

СОДЕРЖАНИЕ

Памяти выдающегося ученого-металловеда, профессора, доктора технических наук
Виктора Андреевича Малышевского 7

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Будниченко М. А., Кононов В. А. Исследование влияния условий деформации при горячей гибке полосульбового профиля для кораблестроения на структуру и свойства стали типа 10ХН4МФА 9

Костин Н. А. Разработка эффективного способа повышения износостойкости сталей для молотовых штампов путем цементации в пастообразном карбюризаторе 14

Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Часть 1. Принципы легирования и требования к структуре листового проката 22

Волков А. М., Шестакова А. А., Востриков А. В., Бакрадзе М. М., Пустынников Т. О. Влияние температуры старения на выделение карбидных фаз по границам зерен в гранулируемом жаропрочном никелевом сплаве 48

Зыков С. А., Павлова В. И., Осокин Е. П. Механические свойства сварных соединений пресованного алюминиево-магниевого сплава марки 1565ч при низких и повышенных температурах 57

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Барахтин Б. К., Жуков А. С., Бобырь В. В., Шакиров И. В., Кузнецов П. А. Факторы повышения прочности металлов, полученных селективным лазерным сплавлением порошков 68

Васильева О. В., Виноградова Т. С., Парчуков А. В., Фармаковский Б. В. Специфические особенности стекол, применяемых для высокоскоростного микрометаллургического процесса литья микро-проводов 76

Фармаковский Б. В. Микропровода из сплавов на основе никеля, кобальта и меди с высокой температурной и временной стабильностью 82

Прибытков Г. А., Коржова В. В., Криницын М. Г., Фирсина И. А. Синтез и электронно-лучевая наплавка гибридных композиционных порошков TiB–TiC – титановая связка 89

Герашенков Д. А., Макаров А. М., Герашенкова Е. Ю., Васильев А. Ф. Получение функционального интерметаллидного покрытия Ni–Ti путем комбинации технологий гетерофазного переноса и лазерной обработки 102

Мельчаков С. Ю., Бодрова Л. Е., Гойда Э. Ю., Шубин А. Б., Сомов П. А. Экспериментальное получение композитов Cu–Cr–N и термодинамическое моделирование их фазового состава 111

Нагорная М. Н., Мышлявцев А. В., Ходакова С. Я. Влияние окисленного технического углерода N121 на свойства резин на основе бутилкаучука 123

Хорова Е. А., Мышлявцев А. В. Применение гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков в составе изделий, эксплуатируемых в условиях воздействия повышенных температур и агрессивных сред 129

Митряева Н. С., Мышлявцев А. В., Стрижак Е. А. Динамические свойства эластомерных композитов, наполненных многостенными углеродными нанотрубками 137

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Насонов Ф. А., Алексашин В. М., Мельников Д. А., Бухаров С. В. Исследование влияния модифицирования эпоксидной матрицы и углепластика на ее основе стеаратом цинка на основные технологические свойства композиции 146

Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л. Влияние длительного климатического старения на микро-структуру поверхности эпоксидных углепластиков	157
Примаченко Б. М., Строкин К. О. Теоретические и экспериментальные исследования композиционных материалов, армированных углеродными тканями. Часть 3. Моделирование и экспериментальные исследования структуры углеродной ткани	170
Бахарева В. Е., Богун В. С., Лишевич И. В., Никитина И. В., Саргсян А. С. Теплостойкие антифрикционные углепластики для подшипников скольжения насосов судовых энергетических установок, тепловых и атомных электростанций	177
РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
Гурович Б. А., Фролов А. С., Кулешова Е. А., Мальцев Д. А., Сафонов Д. В., Кочкин В. Н., Алексеева Е. В., Степанов Н. В. Дegradация материалов оболочек твэлов на основе циркония в условиях эксплуатации реакторов типа ВВЭР	191
Кулаков Г. В., Коновалов Ю. В., Косаров А. А., Перегуд М. М., Шишин В. Ю., Шельдяков А. А. Модифицированные циркониевые сплавы как материал оболочки дисперсионных тепловыделяющих элементов	206
ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ	
Оспенникова О. Г., Косарина Е. И., Крупнина О. А. Радиационный неразрушающий контроль – необходимое средство при создании и совершенствовании технологии новых авиационных материалов	213
ХРОНИКА	
Институту металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской Академии наук 80 лет	225
Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов	228

УДК 621.981:669.14.018.293

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ГИБКЕ ПОЛОСОБУЛЬБОВОГО ПРОФИЛЯ ДЛЯ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ ТИПА 10ХН4МФА

М. А. БУДНИЧЕНКО, канд. техн. наук, В. А. КОНОНОВ, канд. техн. наук

АО «ПО «Севмаш», 164500, Северодвинск, Архангельская обл., Архангельское шоссе, 58.

E-mail: smp@sevmash.ru

Статья поступила 11.05.2018

В процессе гибки полособульбового профиля из стали типа 10ХН4МФА при степени деформации свыше 3% и нагреве токами высокой частоты зоны деформации до температуры закалки стали (960°C) происходит микроразрушение границ зерен, формирование хрупкого излома ударных образцов и снижение ударной вязкости стали. При повышении температуры нагрева зоны деформации до 1050°C хрупкого разрушения профиля во всем интервале степени деформации не происходит.

Ключевые слова: полособульбовый профиль, горячая гибка, закалка, степень деформации, хрупкое и вязкое разрушение, ударная вязкость

ЛИТЕРАТУРА

1. Цирульников А. Н. Установка с индукционным нагревом для гибки профильного проката // Технология судостроения. – 1965. – № 4. – С.15–19.
2. Пластичность стали при высоких температурах / М. И. Зуев, В. С. Култыгин, М. И. Виноград и др. – М.: Металлургиздат, 1954. – 103 с.
3. Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова У. И. Высокопрочные свариваемые улучшаемые стали. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 211 с.
4. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Семичева Т. Г. Теоретические и экспериментальные основы создания вторичнотвердеющих свариваемых конструкционных сталей // Металлургия. – 1999. – № 9. – С.8–13.
5. Ковальчук М. В., Орыщенко А. С., Малышевский В. А., Петров С. Н., Шумилов Е. А. Проблемы создания технологичных экономнолегированных высокопрочных сталей для арктических конструкций // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2 (90). – С. 7–14.
6. Зисман А. А., Петров С. Н., Пташник А. В. Количественная аттестация бейнитно-мартенситных структур высокопрочных сталей методами сканирующей электронной микроскопии // Металлург. – 2014. – № 11. – С. 91–95.

УДК 669.14.018.258:621.785.52

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ ДЛЯ МОЛотовых ШТАМПОВ ПУТЕМ ЦЕМЕНТАЦИИ В ПАСТООБРАЗНОМ КАРБЮРИЗАТОРЕ

Н. А. КОСТИН, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», 305000, г. Курск, ул. Радищева 33

E-mail: info@kursksu.ru

Статья поступила 28.02.2018, в окончательной редакции – 12.07.2018

Рассмотрены особенности цементации штамповых сталей 5Х2МНФ и 5ХНСВ в азотисто-углеродной пасте для использования их в качестве материала для штамповых инструментов. Приведены результаты испытаний цементованных инструментов из стали марок 5Х2МНФ и 5ХНСВ, исследована микроструктура цементованных слоев. Проанализированы изменения концентрации углерода по глубине диффузионных слоев исследованных образцов

Ключевые слова: сталь 5Х2МНФ и 5ХНСВ, цементация, азотисто-углеродная паста, штамповый инструмент, изменение структуры и свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические процессы цементации и нитроцементации / В. М. Зинченко, Б. В. Георгиевская, В. А. Оловянный и др. – М.: НИИТавтопром, 1982. – 122 с.
2. Арзамасов В. Б., Волчков А. Н., Головин В. А. Материаловедение и технология конструкционных материалов. – М.: Академия, 2011. – 448 с.
3. Бондаренко Г. Г., Рыбалко В. В., Кабанова Т. А. Материаловедение. – М: Машиностроение, 2013. – 360 с.
4. Костин Н. А. Повышение эксплуатационных свойств штамповой стали 5Х2ГФ путем создания карбонитридных слоев химико-термической обработкой // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2016. – № 8. – С 19–22.
5. Патент RU № 2586178 С1 от 10.06.2016; Заявка № 2015109207/02. Способ нитроцементации деталей из конструкционных и инструментальных сталей / Н. А. Костин, В. И. Колмыков, Н. Н. Костин // Бюл. – 2016. – № 16.

УДК 669.14.018.41:621.771.23

НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ С ГАРАНТИРОВАННЫМ ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ 315–750 МПа ДЛЯ АРКТИКИ.

Часть 1. Принципы легирования и требования к структуре листового проката

О. В. СЫЧ, канд. техн. наук

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

Статья поступила 14.08.2018

Представлены результаты выбора рационального легирования и микролегирования хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа на базе установления взаимосвязи фазовых превращений, структуры, механических свойств, характеристик работоспособности и содержания основных легирующих элементов. Разработаны количественные требования к различным параметрам структуры и их максимально допустимых различий по толщине листового проката до 100 мм в зависимости от категории прочности, технологии изготовления (термомеханической обработки с ускоренным охлаждением, закалки с отдельного печного или прокатного нагрева с высокотемпературным отпуском) для получения гарантированных характеристик прочности, хладостойкости (работы удара KV при температуре испытаний $-60...-80^{\circ}C$, критических температур вязкохрупкого перехода $T_{кв}$ и нулевой пластичности NDT) и трещиностойкости по критерию критического раскрытия в вершине трещины CTOD.

Ключевые слова: низколегированная сталь, экономнолегированная сталь, индекс «Агс», термомеханическая обработка, закалка, закалка с прокатного нагрева, отпуск, механические свойства, хладостойкость, работоспособность, трещиностойкость, параметры структуры, феррит, бейнит, мартенсит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Принципы легирования, фазовые превращения, структура и свойства хладостойких свариваемых судостроительных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. – № 1. – С. 9–15.
2. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Хладостойкие стали для технических средств освоения арктического шельфа // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3 (59). – С. 108–126.
3. Орлов В. В. Принципы управляемого создания структурных элементов наноразмерного масштаба в трубных сталях при значительных пластических деформациях // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 2 (66). – С. 5–17.
4. Сыч О. В., Хлусова Е. И., Орлов В. В., Круглова А. А. Усовершенствование химического состава и технологических режимов производства штрипса K65–K70 (X80–X90) на базе имитационного моделирования // Металлург. – 2013. – № 2. – С. 50–58.

