

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

- Ковальчук М. В., Орыщенко А. С., Малышевский В. А., Петров С. Н., Шумилов Е. А. К вопросу об унификации химического состава высокопрочных сталей для судостроения 7
- Голубева М. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И., Мотовилина Г. Д., Святышева Е. В., Рогожкин С. В., Лукьянчук А. А. Изменение структуры высокопрочной экономнолегированной стали марки 09ХГН2МД при отпуске 15
- Чурбаев Р. В., Федотов В. П., Черемичина Э. Р. Высокая пластичность магния под давлением при малых и больших скоростях деформации 27
- Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Шестаков А. В., Фесенко Т. В. Структура и свойства интерметаллидного сплава на основе алюминид никеля, микролегированного редкоземельными металлами 35

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Сильченко О. Б., Силуянова М. В., Низовцев В. Е., Климов Д. А., Корнилов А. А. О перспективах применения наноструктурных гетерофазных полифункциональных композиционных материалов в авиадвигателестроении 50
- Асланян И. Р. Повышение ресурса эксплуатации приработочных покрытий 58
- Макаров А. М., Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А., Прудников И. С., Фармаковский Б. В. Влияние состава газовой фазы на формирование функционально-градиентных покрытий методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления 65
- Макаров А. М., Косильникова А. В., Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А., Климов В. Н., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. Разработка технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий на базе износо- и коррозионно-стойкого сплава системы Cu–Ni 70
- Быстров Р. Ю., Беляков А. Н., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А., Геращенко Е. Ю., Барковская Е. Н., Коркина М. А., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. Получение композиционного катода для магнетронного напыления функциональных покрытий 76
- Васильева О. В., Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Высокоомные сплавы на основе никеля для получения резистивных термостабильных микропроводов методом высокоскоростной закалки расплава 82
- Прибытков Г. А., Коржова В. В., Криницын М. Г., Фирсина И. А. Синтез и электронно-лучевая наплавка композиционных порошков моноборид титана – титановая связка 88
- Васильев А. Ф., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю., Фармаковский Б. В. Композиционное коррозионно-стойкое покрытие из сплава на основе германия 103
- Геращенко Д. А., Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Кузнецов П. А., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. Функциональные защитные покрытия из сплава на основе никеля 110
- Рогалев А. М., Раевских А. Н., Аргинбаева Э. Г., Прагер С. М. Особенности получения металлопорошковых композиций высокотемпературного интерметаллидного сплава с карбидным упрочнением системы Ni–Al–Ta–C методом газовой атомизации применительно к технологии селективного лазерного сплавления 115
- Скворцова А. Н., Толочко О. В., Бобкова Т. И., Васильева Е. А., Старицын М. В. Исследование влияния технологических параметров метода холодного газодинамического напыления на износостойкость покрытия алюминий – углеродные нановолокна 126

Вакулов Н. В., Мышлявцев А. В., Малютин В. И., Митряева Н. С. Исследование изменения свойств резины при хранении и эксплуатации резинотехнических изделий с использованием метода динамического механического анализа как экспресс-метода 137

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Бахарева В. Е., Никитина И. В., Чурикова А. А. Эпоксидные радиотехнические стеклопластики горячего прессования для судовых антенных обтекателей и защиты антенн в системах радиосвязи и радиолокации 143

Терехов И. В., Чистяков Е. М., Филатов С. Н., Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л. Факторы, влияющие на огнестойкость эпоксидных композиций, модифицированных эпоксидсодержащими фосфазенами..... 159

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Мельников П. В., Гежа В. В., Мотовилина Г. Д., Могильников В. А. Влияние микролегирования бором на структуру и свойства сварного шва, выполненного порошковой проволокой, для сварки листового проката из высокопрочной стали с нормируемым пределом текучести 750 МПа 169

Ковтунов А. И., Семистенова Т. В., Острячко А. М. Исследование процессов формирования, структуры и свойств наплавленных покрытий на основе сплавов системы Cu–Ti 175

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Оленин М. И., Горынин В. И., Бережко Б. И., Ховратович И. М., Пташник А. В. Некоторые аспекты исследования коррозионных процессов на крепежных деталях из стали марки 25Х1МФ после алитирования 182

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рябцов А. В., Виленский О. Ю. Математическая модель радиационного формоизменения сборок активной зоны реакторов типа БН и ее реализация в ПК ANSYS 190

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов 200

К ВОПРОСУ ОБ УНИФИКАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ СУДОСТРОЕНИЯ

М. В. КОВАЛЬЧУК¹, чл.-корр. РАН, А. С. ОРЫЩЕНКО², д-р техн. наук,
В. А. МАЛЫШЕВСКИЙ², д-р техн. наук, С. Н. ПЕТРОВ², канд. хим. наук, Е. А. ШУМИЛОВ².

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва,
пл. Академика Курчатова, 1

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

Статья поступила 12.12.2017

Исследованы проблемы создания конструкционных высокопрочных сталей унифицированного химического состава с пределом текучести в диапазоне от 590 до 950 МПа и технологий их производства. Возможность получения таких материалов появилась на основе результатов исследований, проводимых с помощью пластометра Gleeble 3800 и с использованием полупромышленного стана Кварто 800. Настоящие исследования подтвердили возможность унификации химического состава высокопрочных сталей с регулируемым пределом текучести в указанных пределах. Учитывая идентичность результатов обработки стали на упомянутом оборудовании и промышленных станах Кварто 5000, полученные в настоящей работе результаты вполне могут быть реализованы в промышленности.

Ключевые слова: термомеханическая обработка, наноструктурирование, фрагментация, унификация химического состава

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Горынин И. В., Малышевский В. А., Рыбин В. В. Высокопрочные свариваемые корпусные стали для надводного кораблестроения: вчера, сегодня, завтра // Роль российской науки в создании отечественного подводного флота. – М.: Наука. – 2008. – С. 281–288.

