные устройства реакторов ВВЭР, коррозионное растрескивание, автоклавные испытания, имитационные испытания

ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин Б. З., Варовин А. Я., Минкин А. И., Сорокин А. А., Пиминов В. А., Евдокименко В. В., Федосовский М. Е., Шерстобитов А. Е., Овчинников А. Г., Ерак Д. Ю., Бобков А. В., Тимофеев А. М., Тимохин В. И., Якушев С. В., Васильев В. Г. Определение изменения геометрии выгородки реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации. Расчет и измерение // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 3(83). – С. 182–196.
2. Карзов Г. П., Марголин Б. З. Основные механизмы радиационного повреждения материалов ВКУ и материаловедческие проблемы их длительной эксплуатации // Росэннергоатом. – 2015. – № 2. – С. 8–15.
3. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюрев В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970. – 422 с.
4. Namburi H. K., Hojna A., Zdenek F. Effect of tensile strain on microstructure of irradiated core internal material // Proc. of the 24th International Conference Nuclear Energy for New Europe. Portoroz, Slovenia, 2015.
5. Ernestova M. Influence of the Neutron Spectrum on the Sensitivity to IASCC and Microstructure of CW 316 Material // Proc. of the 8th International Symposium Fontevraud 8, Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs Safety, Performance and Reliability; SFEN 2014.
6. Determination of the time to failure curve as a function of stress for a highly irradiated AISI 304 stainless steel after constant load tests in simulated PWR water environment / С. Pokor, A. Toivonen, M. Wintergerst et al. // Proceedings of Fontevraud 7 Conference “Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs”, 26–30 Sept. 2010, Avignon, France. O3-A008-T2.

7. Radiation-induced material changes and susceptibility to intergranular failure of light-water-reactor core internals / S. M. Bruemmer, E. P. Simonen, P.M. Scott, et al. // *J. Nucl. Mater.* – 1999. – V. 274. – P. 299–314.
8. Influence of Carbide Precipitation and Rolling Direction on Intergranular Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Hydrogenated High-Temperature Water / K. Arioka, T. Yamada, T. Terachi, et al. // *Corrosion* – 2006. – V. 62. – P. 568–572.
9. Multi-scale characterization of stress corrosion cracking of cold-worked stainless steels and the influence of Cr content / S. Lozano-Perez, T. Yamada, T. Terachi, et al. // *Acta Materialia* – 2009. – N 57. – P. 5361–5381.
10. Fukuya K. Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials // *Journal of Nuclear Science and Technology.* – 2013. – V. 50 (№ 3). – P. 213–254.
11. Radiation effects on the stress corrosion and other selected properties of type 304 and type 316 stainless steel / A. J. Jacobs, J. P. Wozadlo, K. Nakata et. al. // *Proc. of 3rd Intern. Symp. "On Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems Water Reactors"*. 1988. – P. 673–680.
12. Scott P.– A review of irradiation assisted stress corrosion cracking // *J. Nucl. Mater.* – 1994, V. 211 – P. 101–122.
13. Bruemmer S. M., Charlot L. A., Atterige D. G. Sensitization development in austenitic stainless steels-measurement and prediction of thermomechanical history effects // *Corrosion.* – 1987. – V. 44. – P. 427.
14. Grain boundary composition and irradiation-assisted stress corrosion cracking resistance in type 348 stainless steel / A. J. Jacobs, J. P. Wozadlo, K. Nakata et. al. // *Corrosion.* – 1994. – V. 50. – P. 731–740.
15. Experimental and numerical investigation of stress corrosion cracking of sensitized type 304 stainless steel under high-temperature and high-purity water / T. Fujii, K. Tohgo, A. Kenmochi et. al. // *Corrosion Science.* – 2015. – V. 97. – P. 139–149.
16. Логан Х. Л. Коррозия металлов под напряжением. – М.: Металлургия, 1970. – 341.
17. Busby J. T., Was G. S., Kenik E. A. Isolating the effect of radiation-induced segregation in irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels // *J. Nucl. Mater.* – 2002. – V. 302. – P. 20–40.
18. Irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels: recent progress and new approaches / H. M. Chung, W. E. Ruther, J. E. Sanecki et. al. // *J. Nucl. Mater.* – 1996. – V. 239. – P. 61–79.
19. Characterization of surface oxides formed on irradiated stainless steels in simulated PWR primary water / K. Fukuya; H. Nishioka; K. Fujii, et. al. // *Fontevraud 8: Conference on Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs' Safety, Performance and Reliability; Avignon (France); 15–18 Sep 2014.*
20. Методология исследования коррозионных пленок на нержавеющей сталях / В. А. Зук, Р. А. Рудь, И. А. Петельгузов и др. // *Вопросы атомной науки и техники.* – 2010. – № 1 (95). – С. 141–149.
21. Hanninen H., Aho-Mantila I., Torronen K.. Environment sensitive cracking in pressure boundary materials of light water reactors//*Journal of Pressure Vessel and Piping.* – 1987. – V. 30. – P. 253–291.
22. Scott P. M. Environment-assisted cracking in austenitic components//*Journal of Pressure Vessel and Piping.* – 1996. – V. 65. – P. 255–264.
23. Марголин Б. З., Федорова В. А., Филатов В. М. Метод оценки долговечности внутрикорпусных устройств ВВЭР по критерию инициации межкристаллитного коррозионного растрескивания облученных аустенитных сталей // *Вопросы материаловедения.* – 2010. – № 3 (63). – С. 105–117.
24. Jiao Z., Busby J. T., Was G. S. Deformation microstructure of proton-irradiated stainless steels//*J. Nucl. Mater.* – 2007. – V. 361. – P. 218–227.
25. Was G. S., Farkas D., Robertson I. M. – Micromechanics of dislocation channeling in intergranular stress corrosion crack nucleation // *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* – 2012. – V. 16. – P. 134–142.