5. Коротовская С. В., Орлов В. В., Хлусова Е. И. Управление процессами структурообразования при термомеханической обработке судостроительных и трубных сталей унифицированного химического состава // *Металлург.* – 2014. – № 5. – С. 71–78.
6. Хлусова Е. И., Зисман А. А., Сошина Т. В. Построение и использование карт структурных изменений при горячей деформации аустенита низкоуглеродистой стали 09ХН2МДФ для оптимизации промышленных технологий // *Вопросы материаловедения.* – 2013. – № 1 (73). – С. 37–48.
7. Пазилова У. А., Хлусова Е. И., Князюк Т. В. Влияние режимов горячей пластической деформации при закалке с прокатного нагрева на структуру и свойства экономнолегированной высокопрочной стали // *Вопросы материаловедения.* – 2017. – № 3 (91). – С. 7–19.
8. Гусев М. А., Ильин А. В., Ларионов А. В. Сертификация судостроительных материалов для судов, эксплуатирующихся в условиях Арктики // *Судостроение.* – 2014. – № 5 (816). – С. 39–43.
9. Казаков А. А., Киселев Д. В. Современные методы оценки качества структуры металлов на основе панорамных исследований с помощью анализатора изображений Thixomet // *Перспективные материалы: Учебное пособие. Т. 5.* – Тольятти: Тольяттинский государственный университет. – 2013. – 421 с.
10. Казаков А. А., Казакова Е. И., Киселев Д. В., Мотовилина Г. Д. Разработка методов оценки микроструктурной неоднородности трубных сталей // *Черные металлы.* – 2009. – № 12. – С. 12–15.
11. Хлусова Е. И., Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Пазилова У. А. Влияние легирования на структуру и свойства высокопрочной хладостойкой стали после термической и термомеханической обработки // *Вопросы материаловедения.* – 2007. – № 1(49). – С. 20–31.
12. Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние структуры, сформированной при закалке, на свойства высокопрочной хладостойкой стали после отпуска // *Вопросы материаловедения.* – 2008. – № 1 (53). – С. 33–46.
13. Патент РФ № 2465346. Способ производства высокопрочного штрипса для труб магистральных трубопроводов / Сыч О. В., Хлусова Е. И., Голосиенко С. А., Орлов В. В., Милейковский А. Б., Галкин В. В., Денисов С. В., Стеканов П. А., Малахов Н. В. // *Бюл. изобретений.* – № 30 от 27.10.2012.
14. Патент РФ № 2507295. Высокопрочная хладостойкая Агс-сталь // Малышевский В. А., Хлусова Е. И., Голосиенко С. А., Хомякова Н. Ф., Милюц В. Г., Павлова А. Г., Пазилова У. А., Афанасьев С. Ю., Гусев А. А. // *Бюл. изобретений.* – № 5 от 20.02.2014.
15. Патент РФ № 2653748. Хладостойкая свариваемая сталь и изделие, выполненное из нее (варианты) // Сыч О. В., Орлов В. В., Хлусова Е. И., Яшина Е. А., Голубева М. В., Яковлева Е. А., Митрофанов А. В., Сычов О. Н., Городецкий В. И. // *Бюл. изобретений.* – № 14 от 14.05.2018.
16. Заявка на патент № 2016150730 от 23.12.2016 г. Хладостойкая свариваемая Агс-сталь повышенной прочности // Сыч О. В., Хлусова Е. И., Голосиенко С. А., Яшина Е. А., Пазилова У. А., Новоскольцев Н. С., Голубева М. В., Беляев В. А., Масанин Н. И., Гусев М. А.
17. Зисман А. А., Петров С. Н., Пташник А. В. Количественная аттестация бейнитомартенситных структур высокопрочных легированных сталей методами сканирующей электронной микроскопии // *Металлург.* – 2014. – № 11. – С. 91–95.
18. Kang J.-Y., Kim D. H., Baik S.-I., Ahn T.-H., Kim Y.-W., Han H. N., Oh K. H., Lee H.-C., Han S. H. Phase analysis of steels by grain-averaged EBSD Functions // *ISIJ International.* – 2011. – V. 51. – N 1 – P. 130–136.
19. Ильин А. В., Гусев М. А. Новые методики исследования сопротивления разрушению металла труб для магистральных газопроводов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* – 2013. – Вып. 6 (1362). – С. 47–60.
20. Сыч О. В., Гусев М. А., Башаев В. К., Мотовилина Г. Д., Рябов В. В. Хладостойкость высокопрочной легированной стали с пределом текучести 500 МПа // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства.* – 2014. – Вып. 37. – С. 29–38.
21. Сыч О. В., Круглова А. А., Счастливец В. М., Табатчикова Т. И., Яковлева И. Л. Влияние ванадия на дисперсионное упрочнение при отпуске высокопрочной трубной стали с различной исходной структурой // *Физика металлов и материаловедение.* – 2016. – Т. 117, № 12. – С. 1321–1331.

22. Wilson J. A. Dispersion strengthening in vanadium microalloyed steels processed by simulated thin slab casting and direct charging. Part 2 – Chemical characterisation of dispersion strengthening precipitates // *Materials Science and Technology*. – 2007. – N 23. – С. 509–518.
23. Голосиенко С. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. Новые высокопрочные хладостойкие стали для арктического применения // *Производство проката*. – 2014. – № 2. – С. 17–24.
24. 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.
25. Сыч О. В., Голубева М. В., Хлусова Е. И. Разработка хладостойкой свариваемой стали категории прочности 690 МПа для тяжело нагруженной техники, работающей в арктических условиях // *Тяжелое машиностроение*. – 2018. – № 4. – С. 17–25.
26. Одесский П. Д., Смирнов Л. А. О применении ванадия и ниобия в микролегированных сталях для металлических конструкций // *Сталь*. – 2005. – № 6. – С. 116–123.
27. Fernandez A. I., Uranga P., Lopez B., Rodrigues-Ibabe J. M. Dynamic recrystallization behavior covering a wide austenite grain size range in Nb and Nb–Ti microalloyed steels // *Materials Science and Engineering*. – 2003. – A 361. – P. 367–376.
28. Сошина Т. В., Зисман А. А., Хлусова Е. И. Влияние микролегирования ниобием на рекристаллизационные процессы в аустените низкоуглеродистых легированных сталей // *Вопросы материаловедения*. – 2013. – № 1 (73). – С. 31–36.
29. Настич С. Ю. Влияние морфологии бейнитной составляющей микроструктуры низколегированной стали Х70 на хладостойкость проката больших толщин // *Металлург*. – 2012. – № 3. – С. 62–69.
30. Казаков А. А., Киселев Д. В., Казакова Е. И., Курочкина О. В., Хлусова Е. И., Орлов В. В. Влияние структурной анизотропии в ферритно-бейнитных штрипсовых сталях после термомеханической обработки на уровень их механических свойств // *Черные металлы*. – 2010. – № 6. – С. 7–13.
31. Пышминцев И. Ю., Борякова А. Н., Смирнов М. А., Дементьева Н. В. Свойства низкоуглеродистых сталей, содержащих в структуре бейнит // *Металлург*. – 2009. – № 12. – С. 45–50.
32. Petrov R., Kestens L., Wasilkowska A., Houbaert Y. Microstructure and texture of a lightly deformed TRIP-assisted steel characterized by means of the EBSD technique // *Materials Science and Engineering A*. – 2007. – V. 447. – P. 285–297.
33. Wright S. I., Nowell M. M., Field D. P. A review of strain analysis using electron backscatter diffraction // *Microscopy and Microanalysis*. – 2011. – V 17. – P. 316–329.
34. Рыбин В. В., Малышевский В. А., Семичева Т. Г. Развитие теории вторичного твердения при создании высокопрочных корпусных марок стали // *Вопросы материаловедения*. – 2005. – №2 (42). – С. 55–68.
35. Mechanisms and modeling of cleavage fracture in simulated heat-affected zone microstructures of a high-strength low alloy steel / A. Lambert-Perlade, A. F. Gourgues, J. Besson et. al. // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2004. – V. 35A. – P. 1039–1053.
36. Guo Z., Lee C. S., Morris J. W. Jr. On coherent transformations in steel // *Acta Mater*. – 2004. – V. 52. – P. 5511–5518.
37. Byunchul H., Chang G. L., Sung-Joon K. Low-temperature toughening mechanism in thermomechanically processed high-strength low-alloy steels // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2011. – V. 2A. – P. 717–728.
38. Золоторевский Н. Ю., Зисман А. А., Панпурин С. Н., Титовец Ю. Ф., Голосиенко С. А., Хлусова Е. И. Влияние размера зерна и деформационной субструктуры аустенита на кристаллометрические особенности бейнита и мартенсита низкоуглеродистых сталей // *МиТОМ*. – 2013. – № 10 (700). – С. 39–48.
39. Счастливец В. М., Блинд Л. Б., Родионов Д. П., Яковлева Н. Л. Структура пакета мартенсита в конструкционных сталях // *ФММ*. – 1988. – Т. 66. – С. 759–769.
40. Morito S., Huang X., Furuhashi T., Maki T., Hansen N. The morphology and crystallography of lath martensite in alloy steels // *Acta Mater*. – 2006. – V. 54. – P. 5323–5331.

41. Takayama N., Miyamoto G., Furuohara T. Effects of transformation temperature on variant pairing of bainitic ferrite in low carbon steel // Acta Materialia. – 2012. – V. 60. – P. 2387–2396.

42. Зисман А. А., Золоторевский Н. Ю., Петров С. Н., Хлусова Е. И., Яшина Е. А. Панорамный кристаллографический анализ эволюции структуры при отпуске низкоуглеродистой мартенситной стали // МиТОМ. – 2018. – № 3 (753). – С 10–17.

43. Miyamoto G., Iwata N., Takayama N., Furuohara T. Quantitative analysis of variant selection in ausformed lath martensite // Acta Mater. – 2012. – V. 60. – P. 1139–1148.

УДК 669.245:621.762:621.785.78

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТАРЕНИЯ НА ВЫДЕЛЕНИЕ КАРБИДНЫХ ФАЗ ПО ГРАНИЦАМ ЗЕРЕН В ГРАНУЛИРУЕМОМ ЖАРОПРОЧНОМ НИКЕЛЕВОМ СПЛАВЕ

А. М. ВОЛКОВ, канд. техн. наук, А. А. ШЕСТАКОВА, А. В. ВОСТРИКОВ, канд. техн. наук,
М. М. БАКРАДЗЕ, канд. техн. наук, Т. О. ПУСТЫННИКОВ

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

Статья поступила 18.06.2018

Продемонстрирован подход к назначению режимов старения гранулируемого жаропрочного никелевого сплава для дисков ГТД. По результатам исследования микроструктуры установлены оптимальные температуры старения. Проведены механические испытания материала с различной объемной долей карбидных фаз по границам зерен. Полученные результаты подтверждают правильность обнаруженных закономерностей.

Ключевые слова: заготовка диска, ГТД, гранула, жаропрочный никелевый сплав, микроструктура, карбид

ЛИТЕРАТУРА

1. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы: 2-е изд. – М.: Металлургия, 1969. – 752 с.
2. Симс Ч. Т., Столофф Н. С., Хагель У. К. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Кн. 1. / Пер. с англ. / Под ред. Р. Е. Шалина. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
3. Каблов Е. Н., Голубовский Е. Р. Жаропрочность никелевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1998. – 464 с.
4. Логунов А. В., Шмотин Ю. Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). – М.: Наука и технология, 2013. – 264 с.
5. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Морозова Г. И., Светлов И. Л. Физико-химические факторы жаропрочности никелевых сплавов, содержащих рений // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина. – М.: Наука, 2006. – С. 116–131.
6. Ломберг Б. С., Бакрадзе М. М., Чабина Е. Б., Филонова Е. В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. – 2011. – № 2. – С. 25–30.
7. Волков А. М., Востриков А. В., Бакрадзе М. М. Принципы создания и особенности легирования гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 8. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 02.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-2-2.
8. ГОСТ Р 52802–2007. Сплавы никелевые жаропрочные гранулируемые. Марки. – М.: Стандартиформ, 2006. – 10 с.
9. Белов А. Ф., Аношкин Н. Ф., Фаткуллин О. Х. Структура и свойства гранулируемых никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984. 128 с.
10. Волков А. М., Буюкина А. А. Особенности структуры материала при производстве заготовок из гранул жаропрочного никелевого сплава // Металлург. – 2017. – № 11. – С. 61–65.
11. Зайцев Д. В., Сбитнева С. В., Бер Л. Б., Заводов А. В. Определение химического состава частиц основных фаз в изделиях из гранулируемого никелевого жаропрочного сплава ЭП741НП //

Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 9. Ст.08 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 02.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-8-8.

12. Гарибов Г. С. Перспективы развития отечественных дисковых гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов для новых образцов авиационной техники // Технология легких сплавов. – 2017. – № 1. – С. 7–28.

13. Давыдов А. К., Кононов С. А., Батулин А. И., Фаткуллин О. Х. Производство турбинных дисков по технологии металлургии гранул // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 5. – С. 21–22.

14. Овсепян С. В., Ахмедзянов М. В., Мазалов И. С., Расторгуева О. И. Легирование углеродом сплава системы Ni–Co–Cr–W, упрочняемого химико-термической обработкой // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 4 (37). – С. 21–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-21-24.