3. Горынин И. В., Хлусова Е. И. Наноструктурированные стали для освоения месторождений шельфа Северного Ледовитого океана // Вестник РАН. – 2010. – № 2. – С. 1069–1075.

4. Hanlon D. N., Van der Zwang S. J. S. The effect of plastic deformation of austenite on the kinetics of subsequent ferrite formation // ISN Int. – 2001. – N 9. – P. 1028–1036.

5. 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.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ МАРКИ 09ХГН2МД ПРИ ОТПУСКЕ

М. В. ГОЛУБЕВА¹, О. В. СЫЧ¹, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА¹, д-р техн. наук,
Г. Д. МОТОВИЛИНА¹, канд. техн. наук, Е. В. СВЯТЫШЕВА¹,
С. В. РОГОЖКИН^{2,3}, д-р физ.-мат. наук, А.А. ЛУКЪЯНЧУК²

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

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

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 11540,
Москва, Каширское ш., 31.

Проведено исследование изменения структуры в зависимости от режимов термоулучшения образцов листового проката новой стали марки 09ХГН2МД с пределом текучести не менее 690 МПа. Установлены особенности карбидообразования при высоком отпуске, влияющие на уровень механических свойств.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, микроструктура, мартенсит, бейнит, феррит, карбиды

ЛИТЕРАТУРА

1. Настич С. Ю., Морозов Ю. Д., Марченко В. Н., Степашин А. М., Зырянов В. В., Сороколет О. В. Новая износостойкая сталь 17ХГН2МФБТ для кузовов карьерных самосвалов // Сталь. – 2005. – № 3. – С. 82–85.
2. Настич С. Ю., Морозов Ю. Д., Марченко В. Н., Степашин А. М., Зырянов В. В., Сороколет О. В. Разработка и промышленное опробование высокопрочной свариваемой стали с высокой хладостойкостью для несущих конструкций в транспортном машиностроении // Металлург. – 2005. – № 5. – С. 55–58.
3. Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Высокопрочные свариваемые стали // СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 212 с.
4. Семичева Т. Г., Хлусова Е. И., Шерохина Л. Г. Процессы карбидообразования и хрупкость при отпуске судостроительной стали // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2 (42). – С. 69–78.
5. Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Возможности повышения прочностных характеристик экономнолегированных высокопрочных сталей за счет образования наноразмерных карбидов // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 3 (59). – С. 52–64.
6. Хлусова Е. И., Орлов В. В., Мотовилина Г. Д., Корчагин А. М., Матросов М. Ю. Влияние отпуски на изменение структуры и свойств высокопрочной штрипсовой стали категории прочности Х90 и Х100 после термомеханической обработки // Металлург. – 2010. – № 11. – С. 68–73.
7. Рогожкин С. В., Алеев А. А., Лукьянчук А. А., Шутов А. С., Разницын О. А., Кириллов С. Е. Прототип атомного зонда с лазерным испарением // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 3. – С. 129–134.
8. Разницын О. А., Лукьянчук А. А., Шутов А. С., Рогожкин С. В., Алеев А. А. Оптимизация параметров анализа материалов методами атомно-зондовой томографии с лазерным испарением атомов // Масс-спектрометрия. – 2017. – Т. 14, № 1. – С. 33–39.
9. Голубева М. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И., Мотовилина Г. Д. Исследование механических свойств и характера разрушения новой экономнолегированной хладостойкой стали с гарантированным пределом текучести 690 МПа // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 4 (49). – С. 19–24.

УДК 669.721:539.374

ВЫСОКАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ МАГНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПРИ МАЛЫХ И БОЛЬШИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ

Р. В. ЧУРБАЕВ¹, канд. физ.-мат. наук, В. П. ФЕДОТОВ², д-р техн. наук, Э. Р. ЧЕРЕМИЦИНА²

¹ФГБУН «Институт физики металлов Уральского отделения РАН»,
620137, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18. E-mail: churbaevr@mail.ru

²ФГБУН «Институт машиноведения Уральского отделения РАН»,
620049, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34. E-mail: elviera1@rambler.ru

Статья поступила 31.08.2017, в окончательной редакции – 07.12.2017

Исследовано влияние давления и скорости деформации на пластичность чистого магния при температуре окружающей среды 293 К (комнатная). Эксперименты проводили при давлении в диапазоне от 0,1 до 800 МПа, а скорость деформации – от $3,3 \cdot 10^{-5}$ до 332 с^{-1} . В результате была обнаружена высокая пластичность магния при малых и больших скоростях деформации под давлением. Опыты подтвердили факт снижения пластичности магния с повышением скорости дефор-

магии, причем под давлением снижение пластичности чистого магния наблюдается только при скорости деформации до $0,17 \text{ с}^{-1}$, а при более высокой скорости она, наоборот, повышается. Показано, что давление при переходе из хрупкого (непластического) в пластическое состояние с повышением скорости деформации от $3,3 \cdot 10^{-4}$ до 332 с^{-1} возрастет на 99,3 МПа – от 142,2 до 241,5 МПа.