26. Karlsen W., Diego G., Devrient B. – Localized deformation as a key precursor to initiation of intergranular stress corrosion cracking of austenitic stainless steels employed in nuclear power plants // *J. Nucl. Mater.* – 2010. – V. 406. – P. 138–151.
27. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Бучатский А. А., Нестерова Е. В., Каштанов А. Д. Исследование влияния термического старения на длительную прочность и пластичность стали X18H9 // *Вопросы материаловедения.* – 2010 – № 4 (64). – С. 118–127.
28. Jiao Z., Was G. S. Localized deformation and IASCC initiation in austenitic stainless steels // *J. Nucl. Mater.* – 2008. – V. 382. – P. 203–209.
29. Little E. A. Fracture mechanics evaluations of neutron irradiated type 321 austenitic steel // *J. Nucl. Mater.* – 1986. – V. 139. – P. 261–276.
30. Li X., Almazouzi A. Deformation and microstructure of neutron irradiated stainless steels with different stacking fault energy // *J. Nucl. Mater.* – 2009. – V. 385. – P. 329–333.
31. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 599 с.
32. Slow strain rate tensile tests on irradiated austenitic stainless steels in simulated light water reactor environments / Y. Chen, A.S. Rao, B. Alexandreanu et. al. // *Nuclear Engineering and Design.* – 2014. – V. 269. – P. 38–44.
33. Hanninen H., Aho-Mantila I., Torronen K. Environment Sensitive Cracking in Pressure Boundary Materials of Light Water Reactors // *Journal of pressure vessel and piping.* – 1987. – V. 30. – P. 253–291.
34. Bali S. C., Kain V., Raja V. S.. Effect of Low-Temperature Sensitization on Intergranular Stress Corrosion Cracking Behavior of Austenitic Stainless Steels in Simulated Boiling Water Reactor Environment // *Corrosion.* – 2009. – V. 65 (11). – P. 726–740.
35. Intergranular Cracking of Irradiated Thermally Sensitized Type 304 Stainless Steel in High-Temperature Water and Inert Gas / K. Hide, T. Onchi, M. Mayuzumi et al. // *Corrosion.* – 1995. – V. 51(10). – P. 757–766.
36. Сорокин А. А., Марголин Б. З., Курсевич И. П., Минкин А. И., Неустроев В. С., Белозеров С. В. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР // *Вопросы материаловедения.* – 2011. – № 2 (66). – С. 131–152.
37. Курсевич И. П., Марголин Б. З., Прокошев О. Ю., Кохонов В. И. Механические свойства аустенитных сталей при нейтронном облучении: влияние различных факторов // *Вопросы материаловедения.* – 2006. – № 4(48). – С. 55–68.
38. Nanostructure and local properties of oxide layers grown on stainless steel in simulated pressurized water reactor environment / T. Massoud, V. Maurice, L. Klein et. al. // *Corrosion Science* – 2014. – V. 84. – P. 198–203.
39. Скалли Дж. Основы учения о коррозии и защите металлов. – М.: Мир, 1978. – 223 с.
40. Jiao Z., Was G., Miura T.. Aspects of ion irradiations to study localized deformation in austenitic stainless steels // *J. Nucl. Mater.* – 2014. – V. 452. – P. 328–334.
41. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Бучатский А. А., Балакин С. М. Прогнозирование скорости роста трещины в аустенитных материалах в условиях ползучести и нейтронного облучения // *Вопросы материаловедения.* – 2005. – № 4(44). – С. 59–68.
42. Alexandreanu B., Capell B., Was G. S. Combined effect of special grain boundaries and grain boundary carbides on IGSCC of Ni–16Cr–9Fe–xC alloys // *Materials Science and Engineering A.* – 2001. – V. 300. – P. 94–104.
43. Ulmer D. G., Altstetter C. J. Hydrogen-induced strain localization and failure of austenitic stainless steels at high hydrogen concentrations//*Acta Metallurgica et Materialia.* – 1991. – V. 39 (6). – P. 1237–1248.