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. – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

УДК 669.715:621.791.052

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРЕССОВАННОГО АЛЮМИНЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ 1565ч ПРИ НИЗКИХ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

С. А. ЗЫКОВ, канд. техн. наук, В. И. ПАВЛОВА, канд. техн. наук, Е. П. ОСОКИН

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

Статья поступила 12.04.2018

Приведены результаты исследования структуры и механических свойств сварных соединений горячепрессованных панелей и профилей, изготовленных АО «Арконик СМЗ» из алюминиево-магниевого сплава марки 1565ч, в диапазоне температур от минус 165 до 150°C. Установлено, что при различных температурах испытаний характер изменения свойств сварных соединений прессованных панелей и профилей из сплава 1565ч, выполненных ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом АрДС с присадочным материалом СвАМг61, аналогичен изменению свойств сварных соединений катаных листов. При понижении температуры испытаний происходит низкотемпературное упрочнение сварных соединений – при криогенной температуре минус 165°C достигается природопрочности, равной 20–30% прочности при температуре 20°C. Длительная выдержка сварных соединений при повышенной температуре (150°C) приводит к снижению прочности на 25–30% по сравнению с прочностью при температуре 20°C. Коэффициент прочности сварных соединений с усилением шва составляет не менее 0,9 фактической прочности основного металла при всех температурах испытаний.

Ключевые слова: прессованный сплав 1565ч, аргонодуговая сварка, сварные соединения, механические свойства при низких и повышенных температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2431692 РФ, МПК С 22 С 21/06. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава / А. М. Дриц, А. С. Орыщенко, В. А. Григорян и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Алкоа Металлург Рус», ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», ОАО «НИИ стали» – № 2010125006/02; заявл. 18.06.2010; опубл. 20.10.2011.

2. Орыщенко А. С., Павлова В. И., Зыков С. А., Осокин Е. П. Свойства сварных соединений алюминиево-магниевого сплава криогенного назначения // Цветные металлы. – 2014. – № 3. – С. 64–70.

3. Башаев В. К., Павлова В. И., Осокин Е. П., Зыков С. А., Дриц А. М. Деформируемые алюминиево-магниевого сплавы и сварные соединения для конструкций систем хранения груза газозовозов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2016. – № 42/43. – С. 93–101.

4. Материалы для судостроения и морской техники: Справ.: Т. 2 / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2009. – 664 с.
5. Солнцев Ю. П., Ермаков Б. С., Слепцов О. И. Материалы для низких и криогенных температур: Энциклопедический справочник. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 768 с.
6. Павлова В. И., Зыков С. А., Осокин Е. П. Оценка влияния конструктивно-технологических факторов сварки на свойства сварных соединений из алюминиево-магниевых сплавов при криогенной температуре // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 138–154.
7. Шрейбер Г. К., Перлин С. М., Шибряев Б. Ф. Конструкционные материалы в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности. – М.: Машиностроение, 1969. – 396 с.
8. Корягин Ю. Д. Разупрочнение нагартованного сплава АМг6 при скоростном нагреве в интервале температур 100–300°C // Вестник ЮУрГУ. – № 15. – 2012. – С. 108–111.

УДК 621.762.5

ФАКТОРЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ ПОРОШКОВ

Б. К. БАРАХТИН, канд. физ.-мат. наук, А. С. ЖУКОВ, В. В. БОБЫРЬ, И. В. ШАКИРОВ,
П. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук

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

Статья поступила 27.03.2018, в окончательной редакции – 11.04.2018

Из металлических порошков различного химического состава методом селективного лазерного сплавления (СЛС) изготовлены стандартные образцы для механических испытаний. Было обнаружено, что прочностные характеристики всех СЛС образцов выше аналогичных показателей монолитных образцов идентичного химического состава. Установлено, что факторами повышения прочности являются наночастицы конденсации пара над зоной плавления и ультрамелкозернистое строение, формируемое на этапе кристаллизации.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, металлические порошки, механизмы упрочнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А. Г., Колчанов Д. С., Малов И. Е., Третьяков Р. С. Селективное лазерное плавление металлических порошков, выращивание тонкостенных и сетчатых структур // Технология машиностроения. – 2015. – № 10. – С. 6–11.
2. Барахтин Б. К., Бобырь В. В., Вознюк А. В., Деев А. А., Жуков А. С., Кузнецов П. А. Оптимизация технологических параметров и определение режимов селективного лазерного сплавления порошка на основе стали 316 // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2(90). – С. 146–152.
3. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.
4. Sedlaka J., Rican D., Piska M., Rozkosny L. Study of materials produced by powder metallurgy using classical and modern additive laser technology // Procedia Engineering. – 2015. – № 100. – P. 1232–1241.
5. Шишковский И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: Физматлит, 2009. – 424 с.
6. Zhukov A., Barakhtin B., Kuznetsov P. Study of strength characteristics of steel specimens after selective laser melting of powder materials 17-4PH, 316L, 321 // Physics Procedia. – 2017. – № 89. – P. 179–186.
7. Кузнецов П. А., Зисман А. А., Петров С. Н., Гончаров И. С. Структура и механические свойства аустенитной стали 316L, полученной методом селективного лазерного сплавления // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 4. – С. 9–13.
8. Барахтин Б. К., Жуков А. С., Старицын М. В., Вершинина Н. А. Строение агрегации, полученной селективным лазерным сплавлением порошка железа // Межвузовский сборник научных трудов Тверского государственного университета «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов». – 2017. – № 9. – С. 71–80.

9. Saeidi K., Gao X., Zhong Y., Shen Z. J. Hardened austenite steel with columnar sub-grain structure formed by laser melting // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – № 625. – P. 221–229.

10. Постников В. С., Калашникова М. С. Исследование структуры поверхностного слоя после лазерного легирования низкоуглеродистых конструкционных сталей // *Физика и химия обработки материалов*. – 1999. – № 6. – С. 47–51.

11. Белова С. А., Калашникова М. С., Постников В. С. Формирование структуры поверхностных слоев сталей при лазерном легировании // *Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2010. – № 2(12). – С. 93–105.

12. Панин В. Е., Пинчук В. Г., Короткевич С. В., Панин С. В. Масштабная инвариантность кризисы кристаллической решетки на поверхностях трения металлических материалов как основа механизма их изнашивания // *Физическая мезомеханика*. – 2017. – № 1(20). – С. 72–81.

УДК 621.74:621.315.3

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТЕКОЛ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МИКРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ МИКРОПРОВОДОВ

О. В. ВАСИЛЬЕВА, канд. техн. наук, Т. С. ВИНОГРАДОВА, А. В. ПАРЧУКОВ,
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 4.04.2018

Разработаны новые составы стекол, используемых для литья микропроводов в стеклянной изоляции. Выбрана базовая композиция системы $\text{SiO}_2\text{--V}_2\text{O}_3\text{--MgO--BaO--Na}_2\text{O--K}_2\text{O}$, на основе которой за счет дополнительного легирования окислами PbO , $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, ZrO_2 и TiO_2 варьируются основные характеристики стеклотрубок. Предложенные составы стекол существенно расширяют спектр перспективных металлов и сплавов, используемых для получения литых микропроводов в стеклянной изоляции.

Ключевые слова: литой микропровод в стеклянной изоляции, вязкость стекол, кристаллизационная способность стекол, дефекты стекла

ЛИТЕРАТУРА

1. Литой микропровод и его свойства / Е. Я. Бадинтер и др. – Кишинев: Штиница, 1973. – 317 с.

2. Наилучшие доступные технологии в производстве стекла. Справочник. – М.: Стандартинформ, 2015.

3. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Под ред. Ж. И. Алферова. – СПб.: ИП Пермяков С.А., 2015. – 543 с.

4. Горынин И. В., Фармаковский Б. В. Длинномерные литые микропровода в стеклянной изоляции с жилой из интерметаллических соединений // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 4 (84). – С. 51–58.

5. Справочник химика 21 века. Т. 5 URL: <http://chem21.info> (reference date 12/09/2018).

6. Фармаковский Б. В. Комбинированный способ литья микропроводов // *Вопросы материаловедения*. – 2017. – № 2 (90). – С. 77–83.

7. Федотова Е. И., Карасева Г. Г., Фармаковский Б. В., Фирсов А. М., Шмуилова Н. П.. Исследование свойств стекломатериалов для литья микропроводов в стеклянной изоляции // *Электронная техника, серия Радиокomпоненты*. – 1978. – Вып. 2. – С. 60–72.

8. Фирсов А. М., Федотова Е. И. Поверхностные явления в системе металл – стекло // *Микропровод и приборы сопротивления*. Вып. VI. – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1969. – С. 64–71.

УДК 621.74:621.315.3

МИКРОПРОВОДА ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ, КОБАЛЬТА И МЕДИ С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ И ВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ

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 26.04.2018

Приведены результаты исследований температурной и временной стабильности литых микропроводов в стеклянной изоляции из резистивных сплавов систем никель – хром, кобальт – хром и медь – никель. Установлено, что микропровода из исследованных сплавов сохраняют температурную стабильность при температурах не ниже 350°C. Исследование временной стабильности показало, что изменений электросопротивления при длительном хранении микропроводов (до 1 года) в складских условиях не происходит, и, несмотря на высокую степень неравновесности сплавов при высокоскоростной закалке расплава, релаксационных явлений не наблюдается. Следовательно, исследованные микропровода из сплавов на основе никеля, кобальта и меди являются весьма перспективным материалом для изготовления термостабильных резистивных элементов для прецизионного приборостроения.

Ключевые слова: литой микропровод в стеклянной изоляции, температурная стабильность, временная стабильность, переохлаждение расплава, температурный коэффициент сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Глезер А. М., Пермякова И. Е. Нанокристаллы, закаленные из расплава. – М.: Физматлит. – 2012. – 360 с.
3. Литой микропровод и его свойства / Е. Я. Бадинтер и др. – Кишинев: Штиинца, 1973. – 321 с.
4. Фридман И. Д., Мелехов П. Б. Автоматический контроль нестабильности сопротивления // Электронная техника. Сер.9: Радиокомпоненты. – 1981. – Вып. 2. – С. 73–82.
5. Масайло Д. В., Ковалева А. А., Фармаковский Б. В. Повышение прочности литых микропроводов после их получения // Вопросы материаловедения – 2015. – № 3(83) – С. 108–113.
6. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабрев В. А., Тупик В. А. // Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск: Удмуртия, 2014. – 480 с.
7. Третьяков Ю. Д. Микро- и наноструктурированные материалы. Фоторепортаж из «Пятого измерения». – М.: ООО «Премиум», 2008. – 181 с.
8. Горынин И. В, Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Перспективные исследования и разработки научного нанотехнологического центра ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в области новых наноматериалов // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(78) . – С. 118–128.
9. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Отв. ред. Ж. И. Алферов и др. – СПб: Изд-во И.П. Пермяков С. А. – 2015. – С. 137–163.