Ключевые слова: пластичность магния, давление, деформация под давлением, скорость деформации, хрупкопластический переход, разрушение

ЛИТЕРАТУРА

1. Бусалов Ю. Е., Гурьев И. И., Елкин Ф. М., Копьев И. М.. Влияние скорости деформирования на прочность и пластичность магния и магниевых сплавов, содержащих литий // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – № 3. – С. 145–148.
2. Toaz M. W., Ripling E. J. Correlation of the tensile properties of pure magnesium and four commercial alloys with their mode of fracturing // Transactions AIME. – 1956. – V. 206. – P. 936–946.
3. Пью Х. П. Механические свойства материалов под давлением. Т. 1. – М.: Мир, 1973. – 296 с.
4. Sturges J. L., Col B. N., Parsons B. High-rate deformation in a high pressure environment / Proc. Int. Symp. Intense Dyn. Load and Eff., Beijing. June 3–7, 1986. – Oxford etc.: Beijing, 1988. – P. 765–770.
5. Чурбаев Р. В., Добромыслов А. В., Колмогоров В. Л., Талуц Г. Г. Влияние скорости деформации на пластичность металлов под давлением // ФММ. – 1990. – № 6. – С. 178–183.
6. Davidson T. E., Uy J. C., Lee A. P. The tensile fracture characteristics of metals under hydrostatic pressures to 23 kilobars // Acta metallurgica. – 1966. – V. 14, N 8. – P. 937–948.
7. Korta R., Chokshi A. H. Strain-rate sensitivity and microstructural evolution in a Mg–Al–Zn // Scr. Mater. – 2010. – V. 63, N 9. – P. 913–916.
8. Song Wei Qian, Beggs Peter, Easton Mark. Compressive strain – rate sensitivity of magnesium-aluminium die casting alloys // Mater. and Des. – 2009. – V. 30, N 3. – P. 642–648.
9. Stanford N., Sabirov I., Sha G., La Fontaine A., Ringer S. P., Barnett M. R. Effect of Al and Gd solutes on the strain rate sensitivity of magnesium alloys // Met. and Mater. Trans. A. – 2010. – V. 41, N 3. – P. 734–743.
10. Wan G., Wu B. L., Zhao Y. H., Zhang Y. D., Esling C. Strain-rate sensitivity of textured Mg–3Al–1Zn alloy(AZ31) under impact deformation // Scr. Mater. – 2011. – V. 65, N 6. – P.461–464.
11. Wang B. S., Xin R. L., Huang G. J., Liu Q. Strain rate and texture effects on microstructural characteristics of Mg–3Al–1Zn alloy during compression // Scr. Mater. – 2012. – V. 66, N 5. – P. 239–242.
12. Колмогоров В. Л., Спевак Л. Ф., Чурбаев Р. В. Определение ресурса пластичности металлов при высокоскоростном деформировании в условиях высокого давления // Деформация и разрушение материалов. – 2013. – № 4. – С. 2–8.
13. Tork Byat N., Pardis N., Ebrahimi R. Investigation on the feasibility of room temperature plastic deformation of pure magnesium by simple shear extrusion process // Mater. Sci. and Eng. A. – 2013. – V. 560. – P. 34–39.
14. Чурбаев Р. В., Колмогоров В. Л., Талуц Г. Г., Буркин С. П. Установка сложного нагружения для исследования материалов при высоких регулируемых давлениях // Заводская лаборатория. – 1989. – Т. 55, № 9. – С. 98–99.

УДК 669.017.165

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ, МИКРОЛЕГИРОВАННОГО РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

О. А. БАЗЫЛЕВА, канд. техн. наук, Э. Г. АРГИНБАЕВА, канд. техн. наук, А. В. ШЕСТАКОВ,
Т. В. ФЕСЕНКО

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

Проведены исследования совокупного влияния редкоземельных металлов – празеодима, неодима и эрбия, технологии выплавки интерметаллидного сплава на основе алюминид никеля на чистых шихтовых материалах с использованием 25, 50 и 75 мас. % отходов, технологии отливки монокристаллических заготовок и их термической обработки, совмещенной с горячим газостатическим прессованием, на механические свойства и длительную прочность на уровне паспортных данных.

Ключевые слова: интерметаллид никеля, алюминид никеля, монокристалл, жаропрочность, структура, кристаллографическая ориентация, термическая обработка, горячее изостатическое прессование

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. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 7–17.
3. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2008. – 191 с.
4. Сидоров В. В., Ригин В. Е., Каблов Д. Е. *Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование*. – М.: ВИАМ, 2016. – 351 с.
5. Шмотин Ю. Н., Старков Р. Ю., Данилов Д. В., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАОНПО «Сатурн» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 2. – С. 6–8.
6. Сидоров В. В., Ригин В. Е., Горюнов А. В., Мин П. Г. Ресурсосберегающая технология переработки кондиционных отходов литейных жаропрочных сплавов // *Металлург*. – 2014. – № 5. – С. 35–39.
7. Поварова К. Б., Бунтушкин В. П., Казанская Н. К., Дроздов А. А., Базылева О. А. Особолегкие жаропрочные наноструктурированные сплавы на основе Ni₃Al для авиационного двигателестроения и энергетического машиностроения // *Вопросы материаловедения*. – 2008. – № 2. – С. 85–93.
8. Microstructure and mechanical properties of Ni₃Al and Ni₃Al–1B base alloys fabricated by SHS/HE / J. T. Guo, L. Y. Sheng, Y. Xie et al. // *Intermetallics*. – 2011. – N 19. – P. 137–142.
9. Ping Li, Shu-suo Li, Ya-fang Han. Influence of solution heat treatment on microstructure and stress rupture properties of a Ni₃Al base single crystal superalloy IC6SX // *Intermetallics*. – 2011. – N 19. – P. 182–186.
10. Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Туренко Е. Ю. Высокотемпературные интерметаллидные сплавы для деталей ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. – 2013. – № 3. – С. 26–31.
11. Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z. Applications of Ni₃Al based intermetallic alloys-current stage and potential perceptivities // *Materials*. – 2015. – N 8. – P. 2537–2568. Doi:10.3390/ma8052537.
12. Тихомирова Е. А., Будиновский С. А., Живушкин А. А., Сидохин Е. Ф. Особенности развития термической усталости в деталях из жаропрочных сплавов с покрытием // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 3. – С. 20–25.
13. Патент РФ № 2434068. Сплав на основе интерметаллида Ni₃Al / Базылева О. А., Каблов Е. Н., Аргинбаева Э. Г., Туренко Е. Ю., Шестаков А. В. Опубликовано: 20.11.2011 // *Бюл. № 32*.
14. Шишкарева Л. М., Кузьмина Н. А. Обзор методик определения качества структуры монокристаллических отливок жаропрочных сплавов // *Труды ВИАМ*. – 2014. – № 1. Ст. 06 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-6-6.
15. Базылева О. А., Унчикова М. В., Туренко Е. Ю., Багетов В. В., Шестаков А. В. Исследование влияния термической обработки на микроструктуру, параметры дендритной ликвации и время