УДК 669.295:539.3:620.18

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ С УЧЕТОМ МИКРОСТРУКТУРЫ И РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОРИЕНТИРОВОК МЕТОДОМ EBSD-АНАЛИЗА

А. Ю. МУСИЕНКО, канд. техн. наук, В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук,
И. Р. КОЗЛОВА, канд. техн. наук, С. Н. ПЕТРОВ, канд. хим. наук

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

Статья поступила 23.03.2017, в окончательной редакции – 28.08.2017

На основе микроструктурных исследований и измерений локальных кристаллографических ориентировок фрагментов структуры титановых сплавов методом EBSD-анализа созданы виртуальные структуры этих фрагментов и проведен расчет их одноосного деформирования методом конечных элементов с учетом измеренных кристаллографических характеристик, заданных анизотропных упругих модулей и систем кристаллографического скольжения. Для исследуемых фрагментов рассчитаны карты факторов Шмида. Рассмотрено влияние измеренных ориентировок на интенсивность теоретических напряжений и деформаций в нагруженных элементах поликристаллического материала.

Ключевые слова: титановые сплавы, пластичность кристаллов, EBSD-анализ, метод конечных элементов, микроструктурный анализ

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшкин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. – М.: ВИС–МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов / Под ред. С. Г. Глазунова и Б. А. Колачева. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
3. Полуфабрикаты из титановых сплавов. Серия: Титановые сплавы / Под ред. Н. Ф. Аношкина. – М.: Металлургия, 1996.
4. Миронов С. Ю., Даниленко В. Н., Мышляев М. М., Корнева А. В. Анализ пространственного распределения ориентировок элементов структуры поликристаллов, получаемого методами просвечивающей электронной микроскопии и обратно рассеянного пучка электронов в сканирующем электронном микроскопе // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, вып. 7. – С. 1217–1225.
5. Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении / Под ред. А. Шварца, М. Кумара, Б. Адамса, Д. Филда. – М.: Техносфера, 2014. – 559 с.
6. Даниленко В. Н., Миронов С. Ю., Беляков А. Н., Жиляев А. П. Применение EBSD-анализа в физическом материаловедении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – № 2, т.78. – С. 28–46.
7. Computational method for microstructure-property relationships / S. Ghosh, D. Dimiduk (Eds). – Springer, 2011.
8. Wei Sha, Savko Malinov. Titanium alloys: modeling of microstructure, properties and applications. – Woodhead Publishing, 2003.
9. Верхотуров А. Д., Мокрицкий Б. Я., Пустовалов Д. А. Метод как основа новой парадигмы материаловедения // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 1. – С. 1–14.
10. Fisher E. S., Renken C. J. Single-Crystal Elastic Moduli and the hcp → bcc Transformation in Ti, Zr, and Hf // Physical review. – 1964. – V. 135, N 2A. – P. A482–A494.
11. Jun T.-S., Sernicola G., Fionn P. E., Dunne T., Britton B. Local deformation mechanisms of two-phase Ti-alloy // Materials Science & Engineering. – 2016. – A649. – P. 39–47.
12. Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: theory, experiments, applications / F. Roters et al. // Acta Materialia. – 2010. – V. 58. – P. 1152–1211.
13. Cailletaud G. A. Micromechanical Approach to Inelastic Behaviour of Metals // Int. J. Plast. – 1991. – V. 8. – P. 55–73.

14. Коллингз Е. В. Физическое металловедение титановых сплавов: научное издание / Пер. с англ. / Под ред. Б. И. Веркина и В. А. Москаленко. – М.: Металлургия, 1988. – 223 с.
15. Tome C., Kocks U. F. The yield surface of h.c.p. crystals // Acta Metallurgica. – 1985. – V. 33, N 4. – P. 603–621.
16. Шмид Е., Боас В. Пластичность кристаллов в особенности металлических / Пер. с нем. М. П. Шаскольской. – М.-Л.: ГО НТИ СССР, 1938. – 316 с.
17. Чечулин Б. Б., Хесин Ю. Д. Циклическая и коррозионная прочность титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1987. – 208 с.
18. Цвиккер У. Титан и его сплавы / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
19. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 544 с.
20. Мусиенко А. Ю., Леонов В. П., Козлова И. Р., Паноцкий Д. А. Компьютерное моделирование реальной структуры титановых сплавов при исследовании процессов деформирования и разрушения. Часть 1. Постановка задачи и основные соотношения // Титан. – 2014. – № 3(45). – С. 45–54.
21. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.
22. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 472 с.
23. Агеев Н. В., Рубина Е. Б., Ковалева В. Н. Базисное и пирамидальное скольжение в монокристаллах альфа-сплава Ti–Al–Sn // Физика металлов и металловедение. – 1984. – Т. 58, вып. 2. – С. 383–388.
24. Рубина Е. Б., Бецофен С. Я. Механизм пластической деформации титанового альфа-сплава титан – алюминий – ванадий // Физика металлов и металловедение. – 1990. – № 4. – С. 191–198.
25. Маддин Р., Чен Н. К. Успехи физики металлов / Т. 2. – М.: Металлургиздат, 1958. – С. 69.