УДК 621.791.92:621.762.2

СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ НАПЛАВКА ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ TiB–TiC – ТИТАНОВАЯ СВЯЗКА

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

ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФПМ СО РАН), 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4,
E-mail: root@ispms.tomsk.ru

Статья поступила 4.06.2018

Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в порошковых смесях титана, бора и углерода получены композиционные порошки TiB – TiC – титановая связка с расчетным содержанием титановой связки 50 об. %. СВС порошки использованы для электронно-лучевой наплавки покрытий толщиной до 3 мм на подложку из титана BT1-0. Методами рентгено-структурного анализа, оптической и растровой электронной микроскопии исследованы фазовый состав и микроструктура исходных порошков и наплавленных покрытий. На основе результатов исследования микроструктуры и профилей микротвердости в переходной зоне покрытие – подложка сделан вывод о надежной адгезии покрытия к подложке. Исследована зависимость твердости и абразивной износостойкости наплавленных покрытий от фазового состава наплавляемых порошков. Установлено, что по сравнению с титаном BT1-0 максимальное повышение твердости гибридных покрытий составляет 2,2 раза, а абразивной износостойкости – 4,3 раза. При этом эффект упрочнения и повышения износостойкости титановой матрицы частицами карбида титана и моноборида титана близок к показателям износостойкости покрытий, наплавленных СВС порошком TiB + Ti, но примерно в 5 раз меньше, чем износостойкость покрытий, наплавленных СВС порошком TiC + Ti.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, металломатричные композиты, моноборид титана, карбид титана, титан, наплавка, микроструктура, твердость, абразивная износостойкость

ЛИТЕРАТУРА

1. Zwicker U. Titan und Titanlegierungen. – Springer-Verlag, 1974. – 717 p.
2. Прибытков Г. А., Криницын М. Г., Фирсина И. А., Дураков В. Г. Твердость и абразивная износостойкость электронно-лучевых покрытий карбид титана – титановая связка, наплавленных СВС композиционными порошками // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 4. – С. 52–61.
3. Прибытков Г. А., Коржова В. В., Криницын М. Г., Фирсина И. А. Синтез и электронно-лучевая наплавка композиционных порошков моноборид титана – титановая связка // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 1. – С. 88–102.
4. Ma F., Wang T., Liu P., Li W., Liu X., Chen X., Pan D., Lu W. Mechanical properties and strengthening effects of in situ (TiB + TiC) / Ti-1100 composite at elevated temperatures // Materials Science & Engineering A. – 2016. – V. 654. – P. 352–358.
5. Li S., Kondoh K., Imai H., Chen B., Jia L., Umeda J., Fu Y. Strengthening behavior of in situ synthesized (TiC–TiB) / Ti composites by powder metallurgy and hot extrusion // Materials and Design. – 2016. – V. 95. – P. 127–132.
6. Jia L., Wang X., Chen B., Imai H., Li S., Lu Z., Kondoh K. Microstructural evolution and competitive reaction behavior of Ti–B4C system under solid-state sintering // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – V. 687. – P. 1004–1011.
7. Rahoma H. K. S., Wang X. P., Kong F. T., Chen Y. Y., Han J. C., Derradji M. Effect of ($\alpha + \beta$) heat treatment on microstructure and mechanical properties of (TiB + TiC) / Ti–B20 matrix composite // Materials and Design. – 2015. – V. 87. – P. 488–494.
8. Rahoma H. K. S., Chen Y. Y., Wang X. P., Xiao S. L. Influence of (TiC + TiB) on the microstructure and tensile properties of Ti–B20 matrix alloy // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – V. 627. – P. 415–422.
9. SrinivasaVadayar K., Devaki Rani S., Bhanu Prasad V. V. Effect of boron carbide particle size and volume fraction of TiB–TiC reinforcement on Fractography of PM processed Titanium matrix Composites // Procedia Materials Science. – 2014. – V. 6. – P. 1329 – 1335.
10. Kim I. Y., Choi B. J., Kim Y. J., Lee Y. Z. Friction and wear behavior of titanium matrix (TiB + TiC) composites // Wear. – 2011. – V. 271. – P. 1962– 1965
11. Choi B.-J., Kim I.-Y., Lee Y.-Z., Kim Y.-J. Microstructure and friction/wear behavior of (TiB + TiC) particulate-reinforced titanium matrix composites // Wear. – 2014. – V. 318. – P. 68–77.
12. Sun S., Wang M., Wang L., Qin J., Lu W., Zhang D. The influences of trace TiB and TiC on microstructure refinement and mechanical properties of in situ synthesized Ti matrix composite // Composites: Part B. – 2012. – V. 43. – P. 3334–3337.
13. Fu B.-G., Wang H. W., Zou C.-M., Wei Z.-J. Microstructural characterization of in situ synthesized TiB in cast Ti–1100-0.10B alloy // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2015. – V. 25. – P. 2206–2213.

14. Zhang C. J., Kong F. T., Xiao S. L., Zhao E. T., Xu L. J., Chen Y.Y. Evolution of microstructure and tensile properties of in situ titanium matrix composites with volume fraction of (TiB + TiC) reinforcements // *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – V. 548. –P. 152–160.
15. Wang M.-M., Lu W.-J., Qin J., Ma F., Lu J., Zhang D. Effect of volume fraction of reinforcement on room temperature tensile property of in situ (TiB + TiC)/Ti matrix composites // *Materials and Design*. – 2006. – V. 27. – P. 494–498.
16. Rangaraj L., Barman K., Divakar C., Jayaram V. Reactive hot pressing of Ti–B–C and Ti–C at 1200°C // *Ceramics International*. – 2013. – V. 39. – P. 5955–5961.
17. Tabrizi S. G., Sajjadi S. A., Babakhani A., Lu W. Influence of spark plasma sintering and subsequent hot rolling on microstructure and flexural behavior of in-situ TiB and TiC reinforced Ti6Al4V composite // *Materials Science & Engineering A*. – 2015. – V. 624. – P. 271–278.
18. Lu J., Qin J., Chen Y., Zhang Z., Lu W., Zhang D. Superplasticity of coarse-grained (TiB + TiC)/Ti–6Al–4V composite // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – V. 490. – P. 118–123.
19. Wang M.-M., Lu W.-J., Qin J., Zhang D., Bo J., Feng Z. The effect of reinforcements on superplasticity of in situ synthesized (TiB+TiC)/Ti matrix composite // *Scripta Materialia*. – 2006. – V. 54. –P. 1955. –1959.
20. Eriksson M., Salamon D., Nygren M., Shen Z. Spark plasma sintering and deformation of Ti–TiB₂ composites // *Materials Science and Engineering A*. – 2008. – V. 475. – P. 101–104.
21. Xie L., Jiang C., Lu W., Zhan K., Feng Q., Wu X., Wang F. The recrystallization behavior of surface deformation layer of (TiB + TiC)/Ti–6Al–4V composite during isothermal annealing // *Materials Science and Engineering A*. – 2011. – V. 530. – P. 239–243.
22. Xie L., Zhou Q., Jin X., Wang Z., Jiang C., Lu W., Wang J., Wang Q. J. Effect of reinforcements on rolling contact fatigue behaviors of titanium matrix composite (TiB + TiC)/Ti–6Al–4V // *International Journal of Fatigue*. – 2014. –V. 66. – P. 127–137.
23. Li S., Kondoh K., Imai H., Chen B., Jia L., Umeda J. Microstructure and mechanical properties of P/M titanium matrix composites reinforced by in-situ synthesized TiC–TiB // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – V. 628. – P. 75–83.
24. Xie L., Jiang C., Lu W., Zhan K., Chen Y. Investigation on the residual stress and microstructure of (TiB + TiC)/Ti–6Al–4V composite after shot peening // *Materials Science and Engineering A*. – 2011. – V. 528. – P. 3423–3427.
25. Xie L., Jiang C., Lu W. The influence of shot peening on the surface properties of (TiB + TiC)/Ti–6Al–4V // *Applied Surface Science*. – 2013. – V. 280. –P. 981– 988.
26. Xie L., Jiang C., Lu W., Chen Y., Huang J. Effect of stress peening on surface layer characteristics of (TiB + TiC)/Ti–6Al–4V composite // *Materials and Design*. – 2012. – V. 33. – P. 64–68.
27. Xie L., Wang L., Jiang C., Lu W. The variations of microstructures and hardness of titanium matrix composite (TiB + TiC)/Ti–6Al–4V after shot peening // *Surface & Coatings Technology*. – 2014. – V. 244. – P. 69–77.
28. Акопян А. Г., Долуханян С. К., Боровинская И. П. Взаимодействие титана, бора и углерода // *Физика горения и взрыва*. – 1978. – № 3. – С. 70–79.
29. 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.
30. Song M. S., Huang B., Zhang M. X., Li J. G. Study of formation behavior of TiC ceramic obtained by self-propagating high-temperature synthesis from Al–Ti–C elemental powders // *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. – 2009. – V. 27. – P. 584–589.

УДК 621.793.7:669.295'24

ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ПОКРЫТИЯ Ni–Ti ПУТЕМ КОМБИНАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ГЕТЕРОФАЗНОГО ПЕРЕНОСА И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, А. М. МАКАРОВ, Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА,
А. Ф. ВАСИЛЬЕВ

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

Статья поступила 15.06.2018

Приведены результаты исследования интерметаллидного покрытия системы Ni–Ti, полученного при комплексном использовании метода холодного газодинамического напыления и лазерной обработки. Показана зависимость шихтового состава покрытия от состава исходной порошковой композиции. Исследованы структура, пористость, микротвердость покрытия, а также представлены результаты рентгенофазового анализа, подтверждающие наличие интерметаллидной фазы. Установлено повышение микротвердости более чем в 5 раз (до 632 HV) и уменьшение пористости в 25 раз (до 0,2%) после лазерной обработки. Исследование границы подложка – покрытие показало наличие взаимной диффузии.

Ключевые слова: комбинированный способ, напыление, лазерная обработка, никелид титана, нитинол, интерметаллид

ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов Ж. И., Белый О. В., Двас Г. В., Иванова Е. А., Перспективные направления науки в Санкт-Петербурге. – СПб.: ИП Пермяков С. А. – 2015. – С. 137–163.
2. Гринберг Б. А., Иванов М. А. Интерметаллиды Ni₃Al и TiAl: микроструктура, деформационное поведение. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002.
3. Корнилов И. И., Белоусов О. К., Качур Е. В. Никелид титана и другие сплавы с эффектом «памяти». – М.: Наука, 1977. – 178 с.
4. Степаненко М. А. Структура и свойства поверхностно-модифицированных слоев из сплава с памятью формы на основе никелида титана // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар: ГОУ ВПО Кубанский государственный технологический университет, 2006.
5. Алхимов А. П., Клинов С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. – М.: Физматлит, 2010. – С. 536.
6. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Машек И. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(77). – С. 87–96.
7. Макаров А. М., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф. Оптимизация параметров процесса напыления покрытий методом ХГДН применительно к условиям производства на примере порошка алюминия // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2(90). – С. 116–123.
8. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю. Исследование адгезионной прочности композиционных армированных покрытий системы металл – неметалл, полученных методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(78). – С. 103–117.
9. Геращенко Д. А., Орыщенко А. С. Алюмоматричные функциональные покрытия с высокой микротвердостью, полученные из композиционных порошков системы Al–Sn + Al₂O₃ методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 3(83). – С. 100–107.
10. Ловшенко Ф. Г., Ловшенко Г. Ф., Федосенко А. С. Структура, фазовый состав и свойства газотермических покрытий из механически легированных термореагирующих композиционных порошков системы никель – алюминий – оксид никеля // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 3(48).
11. Хижняк В. Г., Лоскутова Т. В., Дацюк О. Е., Хижняк О. В. Багато компонентні дифузійні покриття на основі титану, алюмінію та кремнію на нікелі // Наукові вісті національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2015. – № 1 (99). – С: 79–84.
12. Хохлов В. А., Потеекаев А. И., Галсанов С. В. Исследование свойств никелида титана, инициированных высоким гидростатическим давлением // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 2. – С. 130–134.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТОВ Cu–Cr–N И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИХ ФАЗОВОГО СОСТАВА

С. Ю. МЕЛЬЧАКОВ¹, канд. хим. наук, Л. Е. БОДРОВА¹, канд. хим. наук,
Э. Ю. ГОЙДА¹, канд. хим. наук, А. Б. ШУБИН¹, д-р хим. наук, П. А. СОМОВ²

¹Институт металлургии УрО РАН, 620016, Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101
E-mail: admin@imet.mplik.ru

²ООО «ТЕСКАН», 195220, Россия, г. Санкт-Петербурге, Гражданский проспект, 11

Статья поступила 19.06.2018, в окончательной редакции – 31.08.2018

Композиционные сплавы Cu–Cr–N получены *in situ* в условиях предкристаллизационной вибрации композиции расплав меди – порошок хрома при свободной насыпке порошка или при его компактировании в таблетку. В качестве азотирующего агента использован азот атмосферного воздуха. Структура сплавов представляет собой медную матрицу, упрочненную частицами хрома и многочисленными включениями нестехиометрических нитридов хрома Cr₂N_{1-x}. Термодинамическим моделированием показано, что состав и количество нитридов хрома в композиционном сплаве Cu–Cr–N зависят от парциального давления азота над расплавом.