до разрушения интерметаллидного ренийсодержащего сплава на основе Ni_3Al // Труды ВИАМ. – 2016. – № 10. Ст. 04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-4-4.

16. Оспенникова О. Г., Евгенов А. Г., Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Туренко Е. Ю. Микроструктурные и фазовые превращения в интерметаллидном сплаве на основе Ni_3Al после воздействия термической обработки и горячего изостатического прессования // Труды ВИАМ. – 2016. – № S(43). – С. 36–43 (viam-works.ru).

17. Изучение влияния редкоземельных металлов (РЗМ) на жаропрочность сплавов на основе Ni_3Al / К. Б. Поварова, Н. К. Казанская, А. А. Дроздов, О. А. Базылева и др. // Металлы. – 2011. – № 1. – С. 55–63.

18. Сидоров В. В., Тимофеева О. Б., Калицев В. А., Горюнов А. В. Влияние микролегирования РЗМ на свойства и структурно-фазовые превращения в интерметаллидном сплаве ВКНА-25-ВИ // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № S. – С. 97–105.

19. Каблов Е. Н., Сидоров В. В., Каблов Д. Е., Мин П. Г., Ригин В. Е. Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // Электрометаллургия. – 2016. – № 9. – С. 30–41.

20. Сидоров В. В., Ригин В. Е., Горюнов А. В., Мин П. Г. Ресурсосберегающие технологии переработки некондиционных отходов литейных жаропрочных сплавов // Металлург. – 2014. – № 5. – С. 35–39.

21. Влияние направленной кристаллизации на структуру и свойства монокристаллов сплава на основе Ni_3Al , легированного W, Mo, Cr и РЗЭ / К. Б. Поварова, А. А. Дроздов, Ю. А. Бондаренко, О. А. Базылева и др. // Металлы. – 2014. – № 4. – С. 35–40.

22. Каблов Е. Н., Бондаренко Ю. А., Ечин А. Б., Сурова В. А., Каблов Д. Е. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2011. – № SP2. – С. 20–25.

23. Бондаренко Ю. А., Ечин А. Б. Направленная кристаллизация жаропрочного сплава с переменным управляемым градиентом // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3. – С. 50–58.

24. Герасимов В. В., Висик Е. М. Технологические аспекты литья деталей горячего тракта ГТД из интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА сплавов с монокристаллической структурой // Литейщик России. – 2012. – № 2. – С. 19.

25. Каблов Е. Н., Бондаренко Ю. А., Ечин А. Б. Исследование влияния переменного управляемого температурного градиента на особенности структуры, фазовый состав, свойства высокотемпературных жаропрочных сплавов при их направленной кристаллизации // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2016. – № 6. – С. 43–61.

26. Базылева О. А., Шестаков А. В., Аргинбаева Э. Г., Туренко Е. Ю. Возможность повышения характеристик жаропрочности и жаростойкости конструкционного интерметаллидного сплава на основе алюминида никеля // Металлы. – 2016. – № 1. – С. 93–101.

27. Пат. № 2 588949 РФ. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al и изделие, выполненное из него / Каблов Е. Н., Базылева О. А., Шестаков А. В., Аргинбаева Э. Г., Туренко Е. Ю. Опубликовано: 10.07.2016 // Бюл. № 19.

УДК 621.763:621.452.3

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

О. Б. СИЛЬЧЕНКО¹, д-р техн. наук, М. В. СИЛУЯНОВА¹, д-р техн. наук,
В. Е. НИЗОВЦЕВ², канд. техн. наук, Д. А. КЛИМОВ², А. А. КОРНИЛОВ²

¹ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», 125883, Москва, Волоколамское шоссе, 4. E-mail: mai@mai.ru

Статья поступила 9.06.2017, в окончательной редакции – 16.11.2017

Дан краткий обзор свойств и областей применения разработанных и исследованных наноструктурированных сверхтвердых композиционных материалов и покрытий на их основе. Проведенные исследовательские работы позволяют сделать вывод о перспективности применения наноструктурированных композиционных материалов на основе карбидов, карбонитридов и диборидов переходных и тугоплавких металлов для авиакосмических объектов. Приоритетным направлением повышения технико-экономических показателей газотурбинных двигателей является применение новых композиционных конструкционных материалов, которые по своим основным физико-механическим свойствам превосходят традиционные в несколько раз. Многочисленные исследования в этой области свидетельствуют о том, что наибольшего прогресса при разработке новых перспективных конструкционных композиционных материалов следует ожидать на пути создания материалов на основе полимерных, металлических, интерметаллических и керамических матриц. В настоящее время прослеживается четкая тенденция по созданию агрегатов и узлов газотурбинных двигателей и энергетических установок многократного запуска с большим ресурсом работы и повышенной долговечностью. Исследования по применению композиционных материалов нового поколения проводятся практически во всех развитых странах, в первую очередь – в США и Японии.