Ключевые слова: композиционный сплав, медь, хром, нитриды хрома, синтез *in situ*, вибрация, термодинамическое моделирование

ЛИТЕРАТУРА

1. Xiu S., Yang R., Xue J., Wang J., Wang J. Microstructure and properties of CuCr contact materials with different Cr content // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2011. – N. 21. – P. 389–393. Doi:10.1016/S1003-6326(11)61612-9.
2. Дураков В. Г., Гнусов С. Ф., Дампилон Б. В., Дехонова С. З. Самоорганизация структуры CuCr контактного материала вакуумных выключателей при электронно-лучевом воздействии // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 2. – С. 96–100.
3. Аксенов А. А., Просвирыков А. С., Кудашев Д. В., Гершман И. С. Структура и свойства композиционных материалов на основе системы Cu–Cr, полученных методом механического легирования // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2004. – № 6. – С. 39–46.
4. Mao B., Zhang Y., Zhao Y., Liu G. Two New Cu–Cr Alloy Contact Materials // IEEE 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – 2000. – P. 729–732. Doi:10.1109/DEIV.2000.879092.
5. Zhang C., Yang Z., Wang Y., Ding B., Guo Y. Preparation of CuCr25 contact materials by vacuum induction melting // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – V. 178. – Is. 1–3. – P. 283–286. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.010.
6. Коржов В. П. Спеченные порошковые заготовки электроконтактного сплава Cu–30%Cr, плакированные литым сплавом того же состава // Физика и техника высоких давлений. – 2009. – Т. 19, № 1. – С. 97–100.
7. Браверман Б. Ш. Технология получения нитридов хрома методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2008.
8. Самсонов Г. В. Нитриды. – Киев: Наукова думка, 1969. – 380 с.
9. Тот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов. – М.: Мир, 1974. – 294 с.
10. Кочеткова. Л. П. Металлургические процессы в машиностроительном производстве: Учеб. пособие. – Киров: ВятГУ, 2005. – 144 с.
11. Патент РФ 2359785. Способ получения нитрида хрома / Толбанова Л. О., Ильин А. П. Оpubл. 27.06.2009.
12. Бодрова Л. Е., Пастухов Э. А., Гойда Э. Ю. Влияние механоактивации на самодиспергирование карбидных фаз в сплавах Cu–W–Nb–C // Расплавы. – 2015. – № 6. – С. 11–16.

13. Бодрова Л. Е., Шубин А. Б. Формирование тонкодисперсной структуры NbC в композиционных сплавах Cu–NbC–WC // Перспективные материалы. – 2017. – № 2. – С. 43–50.
14. Игнатъев И., Пастухов Э., Бодрова Л. Метод получения сплавов низкочастотной обработкой их расплавов. – Саарбрюкен: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. – 170 с.
15. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник: Т. 2 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1023 с.
16. Тихоновский М. А. Исследование направленных фазовых превращений и разработка микрокомпозитных материалов в НИЦ ХФТИ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2004. – № 6 (14). – С. 115–127.
17. ASM Handbook. V.3: Alloy Phase Diagrams / H. Baker, H. Okamoto, et al. – Materials Park: ASM International, 1992. – 521 p.
18. Гугля А. Г., Неклюдов И. М. Покрытия на базе нитрида хрома. Опыт создания и исследования // Успехи физики металлов. – 2005. – Т. 6. – С. 197–232.
19. Mills T. Thermodynamic relations in the chromium-nitrogen system // J. Less-Common Metals. – 1972. – N 26. – P. 223–234.
20. Kringhoj P., Bottiger J., Chevallier J., Bienk E.J., Ratzke K. The influence of temperature on the microstructure and mechanical properties of sputtered Cr₂N_x coatings // Surface and Coatings Technology. – 2002. – V. 149. – P. 82–88.
21. Chase M. W. Jr. NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition // J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph 9. – 1998. – P. 1–1951.
22. Браверман Б. Ш. Масштабный эффект при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе нитридов хрома // Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52. – № 8. – С. 124–125.

УДК 678.074:661.666.4

ВЛИЯНИЕ ОКИСЛЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА N121 НА СВОЙСТВА РЕЗИН НА ОСНОВЕ БУТИЛКАУЧУКА

М. Н. НАГОРНАЯ^{1,2}, А. В. МЫШЛЯВЦЕВ², д-р хим. наук, С. Я. ХОДАКОВА¹, канд. техн. наук

¹ФГУП ФНПЦ «Прогресс», 644018, г. Омск, 5-я Кордная, 4, E-mail: info@progress-omsk.ru

²ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Статья поступила 25.05.2018, в окончательной редакции – 22.08.2018

Исследовано влияние на свойства резин на основе бутилкаучука технического углерода N121, окисленного активными формами кислорода, в сравнении с канальным техническим углеродом К 354. Выявлено, что введение окисленных образцов технического углерода N121 в состав резиновых смесей в сравнении с базовыми позволяет увеличить время начала подвулканизации резиновых смесей от 8,82 до 11,17 мин, повысить условную прочность при растяжении от 15,52 до 16,68 МПа, а также снизить их газопроницаемость. Установлено, что применение в резинах на основе бутилкаучука в качестве наполнителя технического углерода N121, окисленного 30%-ным пероксидом водорода, позволяет получить резины, близкие по свойствам к резинам, наполненным техническим углеродом К354.

Ключевые слова: технический углерод, функционализация, функциональные группы, бутилкаучук, резиновая смесь, резина

ЛИТЕРАТУРА

1. Раздьяконова Г. И., Лихолобов В. А., Моисеевская Г. В., Петин А. А., Караваев М. Ю. Инновационный дисперсный углерод. От идеи до технологии: монография.– Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 312 с.
2. Deviney M. L. Surface chemistry of carbon black and its implication in rubber chemistry // A current review. – Advan. Coll. Int. Sci. – 1969. – V. 2, № 3. – P. 237–259.

3. The difference between iodine number and nitrogen surface area determinations for carbon blacks / J.-B. Donnet, A. Santini, D. Maafa e. a. // Rubber Chemistry and Technology. – 2006. – V.79, N 1. – P. 120.
4. REGAL 300. Carbon Black: Cabot Corporation. – USA, 2002.
5. Pat. 6120594 US. Hydrogen peroxide oxidation of carbon black / J.C. Curtis, R.L. Taylor, G.A. Joyce. – Fil. 28.04.1999; iss. 19.09.2000
6. Cataldo F., Ursini O. Surface oxidation of rubber crumb with ozone // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2007. – V. 15, N 1. – С. 1.
7. Панкратов В. А., Строев В. Н., Ляпина Л. А. Каучук и резина. – 1984. – № 4. – С. 18–20.
8. Раздьяконова Г. И., Киселева Е. А. Влияние функционального состава технического углерода на межфазные слои в каучуковой среде // Каучук и резина. – 2013. – №3. – С. 40–43.

УДК 678.074:621.785.78

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРИРОВАННЫХ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНЫХ КАУЧУКОВ
В СОСТАВЕ ИЗДЕЛИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР И АГРЕССИВНЫХ СРЕД**

Е. А. ХОРОВА^{1,2}, А. В. МЫШЛЯВЦЕВ², д-р хим. наук

¹ФГУП ФНПЦ «Прогресс», 644018, г. Омск, 5-я Кордная, 4, E-mail: info@progress-omsk.ru

²ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет»,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Статья поступила 23.05.2018, в окончательной редакции – 25.07.2018

Предметом исследования являются резиновые смеси на основе гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков (ГБНК) Therban, Zetpol, БНК-В с содержанием акрилонитрила от 34 до 49% и степенью ненасыщенности от 0,9 до 22% с серной, пероксидной и серно-пероксидной системами вулканизации. Цель исследования – определение влияния содержания акрилонитрила и степени ненасыщенности ГБНК на свойства резин в изделиях, предназначенных для эксплуатации в условиях воздействия топлив и масел при повышенных температурах.

Представлены результаты определения массового набухания резин в углеводородных средах и относительного удлинения в процессе термического старения на воздухе и в масле при повышенных температурах. Сделан вывод об использовании смеси ГБНК с максимальным содержанием акрилонитрила (49%) и низким (6%) и чрезвычайно низким (0,9%) содержанием остаточных двойных связей и серно-пероксидной системы вулканизации для расширения температурного предела эксплуатации изделий до 150°C.

Ключевые слова: гидрированный бутадиен-нитрильный каучук, акрилонитрил, степень ненасыщенности, агрессивная среда, термическое старение

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысова Г. А. Донцов А. А. Гидрированные бутадиен-нитрильные каучуки. Свойства. Рецептуростроение. Применение // Тематический обзор. Серия: Производство резинотехнических и асбестотехнических изделий. – № 6. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991. – 56 с.
2. Therban®ARLANXEO–LANXESS (reference date 12/09/2018) URL: <http://therban.com/technical-information/>
3. Zetpol®HNBR(reference date 12/09/2018) URL: <https://www.zeonchemicals.com/products/zetpol-hnbr/>
4. Моисеев В. В. , Перина Ю. В. Синтетические каучуки и материалы для их производства: Каталог-справочник – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1990. – 36 с.
5. Высокотехнологичная резина для «зеленых» моторов. [Электронный ресурс] / LANXESS: <http://press.unipeck.ru/eng/26655>.
6. ГОСТ 305–82. Топливо дизельное. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2009.

7. ГОСТ 12337–84. Масло моторное для дизельных двигателей. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2009.
8. Осошник, И. А., Шутилин Ю. Ф., Карманова О. В. Производство резиновых технических изделий: Учеб. пособие. – Воронеж: ВГТА, 2007. – 434 с.
9. ГОСТ 415–75. Каучуки и резиновые смеси. Метод определения пластоэластических свойств на пластометре. – М.: Изд. стандартов, 2002.
10. ГОСТ 270–75. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. – М.: Стандартинформ, 2008.
11. ГОСТ 9.030–74. Резины. Методы испытаний на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред. – М.: Стандартинформ, 2008.
12. ГОСТ 9.024–74. Резины. Методы испытаний на стойкость к термическому старению. – М.: Изд. стандартов, 1989.
13. Догадкин Б. А., Донцов А. А., Шершнева В. А. Химия эластомеров. 2-е изд. – М.: Химия, 1981. – 376 с.
14. Khorova E. A., Razdyakonova G. I., Khodakova S. Ya. Effect of the structure of hydrogenated butadiene-nitrile rubber on the resistance to aggressive media and high temperatures // Procedia Engineering. – 2016. – V.152. – P. 556–562.

УДК 678.074

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Н. С. МИТРЯЕВА^{1,2}, А. В. МЫШЛЯВЦЕВ¹, д-р хим. наук, Е. А. СТРИЖАК^{1,3}, канд. хим. наук

¹ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», 644050, Омск, пр. Мира, 11. E-mail: info@omgtu.ru

²АО «НТЦ углеродных материалов», 644049, Омск, ул. Барабинская, 20

³ФГУП ФНПЦ «Прогресс», 644018, Омск, 5-я Кордная, 4,

Статья поступила 13.06.2018, в окончательной редакции – 27.08.2018

Исследовано влияние многостенных углеродных нанотрубок на вулканизационные, динамические свойства при сдвиге и динамические свойства при осциллирующей нагрузке резин на основе цис-изопренового каучука. Несмотря на отсутствие предварительной подготовки многостенных углеродных нанотрубок, с увеличением их концентрации уровень динамических свойств резин при осциллирующей нагрузке в высокоэластическом состоянии возрастает. Таким образом, определена возможность использования многостенных углеродных нанотрубок для создания резин с улучшенными динамическими свойствами.

Ключевые слова: эластомерные материалы, многостенные углеродные нанотрубки, вулканизационные и динамические свойства

ЛИТЕРАТУРА

1. Residual rubber shielded multi walled carbon nanotube electrodes for neural interfacing in active medical implants / K.Tegtmeier, et al. // Physics in Medicine. – 2016. – V. 1. – P. 8–19.
2. Advanced elastomer nano-composites based on CNT-hybrid filler systems / Lorenz H. et al. // Composites Science and Technology. – 2009. – V. 69. – Is. 13. – P. 2135–2143.
3. Blends of carbon blacks and multi wall carbon nanotubes as reinforcing fillers for hydrocarbon rubbers / L. Bokobza et al. // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 2008. – V. 46. – Is. 18. – P. 1939–1951.
4. Bokobza L. Multiwall carbon nanotube elastomeric composites: A review // Polymer. – 2007. – V. 48. – Is. 17. – P. 4907–4920.
5. Harris P.J.F. Carbon Nanotubes and Related Structures: New Materials for the 21st Century. – New York: Cambridge, 1999.