Ключевые слова: наноструктурированный материал и покрытие, тугоплавкий карбид, карбонитрид, диборид, коэффициент трения

ЛИТЕРАТУРА

1. Климов А. К., Климов Д. А., Крылов Е. А. Композиционные материалы для двигателестроения // Автомобильная промышленность. – 2003. – № 3. – С. 27–30.
2. Гранов В. И., Глазков А. В. Эффективность применения наноструктурных композиционных материалов и изделий из них в авиационной промышленности // Неорганические материалы. – 1975. – Т. 11, № 2. – С. 226–229.
3. Климов Д. А., Шкарупа И. Л., Плясункова Л. А. Исследование свойств материалов на основе карбида кремния // Новые огнеупоры. – 2009. – № 6. – С. 305–307.
4. Гнесин Г. Г. Карбидокремниевые материалы. – М.: Металлургия, 1977. – 494 с.
5. Низовцев В. Е., Климов Д. А. Эффективность применения наноструктурных сверхтвердых композиционных материалов для антифрикционных покрытий подшипников скольжения // Новые технологические процессы и надежность ГТД. Вып. 9: «Подшипники и уплотнения». – М.: ЦИАМ, 2015. – С. 144–145.
6. Климов А. К., Климов Д. А., Низовцев В. Е., Ухов П. А. Эффективность применения наноструктурных композиционных материалов и изделий из них в авиационной промышленности // Труды МАИ. – 2013. – № 67.

УДК 621.891

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИРАБОТОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

И. Р. АСЛАНЯН, д-р техн. наук

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

Статья поступила 22.09.2017, в окончательной редакции – 27.12.2017

Проведены исследования износа приработочных фосфатных покрытий, применяемых для защиты стальных изделий. С помощью методов математического моделирования контактного взаимодействия установлено, что износ фосфатных покрытий в наибольшей степени зависит от их шероховатости. Применение технологии промасливания фосфатных покрытий позволило ускорить процесс приработки деталей цилиндропоршневой группы компрессоров холодильных установок, уменьшить их износ на 30% и существенно повысить ресурс работы деталей трения.

Ключевые слова: приработочные фосфатные покрытия, износ, шероховатость, промасливание, метод математического моделирования

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E. N., Muboyadzhyan S. A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTES // *Russian metallurgy (Metally)*. – 2012. – V. 2012, N 1. – P. 1–7.
3. Каблов Е. Н. Коррозия или жизнь // *Наука и жизнь*. – 2012. – № 11. – С. 16–21.
4. Каблов Е. Н., Мубояджян С. А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 60–70.
5. Александров Д. А., Мубояджян С. А., Гаямов А. М., Горлов Д. С. Исследование жаростойкости и кинетики изменения элементного состава композиции из титанового сплава ВТ41 с жаростойкими покрытиями // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № 5. – С. 61–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-61-66.
6. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // *Автоматическая сварка*. – 2013. – № 10. – С. 23–32.
7. Асланян И. Р., Шустер Л. Ш. Изнашивание электролитических NiP покрытий при фреттинг-коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 2 (35). – С. 26–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-26-31.
8. Шустер Л. Ш., Криони Н. К., Асланян И. Р., Емаев И. И. Оценка изнашивания покрытий в различных условиях трения // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2015. – № 2 (122). – С. 10–13.
9. Грудев А. П., Зильберг Ю. В., Тилик В. Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справочник. – М.: *Металлургия*, 1982. – 302 с.
10. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. Кн. 2 / Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. – М.: *Машиностроение*, 1979. – 358 с.
11. Венцель С. В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания. – М.: *Химия*, 1979. – 240 с.
12. Барыкин Н. П., Асланян И. Р. Математическое моделирование режимов поверхностного пластического деформирования для повышения износостойкости подшипников скольжения // *Трение и износ*. – 2001. – Т. 22, № 5. – С. 496–501.
13. Goryacheva I. G. Development of Galin's Research in Contact Mechanics. In L. A. Galin and G. M. L. Gladwell (Ed) *Contact Problems*. – Springer, 2008. – P. 207–237.
14. Джонсон К. *Механика контактного взаимодействия*. – М.: *Мир*, 1989. – 510 с.
15. Горячева И. Г. *Механика фрикционного взаимодействия*. – М.: *Наука*, 2001. – 478 с.

УДК 621.793.7

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ СВЕРХЗВУКОВОГО ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

А. М. МАКАРОВ, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ,
Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, И. С. ПРУДНИКОВ, 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 26.10.2017

Приводятся результаты исследования по разработке способа получения износ- и коррозионно-стойкого градиентного покрытия. Особенностью предлагаемого способа является создание градиента химического состава за счет управления составом газовой фазы при реализации метода сверхзвукового холодного газодинамического напыления покрытий. Это обеспечивает высокую адгезионную прочность композиционных покрытий системы металл – неметалл в сочетании с высокой микротвердостью периферийных слоев. Такие функционально-градиентные покрытия имеют широкие возможности практического применения.

Ключевые слова: сверхзвуковое холодное газодинамическое напыление, функционально-градиентное покрытие, адгезионная прочность, микротвердость

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В. Размышления с оптимизмом. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 526 с.
2. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Под ред. Ж. И. Алферова. – СПб.: Изд-во ИП Пермьяков С. А., 2015. – 543 с.
3. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабров В. А., Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск: Удмуртия, 2014. – 480 с.
4. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю. Исследование адгезионной прочности композиционных армированных покрытий системы металл–неметалл, полученных методом «холодного» газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(78). – С. 103–117.
5. Gorynin, I., Malyshevsky, V., Farmakovsky, B., Projects of Federal State Unitary Enterprise Central Research Institute of Structural Materials “Prometey”, Russia // Innovations and Nanotechnologies of Russia. – 2012. – N 1(2), April. – P. 64–68.
6. Марголин В. И., Потапов А. А., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Развитие нанотехнологий на основе нанокompозитов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 190 с.
7. 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 наноматериалов // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(78) – С. 118–127.
8. Патент РФ № 2354749. Способ получения наноструктурированных функционально-градиентных износостойких покрытий / Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Горынин И. В. – 2009.
9. Патент РФ № 2367701. Коррозионно-стойкий сплав на основе германия / Сомкова Е. А., Васильев А. Ф., Кузнецов П. А., Сергеева О. С., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А. – 2008.

УДК 621.793.7

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА БАЗЕ ИЗНОСО- И КОРРОЗИОННО-СТОЙКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Cu–Ni

А. М. МАКАРОВ, А. В. КОСУЛЬНИКОВА, Т. И. БОБКОВА, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ,
Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, В. Н. КЛИМОВ, Е. А. САМОДЕЛКИН,
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 26.10.2017

Приведены результаты комплексных исследований по разработке композиционного наноструктурированного порошка из сплава системы Cu–Hf–BN и функциональных износ- и коррозионно-стойких покрытий на его основе. Разработана технология нанесения композиционного наноструктурированного покрытия системы Cu–Ni–Zr–Cr–Hf–BN на стальную подложку (сталь X18Ю5) с использованием методов сверхзвукового холодного и микроплазменного напыления. Полученные покрытия имеют высокий уровень микротвердости (до 32 ГПа), адгезионной прочности (более 13 МПа) и стойкости к коррозионному растрескиванию. Положительной особенностью полученных покрытий является также широкий диапазон рабочих температур – от 850 до – 196°С.

Ключевые слова: композиционный наноструктурированный порошок, износо- и коррозионно-стойкое покрытие, сверхзвуковое «холодное» и микроплазменное напыление

ЛИТЕРАТУРА

1. Геращенко Д. А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом «холодного» газодинамического напыления на основе армированных порошков системы Al-Sn + Al₂O₃ // Автореф. дис. ... к.т.н., СПб, 2015.
2. Марголин В. И., Жабрев В. А., Лукьянов Г. Н., Тупик В. А. Введение в нанотехнологию: Учебник. – СПб.: Лань, 2012. – 464 с.
3. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Под ред. Ж. И. Алферов. – СПб.: Изд-во ИП Пермяков С. А., 2015. – 543 с.
4. Глезер А. М., Пермякова И. Е. Нанокристаллы, закаленные из расплава. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.
5. Коган Б. И., Суховольский А. А. Технологическое обеспечение качества ремонта ковшей экскалаторов // Вестник КузГТУ, 2010
6. Гаршин А. П., Шумячер В. М., Пушкарев О. И. Способ получения и свойства абразивного материала на основе карбида кремния и корунда // Сборник докладов 8-го международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка» Минск, 2013. – С. 124–129.
7. 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.
8. Бурканова Е. Ю., Фармаковский Б. В. Высокоскоростной механосинтез с и использованием дезинтеграторных установок для получения наноструктурированных порошковых материалов системы металл – керамика износостойкого класса // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 1(69). – С. 80–85.

УДК 621.793.7:621.791.3

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО КАТОДА ДЛЯ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Р. Ю. БЫСТРОВ, А. Н. БЕЛЯКОВ, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук,
Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА, Е. Н. БАРКОВСКАЯ, М. А. КОРКИНА, Е. А. САМОДЕЛКИН,
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 26.10.2017

Разработана и освоена в научном нанотехнологическом центре НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» технология получения композиционных катодов для вакуумного магнетронного нанесения функциональных покрытий. На примере системы Ti-Ru показаны перспективы создания композиционных катодов из дорогостоящих и труднодеформируемых материалов с помощью активированной пайки аморфными припоями.

Ключевые слова: активированная пайка, аморфный припой, холодное газодинамическое напыление, функционально-градиентное покрытие, композиционный катод

ЛИТЕРАТУРА

1. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабрев В. А., Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск: Удмуртия, 2014. – 480 с.
2. Берлин Е. В., Сейдман Л. А. Получение тонких пленок реактивным магнетронным напылением. – М.: Техносфера, 2014. – 256 с.

3. Raoelison R. N., Verdy Ch, Liao H.. Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications // *Materials & Design*. – 2017. – V. 133. – P. 266–287.

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

5. Горынин И. В., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Виноградова Т. С., Самоделкин Е. А. Активированная пайка разнородных материалов аморфными припоями // *Вопросы материаловедения*. – 2016. – № 2(86). – С. 111–119.

6. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Машек И. И. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // *Вопросы материаловедения*. – 2014. – № 1(77) – С. 87–96.

7. Пат. RU 2486995. Способ получения композиционного катода / Бурканова Е. Ю., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Коркина М. А. Оpubл. 10.07.2013 // Бюлл. № 19.

8. Ешметьева Е. Н., Беляков А. Н., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Особенности формирования покрытий системы Ti–Ru–O методом вакуумного магнетронного напыления на постоянном токе // *Вопросы материаловедения*. – 2017. – № 1(89). – С. 115–122.

УДК 621.793.7:621.791.3

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО КАТОДА ДЛЯ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Р. Ю. БЫСТРОВ, А. Н. БЕЛЯКОВ, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук,
Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА, Е. Н. БАРКОВСКАЯ, М. А. КОРКИНА, Е. А. САМОДЕЛКИН,
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 26.10.2017

Разработана и освоена в научном нанотехнологическом центре НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» технология получения композиционных катодов для вакуумного магнетронного нанесения функциональных покрытий. На примере системы Ti–Ru показаны перспективы создания композиционных катодов из дорогостоящих и труднодеформируемых материалов с помощью активированной пайки аморфными припоями.