6. Bose S. Khare R. A., Moldenaers P. Assessing the strengths and weaknesses of various types of pre-treatments of carbon nanotubes on the properties of polymer/carbon nanotubes composites: A critical review // *Polymer*. – 2010. – V. 51. – Is. 5. – P. 975–993.

7. Payne A. R. *Rubber Plast // Age*. – 1961. – V. 111. – P. 963.

8. Митряева, Н. С. Влияние смеси многостенных углеродных нанотрубок Dealtom с техническим углеродом на свойства эластомерного композита [Текст] / Н.С. Митряева, С.С. Акименко, А.В. Мышлявцев // *Каучук и резина*. – 2017. – № 3. – С. 148–151.

9. ГОСТ Р 54554–2011 Смеси резиновые стандартные. Материалы, оборудование, методы смешения и приготовления вулканизованных пластин. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартинформ, 2013.

УДК 678.067:678.686

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ И УГЛЕПЛАСТИКА НА ЕЕ ОСНОВЕ СТЕАРАТОМ ЦИНКА НА ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИИ

Ф. А. НАСОНОВ^{1,2}, В. М. АЛЕКСАШИН³, канд. техн. наук, Д. А. МЕЛЬНИКОВ³,
С. В. БУХАРОВ, д-р техн. наук¹

¹ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (НИИ)»,
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4

²Филиал ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», 125264, Москва, ул. Поликарпова, 23А

³ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
(ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: admin@viam.ru

Статья поступила 1.03.2018

Материаловедческий подход к управлению физико-механическими свойствами полимерных матриц требует оценки влияния модифицирующих добавок на технологические свойства эпоксидных композиций. От этого зависит выбор и назначение основных и второстепенных параметров технологического процесса для достижения оптимальных технико-экономических показателей технологического процесса и обеспечения заданного уровня качества изготовления деталей из ПКМ. В работе стандартными методами (вискозиметрия, термоаналитические методы) исследуются и сопоставляются важнейшие технологические свойства исходной эпоксидной композиции и модифицированной технологической добавки. Создана кинетическая модель процесса отверждения, проведено опытное изготовление образцов из наполненных углеродным длиноволокнистым наполнителем пластиков (пропитка под давлением, автоклавное формование), проведен их неразрушающий контроль.

Ключевые слова: технологические свойства, эпоксидная матрица, углепластик, модификатор стеарат цинка, пропитка под давлением, автоклавное формование

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., 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.

3. Каблов Е. Н., Старцев В. О., Иноземцев А. А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 2. – С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.

4. Петрова А. П., Лукина Н. Ф., Мельников Д. А., Беседнов К. Л., Павлюк Б. Ф. Исследование свойств отвержденных клеевых связующих // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2017. –

№ 10. Ст.06 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-6-6.

5. Коротков С. Н., Жовнер Б. А. Исследование методом ДСК антиадгезионных добавок на время отверждения эпоксидных связующих в процессе пултрузии // Пластические массы. – 1991. – № 5. – С. 46.

6. Носов К. С., Лапшина Е. М. Влияние технологической смазки на реологические и прочностные свойства полимер-минеральных материалов, полученных методом пластформования // Труды ПОЛИКОТРИБ-2015. – Гомель, Беларусь: Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, 2015. – С. 39.

7. Гадеев А. С., Колтаев Н. В., Султанов А. И., Зарипов Т. Ф., Глазырин А. Б., Басыров А. А. Модифицирующие добавки для полимерных композиций на основе полиэтилена // Наука и образование сегодня. – 2016. – № 9. – С. 5–9.

8. Марков В. А., Кандырин Л. Б., Марков А. В. Влияние технологических добавок на электрические характеристики полиэтиленовых композитов с техническим углеродом // Вестник МИТХТ. – 2013. – Т.8, № 6. – С. 103–106.

9. Нифталиев С. И., Лыгина Л. В., Перегудов Ю. С., Прокофьева Л. А. Исследование реологических свойств композиций на основе ПВХ // Вестник ВГУИТ. – 2014. – № 2. – С. 132–134.

10. Кириллов А. Г., Латышев М. В., Ратников А. С. Повышение износостойкости цилиндра автомобильного двигателя при использовании трибологических составов // Вестник ТТУ им. М. С. Осими. – 2011. – № 3, Т. 3. – С.43–47.

11. Чернин И. З., Слезов Ф. М., Жердев Ю. В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. – С. 6–32.

12. Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / Под ред. Е. Б. Тростянской. – М.: Химия, 1974. – С. 81–86.

13. Мийченко И. П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов. – СПб.: Научные основы и технологии, 2012. – С. 120–132

14. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – С. 124–154

15. Антюфеева Н. В., Журавлева П. Л., Алексашин В. М., Куцевич К. Е. Влияние степени отверждения связующего на физико-механические свойства углепластика и микроструктуру межфазного слоя углеродное волокно/матрица // Клеи. Герметики. Технологии. – 2014. – № 12. – С.26–30.

16. Хабенко А. В., Долматов С. А. Оптимизация процессов отверждения материалов на основе поли-бис-малеинимидаминов с помощью метода ДСК // Пластические массы. – 1987. – № 9. – С. 44–45.

17. Малышева Г. В., Ахметова Э. Ш., Шимица Ю. Ю. Оценка температур фазовых переходов полимерных связующих методом дифференциально-сканирующей калориметрии // Клеи. Герметики. Технологии. – 2014. – № 6. – С. 29–33.

18. Антюфеева Н. В., Алексашин В. М. Применение методов термического анализа для определения показателей технологических и эксплуатационных свойств материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2017. – № 1. – С. 55–64.

19. Хасков М. А., Мельников Д. А., Котова Е. В. Подбор температурно-временных режимов отверждения эпоксидных связующих с учетом масштабного фактора // Клеи. Герметики. Технологии. – 2017. – № 10. – С. 24–32.

УДК 678.686:620.191

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ЭПОКСИДНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

И. С. ДЕЕВ, канд. техн. наук, Е. В. КУРШЕВ, С. Л. ЛОНСКИЙ

Статья поступила 29.03.2018

Проведены исследования и получены экспериментальные данные о микроструктуре поверхности образцов эпоксидных углепластиков, прошедших длительное (до 5 лет) климатическое старение в различных климатических зонах России: в условиях промышленной зоны умеренного климата (Москва, МЦКИ); умеренного теплого климата (Геленджик – ГЦКИ); теплого влажного климата (Сочи – ГНИП РАН). Установлено, что определяющим при старении углепластиков является длительность комплексного воздействия климатических факторов: чем больше срок климатического старения, тем более существенные изменения происходят в микроструктуре поверхности материалов. На интенсивность процесса изменения и степень микроструктурных изменений поверхности углепластиков влияют особенности климатической зоны. На основании анализа и систематизации результатов микроструктурных исследований установлены общие закономерности и особенности разрушения поверхности углепластиков после длительного воздействия климатических факторов.

Ключевые слова: эпоксидные углепластики, поверхность, длительное старение, климатические зоны, макро- и микроструктура, сканирующая электронная микроскопия

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. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 520–530.
3. Каблов Е. Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. – 2014. – № 3. – С. 8–13.
4. Влияние климатических факторов на механические свойства эпоксидных боро- и углепластиков / Г. М. Гуняев, В. А. Ярцев, Е. А. Митрофанова, М. А. Кузнецова и др. // Авиационные материалы. Вып. 2: Неметаллические композиционные материалы / Под общ. ред. Р. Е. Шалина, ОНТИ, 1977. – С. 96–104.
5. Каблов Е. Н., Гуняев Г. М., Ильченко С. И., Кривонос В. В., Румянцев А. Ф., Кавун Т. Н., Комарова О. А., Пономарев А. Н., Деев И. С., Алексашин В. М. Конструкционные углепластики с повышенной проводимостью // Авиационные материалы и технологии. – 2004. – № 2. – С. 25–36.
6. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. Значимые факторы // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 1. – С. 34–40.
7. Булманис В. Н., Ярцев В. А., Кривонос В. В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов // Механика композитных материалов. – 1987. – №5. – С. 915–920.
8. Старцев О. В., Мелетов В. П., Деев И. С., Цинцадзе Г. Б., Базенкова Е. Н., Перов Б. В. Атмосферное старение армированных термопластов // Вопросы авиационной науки и техники. Авиационные материалы. – М.: ВИАМ, 1990. – С. 52–58.
9. Ray B. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites // Journal of colloid and interface science. – 2006. – V. 298. – P. 111–117.
10. Nakamura T., Singh R. and Vaddadi P. Effects of environmental degradation on flexural failure strength of fiber reinforced composites / Annual Conference of the Society-for-Experimental-Mechanics. Portland. OR. 2005 // Experimental mechanics. – 2006. – V. 46. – P. 257–268.
11. Андреева Н. П., Павлов М. Р., Шведкова А. К., Николаев Е. В. Климатические испытания по оценки стойкости материалов к условиям морского арктического и субарктического климатов // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 6. – С. 3–12. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения 02.03.2018).

12. Старцев О. В., Вапиров Ю. М., Ярцев В. А., Кривонос В. В., Митрофанова Е. А., Чубарова М. А., Деев И. С. Влияние длительного атмосферного старения на свойства и структуру углепластика // *Механика композитных материалов*. – 1986. – № 4. – С. 637–642.
13. Каблов Е. Н., Деев И. С., Ефимов В. А., Кавун Н. С., Кобец Л. П., Никишин Е. Ф. Влияние атмосферных факторов и механических напряжений на микроструктурные особенности разрушения полимерных композиционных материалов // *Сб. докл. VII науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2008»*. Ч. 1. – М.: ФГУП «ВИАМ», 2008. – С. 279–286.
14. Деев И. С., Добрянская О. А., Куршев Е. В. Влияние морской воды на микроструктуру и механические свойства углепластика в напряженном состоянии // *Материаловедение*. – 2012. – № 11. – С. 37–41.
15. Кириллов В. Н., Ефимов В. А., Шведкова А. К., Николаев Е. В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. – 2011. – № 4. – С. 41–45.
16. Birger S., Moshonov A., Kenig S. The effects of thermal and hydrothermal ageing on the failure mechanisms of graphite – fabric epoxy composites subjected to flexural loading // *Composites*. – 1989. – V. 20, № 4. – P. 341–348.
17. Kenig S., Moshonov A., Shucrun A., Marom G. Environmental effects on shear delamination of fabric-reinforced epoxy composites // *Adhesion and Adhesives*. – 1989. – V. 9, № 1. – P. 109–124.
18. Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л., Железина Г. Ф. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных органоластиков и характер ее разрушения в условиях изгиба // *Вопросы материаловедения*. – 2016. – № 3 (87). – С. 104–114.
19. Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л., Железина Г. Ф. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру и характер разрушения в объеме эпоксидных органоластиков в условиях силового воздействия (изгиба и сжатия) // *Вопросы материаловедения*. – 2016. – № 4 (88). – С. 72–82.
20. 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.
21. 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.
22. Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру и характер разрушения эпоксидных стеклопластиков в условиях изгиба // *Вопросы материаловедения*. – 2017. – № 2 (90). – С. 166–178.
23. Деев И. С., Кобец Л. П. Исследование микроструктуры и микрополей деформаций в полимерных композитах методом растровой электронной микроскопии // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 1999. – Т. 65, № 4. – С. 27–34.
24. 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.
25. Деев И. С., Кобец Л. П. Микроструктура эпоксидных матриц // *Механика композитных материалов*. – 1986. – № 1. – С. 3–8.
26. Деев И. С., Кобец Л. П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных полимеров и композиционных материалов на их основе. Ч. 1 // *Материаловедение*. – 2010. – № 5. – С. 8–16.
27. Деев И. С., Кобец Л. П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных полимеров и композиционных материалов на их основе. Ч. 2 // *Материаловедение*. – 2010. – № 6. – С. 13–18.
28. Деев И. С., Гуняева А. Г. Некоторые эффекты процесса наноструктурирования терморективных матриц // *Композиты и наноструктуры*. – 2017. – Т. 9, № 3–4 (35–36). – С. 63–74.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ТКАНЯМИ. Часть 3. Моделирование и экспериментальные исследования структуры углеродной ткани

Б. М. ПРИМАЧЕНКО, д-р техн. наук, К. О. СТРОКИН

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (СПГУПТД), 191186, Санкт-Петербург, Большая Морская ул., 18,
E-mail: primbm@mail.ru

Статья поступила 4.04.2018, в окончательной редакции – 26.06.2018

В результате моделирования и экспериментальных исследований композиционных материалов, армированных углеродными тканями, определены основные параметры структуры углеродной ткани. Экспериментальные данные обработаны по стандартным методикам государственной системы обеспечения единства измерений. Сравнение прогнозируемых и экспериментальных значений параметров показало достаточно высокую точность разработанной механико-аналитической модели структуры углеродной ткани.