Ключевые слова: активированная пайка, аморфный припой, холодное газодинамическое напыление, функционально-градиентное покрытие, композиционный катод

ЛИТЕРАТУРА

1. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабров В. А., Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск: Удмуртия, 2014. – 480 с.

2. Берлин Е. В., Сейдман Л. А. Получение тонких пленок реактивным магнетронным напылением. – М.: Техносфера, 2014. – 256 с.

3. Raoelison R. N., Verdy Ch, Liao H.. Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications // *Materials & Design*. – 2017. – V. 133. – P. 266–287.

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

5. Горынин И. В., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Виноградова Т. С., Самоделкин Е. А. Активированная пайка разнородных материалов аморфными припоями // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 2(86). – С. 111–119.

6. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Машек И. И. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 1(77) – С. 87–96.

7. Пат. RU 2486995. Способ получения композиционного катода / Бурканова Е. Ю., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Коркина М. А. Оpubл. 10.07.2013 // Бюлл. № 19.

8. Ешметьева Е. Н., Беляков А. Н., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Особенности формирования покрытий системы Ti–Ru–O методом вакуумного магнетронного напыления на постоянном токе // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 1(89). – С. 115–122.

УДК 621.74:621.315.3:669.24

ВЫСОКООМНЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ МИКРОПРОВОДОВ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЗАКАЛКИ РАСПЛАВА

О. В. ВАСИЛЬЕВА, канд. техн. наук, П. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук,
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

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

Статья поступила 27.10.2017

Приведены результаты исследования по разработке оптимального состава сплава на основе базовой системы Ni–Cr–Si–В для литья микропроводов в стеклянной изоляции методом скоростной закалки расплава. Полученные из разработанного сплава высокоомные микропровода имеют низкое значение температурного коэффициента сопротивления (менее $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и высокое погонное сопротивление (более 1000 кОм/м) в широком интервале положительных и отрицательных температур (от –196 до 250°C).

Ключевые слова: литой микропровод в стеклянной изоляции, резистивный сплав, погонное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления

ЛИТЕРАТУРА

1. Пермяков С. А. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Под ред. Ж. И. Алферова и др. – СПб.: Изд-во И.П., 2015. – С. 137–163.

2. Масайло Д. В., Смелов А. И., Песков Т. В., Фармаковский Б. В. Разработка тензо- и термо-резистивных сплавов для литья микропроводов // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 3(79). – С. 73–78.

3. Литой микропровод и его свойства / Е. Я. Бадинтер и др. – Кишинев: Штиинца, 1973. – 317 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. 58–61.

5. Литой микропровод и его применение в науке и технике / Под ред. акад. Д. В. Гицу. – Кишинев: Штиинца, 1988. – 424 с.

6. Фармаковский Б. В. Структура и свойства микропроводов из двойных сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1977. – № 3. – С. 33–38.

7. А. с. 480773 СССР, МКИ С22С19/00 Сплав на основе никеля / Фармаковский Б. В. и др. Оpubл. 15.08.75 // Бюлл. № 30. – С. 84.

8. Патент РФ № 2351672. Аморфный резистивный сплав на основе никеля // Фармаковский Б. В., Сомкова Е. А., Юрков М. А., Точенюк Д. А., Быстров Р. Ю., Семёнов А. С. – 2009.

9. Патент РФ № 2424349. Аморфный сплав на основе никеля для литья микропроводов // Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Коркина М. А., Кузьмин К. А., Тараканова Т. А., Земляничин Е. Ю. – 2011.

10. Глезер А. М. и Пермякова И. Е. Нанокристаллы, закаленные из расплава. – М: Физматлит, 2012. – 360 с. – ISBN 978–5–9221–1373–1.

11. Жабрев В. А., Калинин В. Т., Марголин В. И., Николаев А. И., Тупик В. А. Физико-химические процессы синтеза наноразмерных объектов. – СПб: Элмор, 2012. – 328 с.

12. Способ определения малых значений сопротивления / В. Ф. Болбочан и др. // Тез. докл. республ. науч.-техн. конф. «Приборы сопротивления и резистивная элементная база электроизмерительных приборов». – Кишинев, 1982. – С. 29.

13. Масайло Д. В., Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Высокопрочные литые микропровода для армирования конструкционных композитов // Металлообработка. – 2012. – № 4. – С. 23–27.

УДК 621.791.92:621.762.2

СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ НАПЛАВКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ МОНОБОРИД ТИТАНА – 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 РАН»
(ИФПМ СО РАН), 634055, Томск, пр. Академический, 2/4, E-mail: root@ispms.tomsk.ru

Статья поступила 21.11.2017

Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) порошковых смесей титана и бора получены композиционные порошки моноборид титана – титан с содержанием титановой связки от 20 до 60 об. %. СВС порошки используются для электронно-лучевой наплавки покрытий толщиной до 3 мм на подложку из титана ВТ1-0. Методами рентгеноструктурного 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 со свойствами титана ВТ1-0 твердость покрытий, упрочненных иглоподобными включениями моноборида титана в титановой матрице, выше в 2,2 раза, а абразивная износостойкость – в 3,7 раза. При этом эффект упрочнения и повышения износостойкости титановой матрицы частицами моноборида титана гораздо меньше, чем подобные эффекты при использовании в наплавленных покрытиях в качестве упрочняющей фазы дисперсных частиц карбида титана.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Qi J. Q., Wang H. W., Zou C. M., Wei W. Q., Wei Z. J. Temperature dependence of fracture behavior of in situ synthesized TiC/Ti-alloy matrix composite // Materials Science and Engineering: A. – 2011. – V. 528, is. 25–26. – P. 7669–7673.

2. Rasool G., Mridha S., Stack M. M. Mapping wear mechanisms of TiC/Ti composite coatings // Wear. – 2015. – V. 328–329. – P. 498–508.