Ключевые слова: углеродная нить, тканая структура, армирующий компонент, композиционный материал, механико-аналитическая модель

ЛИТЕРАТУРА

1. Примаченко Б. М., Строкин К. О. Теоретические и экспериментальные исследования композиционных материалов, армированных углеродными тканями. Часть 1. Исследования области контакта углеродных нитей в тканой структуре // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 4. – С. 109–116.

2. Примаченко Б. М., Строкин К. О. Теоретические и экспериментальные исследования композиционных материалов, армированных углеродными тканями. Часть 2. Механико-аналитическая модель структуры углеродной ткани // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 3. – С. 157–166.

3. ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.

4. ГОСТ 29104.2–91. Ткани технические. Метод определения толщины. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 4 с.

5. ГОСТ 6611.1–73. Нити текстильные. Методы определения линейной плотности. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 30 с.

6. ГОСТ 29104.3–91. Ткани технические. Метод определения количества нитей на 10 см. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 4 с.

7. МИ 2083–90. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 10 с.

8. ГОСТ 29104.1–91. Ткани технические. Методы определения линейных размеров, линейной и поверхностной плотности. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 7 с.

ТЕПЛОСТОЙКИЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ НАСОСОВ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В. Е. БАХАРЕВА¹, д-р техн. наук, В. С. БОГУН², канд. техн. наук, И. В. ЛИШЕВИЧ¹, канд. техн. наук, И. В. НИКИТИНА¹, канд. хим. наук, А. С. САРГСЯН¹, канд. техн. наук

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

Статья поступила 4.06.2018

Обобщен опыт создания и применения скоростных подшипников скольжения центробежных насосов для судовых энергетических установок (СЭУ), тепловых электростанций (ТЭС), атомных электростанций (АЭС). Подшипники скольжения энергетических установок работают на перегретой воде до 200°C при скоростях скольжения 20–40 м/с. В отличие от металлов этим подшипникам не требуется дополнительной масляной смазки. Рассмотрены два антифрикционных углепластика – фенольный марки ФУТ-Б и новый полифениленсульфидный марки УПФС.

Ключевые слова: центробежные насосы, выносные и встроенные подшипники скольжения, антифрикционные углепластики, фенолоформальдегидная смола, полифениленсульфид

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахарева В. Е., Николаев Г. И. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: Справ. / Под ред. И. В. Горынина, А. С. Орыщенко. – СПб.: НПО «Профессионал», 2012. – 916 с.
2. Blau P. J. Friction Science and Technology. From Concepts to Application (Mechanical Engineering) / CRC PRESS, NY 2-nd add. 2008. – 432p.
3. Бахарева В. Е., Николаев Г. И., Орыщенко А. С. Антифрикционные углепластики для узлов трения скольжения // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 4(72) . – С. 15–33.
4. Бахарева В. Е., Орыщенко А. С. Углепластики для деталей узлов трения оборудования, работающего в условиях Арктики и Крайнего Севера. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2017. – 262 с.
5. Орыщенко А. С., Бахарева В. Е., Анисимов А. В., Лишевич И. В. Подшипники скольжения из высокопрочных антифрикционных углепластиков в судостроении и энергомашиностроении // Вестник машиностроения. – 2012. – № 5. – С. 29–33.
6. Богун В. С., Бахарева В. Е., Анисимов А. В. Подшипники скольжения из антифрикционных углепластиков для центробежных насосов энергетических установок // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 1(61) . – С. 60–66.
7. Горячева И. Г., Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Лишевич И. В., Портянкин П. О. Высокоскоростные подшипники скольжения из антифрикционных углепластиков, работающих при температурах до 200°C, для насосов и паровых турбин. Проблемы импортозамещения // Насосы. Турбины. Системы. – 2015. – № 4(17). – С. 3–15.
8. Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Лишевич И. В., Никитина И. В. Опыт отечественной школы по созданию подшипников из антифрикционных углепластиков для насосов, турбин, арматуры. Проблемы импортозамещения // Насосы. Турбины. Системы. Часть 1: 2015. – Вып. 1(14). – С. 3–15; Часть 2: Вып. 2(15). – С. 3–11.
9. Бахарева В. Е., Лишевич И. В., Саргсян А. С. Новый теплостойкий антифрикционный углепластик на основе полифениленсульфида для узлов трения, работающих без смазки и со смазкой перегретой водой // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 4(72) . – С. 160–170.
10. Morphology and mechanical properties of carbon fiber reinforced composites based on semi-crystal-line polyimides modified by carbon nanofibers / V. E. Yudin, V. M. Svetlichnyi, A. N. Shumakov et al. // Composites: Part A. – 2008. – V. 39, N 1. – P. 85–90.
11. Пошарников Ф. В., Усиков А. В., Серебрянский А. И. Исследование вращательного процесса трения в подшипниках скольжения лесобрабатывающего оборудования / Лесотехнический журнал. – № 2. – 2011. – С. 4–6.
12. Богун В. С., Васильев В. А. Подшипники скольжения из антифрикционных углепластиков для насосов энергетических установок // Электрические станции. – 2016. – № 9. – С. 45–48.

621.039.546:669.296

ДЕГРАДАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР

Б. А. ГУРОВИЧ¹, д-р техн. наук, А. С. ФРОЛОВ¹, канд. техн. наук,
Е. А. КУЛЕШОВА^{1,2}, д-р техн. наук, Д. А. МАЛЬЦЕВ¹, канд. техн. наук, Д. В. САФОНОВ¹,
В. Н. КОЧКИН¹, канд. техн. наук, Е. В. АЛЕКСЕЕВА¹, канд. техн. наук, Н. В. СТЕПАНОВ¹

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

² *Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», 115409, Москва, Каширское шоссе, 31*

Статья поступила 20.04.2018

Приведены результаты микроструктурных исследований образцов, вырезанных из оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) из сплава Э110 на основе губчатого циркония после эксплуатации в условиях ВВЭР-1000 до достижения выгорания ~35 МВт·сут/кг U. Показано, что в результате воздействия высоких температур и нейтронного облучения в материале оболочек ТВЭЛ происходят значительные изменения фазового состава: изменение размера, плотности и состава глобулярных частиц β -Nb, изменение состава выделений фазы Лавеса, образование дислокационных петель <a>-типа, формирование рядов мелкодисперсной фазы на основе ниобия, а также δ - и γ -гидридов. При этом основными структурными элементами, определяющими деградацию механических свойств сплава Э110 под облучением, являются дислокационные петли и выделения мелкодисперсной фазы ввиду их относительной большой объемной плотности. Полученные данные могут быть использованы для построения дозовых зависимостей микроструктурных изменений с целью прогнозирования остаточного ресурса как отдельных оболочек ТВЭЛ, так и тепловыделяющих сборок в целом.

Ключевые слова: реакторы типа ВВЭР, оболочки тепловыделяющих элементов, сплав на основе губчатого циркония, нейтронное облучение, деградация свойств, прогнозирование остаточного ресурса

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang W. J. S., Tucker R. P. Cheng, B. Adamson R. B. Precipitates in zircaloy: Identification and the effects of irradiation and thermal treatment // J. Nucl. Mater. – 1986. – V. 138, N 2–3. – P. 185–195.
2. Griffiths M., Gilbert R. W., Carpenter G. J. C. Phase instability, decomposition and redistribution of intermetallic precipitates in Zircaloy-2 and -4 during neutron irradiation // J. Nucl. Mater. – 1987. – V. 150, N 1. – P. 53–66.
3. Griffiths M. A review of microstructure evolution in zirconium alloys during irradiation // J. Nucl. Mater. – 1988. – V. 159. – P. 190–218.
4. Yang W. J. S. Precipitate stability in neutron-irradiated Zircaloy-4 // J. Nucl. Mater. – 1988. – V. 158. – P. 71–80.
5. Светухин В. В., Львов П. Е., Новоселов А. Е., Кобылянский Г. П., Шишов В. Н. Моделирование процесса роста ниобиевых преципитатов в сплаве Zr-1%Nb при облучении // Физико-математические науки. Физика. – 2007. – № 4. – С. 105–111.
6. Kobilyanskyi G. P., Novoselov A. E., Obukhov A. V., Ostrovskiy Z. E., Shishov V. N., Nikulina A. V., Markelov V. A. Radiation damage of alloy E635 in structural elements of FA of WWER-1000 // VANT. –2009. – V. 2: Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Material Science. – P. 57–68.
7. Novikov V. V., Markelov V. A., Tselishchev A. V., Konkov V. F., Sinelnikov L. P., Panchenko V. L. Structure-phase changes and corrosion behavior of e110 and e635 claddings of fuels in water cooled reactors // J. Nucl. Sci. Technol. – 2006. – V. 43, N 9. – P. 991–997.
8. Markelov V. A. On correlation of composition, structural-phase state, and properties of E635 zirconium alloy // Inorg. Mater. Appl. Res. – 2010. – V. 1, N 3. – P. 245–253.
9. Dong Q., Yu H., Yao Z., Long F., Balogh L., Daymond M. R. Study of microstructure and precipitates of a Zr-2.5Nb-0.5Cu CANDU spacer material // J. Nucl. Mater (Elsevier B. V.). – 2016. – V. 481. – P. 153–163.
10. Doriot S., Onimus F., Gilbon D., Mardon J. P., Bourlier F. Transmission electron microscopy study of second phase particles irradiated by 2 MeV protons at 350 °C in Zr alloys // J. Nucl. Mater. (Elsevier B.V.). – 2017. – V. 494. – P. 398–410.

11. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. – М.: Техносфера, 2006. – 256 с.
12. Malis T., Cheng S. C., Egerton R. F. EELS log-ratio technique for specimen-thickness measurement in the TEM. // *J. Electron Microsc. Tech.* – 1988. – V. 8, N 2. – P. 193–200.
13. Yang Y. Y., Egerton R. F. Tests of two alternative methods for measuring specimen thickness in a transmission electron microscope // *Micron.* – 1995. – V. 26, N 1. – P. 1–5.
14. Zhang H.-R., Egerton R. F., Malac M. Local thickness measurement through scattering contrast and electron energy-loss spectroscopy // *Micron (Elsevier Ltd).* – 2012. – V. 43, N 1. – P. 8–15.
15. Egerton R. F., Cheng S. C. Measurement of local thickness by electron energy-loss spectroscopy // *Ultramicroscopy.* – 1987. – V. 21, N 3. – P. 231–244.
16. Elakoubovskii K., Mitsuishi K., Nakayama Y., Furuya K. Thickness measurements with electron energy loss spectroscopy // *Microsc. Res. Tech.* – 2008. – V. 71, N 8. – P. 626–631.
17. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 271 p.
18. Bell D. C., Garratt-Reed A. J. *Energy Dispersive X-ray Analysis in the Electron Microscope.* – Oxford: Taylor & Francis, 2003. – 160 p.
19. Williams D. B., Carter C. B. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science.* V. 1. – New York: Springer, 2009. – 760 p.
20. *Transmission Electron Energy Loss Spectrometry in Materials Science and the EELS Atlas*, Ahn, C.C., (Ed.). – Wiley Verlag, 2006. – 472 p
21. Kurata H., Isoda S., Kobayashi T. Chemical Mapping by Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy // *J. Electron Microsc. (Tokyo).* – 1996. – V. 45, N 4. – P. 317–320.
22. Frolov A. S., Krikun E. V., Prikhodko K. E., Kuleshova E. A. Development of the DIFFRACALC program for analyzing the phase composition of alloys // *Crystallogr. Reports.* – 2017. – V. 62, N 5.
23. Kuleshova E. A., Frolov A. S., Maltsev D. A., Safonov D. V., Krikun E. V., Fedotova S. V. Structure and Phase Composition of Zirconium Fuel Claddings in Initial State and after Creep Tests // *KnE Mater. Sci. 5th Int. Sch. "New Mater. – Mater. Innov. energy"*, 2017.
24. Yang H. L., Matsukawa Y., Kano S., Duan Z. G., Murakami K., Abe H. Investigation on microstructural evolution and hardening mechanism in dilute Zr–Nb binary alloys // *J. Nucl. Mater (Elsevier B.V.).* – 2016. – V. 481. – P. 117–124.
25. Doriot S., Verhaeghe B., Béchade J.-L., Menut D., Gilbon D., Mardon J.-P., Cloué J.-M., Miquet A., Legras L. Microstructural Evolution of M5 TM7 Alloy Irradiated in PWRs up to High Fluences – Comparison With Other Zr-Based Alloys // *Zircon. Nucl. Ind. 17th.* – V. 100: Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2015. – P. 759–799.
26. Kiran Kumar N. A. P., Szpunar J. A. EBSD studies on microstructure and crystallographic orientation of delta-hydrides in Zircaloy-4, Zr–1% Nb and Zr–2.5% Nb // *Mater. Sci. Eng. A.(Elsevier B.V.).* – 2011. – V. 528, N 21. – P. 6366–6374.
27. Rajasekhara S., Kotula P.G., Enos D.G., Doyle B.L., Clark B.G. Influence of Zircaloy cladding composition on hydride formation during aqueous hydrogen charging // *J. Nucl. Mater. (Elsevier B.V.).* – 2017. – V. 489. – P. 222–228.
28. Simpson L. A., Cann C. D. Fracture toughness of zirconium hydride and its influence on the crack resistance of zirconium alloys // *J. Nucl. Mater.* – 1979. – V. 87, N 2–3. – P. 303–316.
29. Weatherly G. C. The precipitation of gamma-hydride plates in zirconium // *Acta Metall.* – 1981. – V. 29. – N 3. – P. 501–512.
30. Suman S., Khan M. K., Pathak M., Singh R. N., Chakravarty J. K. Hydrogen in Zircaloy: Mechanism and its impacts // *Int. J. Hydrogen Energy (Elsevier Ltd).* – 2015. – V. 40, N 17. – P. 5976–5994.
31. Bradbrook J. S., Lorimer G. W., Ridley N. The precipitation of zirconium hydride in zirconium and zircaloy-2 // *J. Nucl. Mater.* – 1972. – V. 42, N 2. – P. 142–160.
32. Northwood D. O., Gilbert R. W., Bahen L. E., Kelly P. M., Blake R. G., Jostsons A., Madden P. K., Faulkner D., Bell W., Adamson R. B. Characterization of neutron irradiation damage in zirconium

alloys – an international “round-robin” experiment // J. Nucl. Mater. – 1979. – V. 79. – N 2. – P. 379–394.

33. Carpenter G. J. C., Watters J. F. A study of electron irradiation damage in Zirconium using a high voltage electron microscope // J. Nucl. Mater. – 1981. – V. 96, N 3. – P. 213–226.

34. Company P. C-component dLslocations in neutron irradiated Zircaloy-2 // J. Nucl. Mater. – 1983. – V. 116. – P. 127–130.

35. Onimus F., Béchade J. L. Radiation Effects in Zirconium Alloys // Compr. Nucl. Mater. – Elsevier, 2012. – P. 1–31.

36. Idrees Y., Yao Z., Kirk M. A., Daymond M. R. In situ study of defect accumulation in zirconium under heavy ion irradiation // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 433, N 1–3. – P. 95–107.

37. Yan C., Wang R., Wang Y., Wang X., Bai G. Effects of ion irradiation on microstructure and properties of zirconium alloys-A review // Nucl. Eng. Technol. (Elsevier B.V.) . – 2015. – V. 47, N 3. – P. 323–331.

38. Barashev A. V., Golubov S. I., Stoller R. E. Theoretical investigation of microstructure evolution and deformation of zirconium under neutron irradiation // J. Nucl. Mater. (Elsevier B.V.). – 2015. – V. 461. – P. 85–94.

УДК 621.039.546:669.296

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ЦИРКОНИЕВЫЕ СПЛАВЫ КАК МАТЕРИАЛ ОБОЛОЧКИ ДИСПЕРСИОННЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Г. В. КУЛАКОВ¹, канд. техн. наук, Ю. В. КОНОВАЛОВ¹, канд. техн. наук, А. А. КОСАУРОВ¹,
М. М. ПЕРЕГУД¹, В. Ю. ШИШИН², канд. техн. наук, А. А. ШЕЛЬДЯКОВ²

¹ГНЦ 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

²АО «ГНЦ НИИАР», 433510, Ульяновская обл., Димитровград, Западное шоссе, 9

Статья поступила 11.05.2018

В АО «ВНИИНМ» на основе циркониевого сплава Э635 разработаны модифицированные циркониевые сплавы Э635М и Э635опт и с оболочками из этих сплавов изготовлены опытные дисперсионные тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы). Были проведены реакторные испытания (реактор МИР) и послереакторные материаловедческие исследования поведения оболочек ТВЭЛов под облучением, в том числе анализ микроструктуры и коррозионных повреждений, гидридных выделений и содержания водорода, определение кратковременных механических свойств, в сравнении со штатными циркониевыми сплавами Э110 и Э635. Положительные результаты исследований позволяют рекомендовать сплавы Э635М и Э635опт для использования в качестве оболочек ТВЭЛов активных зон с повышенными ресурсными характеристиками.

Ключевые слова: циркониевые сплавы, атомная энергетика, тепловыделяющий элемент, послереакторные исследования, коррозионная стойкость, гидриды

ЛИТЕРАТУРА

1. Никулина А. В. Нодулярная коррозия циркониевых изделий // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2012. – Вып. 1 (72). – С. 79–89.

2. Nikulina A. V., Markelov V. A., Peregud M. M., Voevodin V. N., Panchenko V. L., Kobylansky G. P. Irradiation-Induced Microstructural Changes in Zr–1%Sn–1%Nb–0,4%Fe // Journal of Nuclear Materials. – 1996. – V. 238. – P. 205–210.

3. Lee K., Hong S. Zirconium hydrides and their effect on the circumferential mechanical properties of Zr–Sn–Fe–Nb tubes // Journal of Alloy and Compound. – 2002. – V. 346 (1–2). – P. 302–307.

4. Min S., Kim M., Kim K. Cooling rate- and hydrogen content-dependent hydride reorientation and mechanical property degradation of Zr–Nb alloy claddings // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – V. 441. – P. 306–314.

5. Кулаков Г. В., Ватулин А. В., Коновалов Ю. В., Косауров А. А., Перегуд М. М., Коротченко Е. А., Шишин В. Ю., Шельдяков А. А. Анализ влияния напряженно-деформированного состояния об-

лученных оболочек твэлов из циркониевых сплавов на ориентацию гидридов // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122, № 2. – С. 73–77.

6. Колесник М. Ю., Алиев Т. Н., Лиханский В. В. Моделирование переориентации гидридов в оболочках твэлов отработавших ТВС в условиях сухого хранения // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4(88). – С. 1–13.

7. Шишов В. Н. Эволюция микроструктуры и деформационная стабильность сплавов Zr–Nb–(Fe–Sn–O) под действием облучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: материаловедение и новые материалы. – 2012. – Вып. 1 (72). – С. 90–106.

УДК 620.179.152

РАДИАЦИОННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ – НЕОБХОДИМОЕ СРЕДСТВО ПРИ СОЗДАНИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ НОВЫХ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

О. Г. ОСПЕННИКОВА, канд. техн. наук, Е. И. КОСАРИНА, д-р техн. наук, О. А. КРУПНИНА

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

Статья поступила 4.05.2018, в окончательной редакции – 15.06.2018

Процесс радиационного контроля осуществляется системой, в состав которой входят собственно объект контроля, источник излучения, детектор, дефектоскопист. При взаимодействии объекта контроля с излучением формируется его радиационное изображение в виде распределенной мощности дозы излучения в соответствии со свойствами объекта контроля. На этом этапе формируется полезная информация об объекте контроля, которая в дальнейшем при преобразовании радиационного изображения в оптическое частично теряется, частично искажается, вуалируется шумом. Анализ оптического изображения проводит дефектоскопист, от физического и эмоционального состояния которого зависит результат контроля. В настоящей работе проведен поэтапный анализ всей системы радиационного контроля. Первый этап – формирование радиационного изображения. Для теоретической оценки размеров минимального выявляемого дефекта системы рентгеновского контроля были использованы пространственно-частотный анализ и аналитический метод, установлены минимальные размеры дефекта, для которого радиационное изображение будет сформировано в зависимости от свойств источника излучения и объекта контроля. Второй этап – преобразование радиационного изображения в оптическое. Приведено описание моделирования этого процесса, а также получена модель того, как дефектоскопист видит рентгенограмму и принимает решение о состоянии объекта контроля. Исследовано формирование оптического изображения методом цифровой радиографии и определен критерий выбора энергии излучения при использовании в качестве детектора цифровой техники.

Ключевые слова: радиационный контроль, пространственно-частотный спектр, частотно-контрастная характеристика, вероятность обнаружения дефектов, цифровая радиография, отношение сигнал/шум

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. – М.: ВИАМ, 2015. – С. 458–464.

2. 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.

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

4. Каблов Е. Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // Металлы Евразии. – 2017. – № 3. – С. 2-6.

5. Ключев В. В., Соснин Ф. Р. Теория и практика радиационного контроля: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1998. – 170 с.

6. Косарина Е. И., Степанов А. В., Демидов А. А., Михайлова Н. А., Крупнина О. А. Формирование радиационных изображений дефектов при радиационном неразрушающем контроле // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2016. – № 4. – С. 81–92. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-81-92.
7. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа: Уч. пособие. Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 488 с.
8. Калман Р., Фарб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 354 с.
9. Сухарев А. Г. Минимаксные алгоритмы в теории численного анализа. – М.: Научная и учебная литература, 2010. – 281 с.
10. Головинский П. А. Математические модели. – М.: Научная и учебная литература, 2011. – С. 56–73.
11. Горбунов В. И., Епифанов Б. Н. Автоматические устройства в радиационной дефектоскопии. – М.: Атомтиздат, 1979. – 120 с.
12. Саввина Н. А., Косарина Е. И., Мирошин К. Г., Степанов А. В. Теоретический расчет и практические способы определения вероятности обнаружения дефектов в авиационных материалах // Авиационные материалы и технологии. – 2005. – № 4. – С. 17–22.
13. Саввина Н. А., Косарина Е. И., Далин М. А., Степанов А. В. Моделирование процессов формирования оптического изображения и их расшифровки // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 12. – С. 24–28.
14. Косарина Е. И., Степанов А. В. Оценка вероятности обнаружения дефектов изделий посредством моделирования процессов формирования и расшифровки их оптических изображений // Дефектоскопия. – 2017. – № 1. – С. 66–75.
15. Степанов А. В., Косарина Е. И., Демидов А. А. Компьютерная рентгенография с применением фотосимулированных пластин // Авиационные материалы и технологии. – № 4. – 2015. – С. 79–85.
16. Степанов А. В., Косарина Е. И., Саввина Н. А., Усачев В. Е. Макро- и микропористость в сплавах на основе алюминия и никеля, обнаружение ее рентгеноскопическими методами неразрушающего контроля // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 423–430.
17. Майоров А. А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле // Сфера. Нефть и газ. – № 9. – 2009. – С. 26–37
18. Косарина Е. И., Крупнина О. А., Демидов А. А., Турбин Е. М. Цифровая радиография в неразрушающем контроле авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 562–574. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-562-574.