3. Tjong S. C., Ma Z. Y. Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites // Materials Science and Engineering: R: Reports. –2000. – V. 29, is. 3–4. – P. 49–113.

4. Zhang J., Ke W., Ji W., Fan Z., Wang W., Fu Z. Microstructure and properties of in situ titanium boride (TiB) /titanium (Ti) composites // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – V. 648. – P. 158–163.

5. Attar H., Löber L., Funk A., Calin M., Zhang L. C., Prashanth K. G., Scudino S., Zhang Y. S., Eckert J. Mechanical behavior of porous commercially pure Ti and Ti–TiB composite materials manufactured by selective laser melting // *Materials Science and Engineering: A.* – 2015. – V. 625. – P. 350–356.
6. Sahay S. S., Ravichandran K. S., Atri R. Evolution of microstructure and phases in *in situ* processed Ti–TiB composites containing high volume fractions of TiB whiskers // *Journal of Materials Research.* – 1999. – V. 14, N 11. – P. 4214–4223.
7. 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 and Engineering: A.* – 2016. – V. 654. – P. 352–358.
8. 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.
9. Imayev V., Gaisin R., Gaisina E., Imayev R., Fecht H.-J., Pyczak F. Effect of hot forging on microstructure and tensile properties of Ti–TiB based composites produced by casting // *Materials Science and Engineering: A.* – 2014. – V. 609. – P. 34–41.
10. Imayev V. M., Gaisin R. A., Imayev R. M. Effect of boron additions and processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy Ti–6.5Al–3.3Mo–0.3Si // *Materials Science & Engineering A.* – 2015. – V. 641. – P. 71–83.
11. Shen X., Zhang Z., Wei S., Wang F., Lee S. Microstructures and mechanical properties of the *in situ* TiB–Ti metal-matrix composites synthesized by spark plasma sintering process // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2011. – V. 509, is. 29. – P. 7692–7696.
12. Cheloui H., Zhang Z., Shen X., Wang F., Lee S. Microstructure and mechanical properties of TiB–TiB₂ ceramic matrix composites fabricated by spark plasma sintering // *Materials Science and Engineering: A.* – 2011. – V. 528. – P. 3849–3853.
13. Wang, F.-C., Zhang Z., Luo J., Huang C.-C., Lee S.-K. A novel rapid route for *in situ* synthesizing TiB–TiB₂ composites // *Composites Science and Technology.* – 2009. – V. 69. – P. 2682–2687.
14. Wei S., Zhang Z.-H., Wang F.-C., Shen X.-B., Cai H.-N., Lee S.-K., Wang L. Effect of Ti content and sintering temperature on the microstructures and mechanical properties of TiB reinforced titanium composites synthesized by SPS process // *Materials Science and Engineering: A.* – 2013. – V. 560. – P. 249–255.
15. Chaudhari R., Bauri R. Reaction mechanism, microstructure and properties of Ti–TiB *in situ* composite processed by spark plasma sintering // *Materials Science and Engineering: A.* – 2013. – V. 587. – P. 161–167.
16. 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.
17. 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.
18. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник: Т. 1. / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
19. Miklaszewski A. Effect of starting material character and its sintering temperature on microstructure and mechanical properties of super hard Ti/TiB metal matrix composites // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* – 2015. – V. 53, part A. – P. 56–60.
20. Yan Z., Chen F., Cai Y., Zheng Y. Microstructure and mechanical properties of *in-situ* synthesized TiB whiskers reinforced titanium matrix composites by high-velocity compaction // *Powder Technology.* – 2014. – V. 267. – P. 309–314.
21. Quast J. P., Boehlert C. J., Gardner R., Tuegel E., Wyen T. A microstructure and sonic fatigue investigation of Ti–TiB functionally graded materials // *Materials Science and Engineering A.* – 2008. – V. 497. – P. 1–9.
22. Fu B., Wang H., Fu. B., Zou C., Wei Z. 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.

23. Акопян А. Г., Долуханян С. К., Боровинская И. П. Взаимодействие титана, бора и углерода // Физика горения и взрыва. – 1978. – № 3. – С. 70–79.
24. Азатян Т. С., Мальцев В. М., Мержанов А. Г., Селезнев В. А. О механизме распространения волны горения в смесях титана с бором // Физика горения и взрыва. – 1980. – Т. 16, № 2. – С. 37–42.
25. Zwicker U. Titan und Titanlegierungen. – Springer-Verlag, 1974. – 717 p.
26. Горынин И. В., Чечулин Б. Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
27. Lin Y., Lei Y., Li X., Zhi X., Fu H., A study of TiB₂/TiB gradient coating by laser cladding on titanium alloy // Optics and Lasers in Engineering. – 2016. – V. 82. – P. 48–55.
28. Genç, A., Banerjee R., Hill D., Fraser H. L. Structure of TiB precipitates in laser deposited in situ, Ti–6Al–4V–TiB composites // Materials Letters. – 2006. – V. 60. – P. 859–863.
29. Attar H., Ehtemam-Haghighi S., Kenta D., Okulov I. V., Wendrocke H., Bönisch M., Volegovf A. S., Caline M., Eckert J., Dargusch M. S. Nanoindentation and wear properties of Ti and Ti–TiB composite materials produced by selective laser melting // Materials Science and Engineering: A. – 2017. – V. 688. – P. 20–26
30. Attar H., Bönisch M., Calin M., Zhang L. C., Ecludino S., Eckert J. Selective laser melting of in situ titanium titanium boride composites // Processing, microstructure, and mechanical properties. Acta materialia. – 2014. – V. 76. – P. 13–22.
31. Attar H., Prashanth K. G., Zhang L.-C., Calin M., Okulov I. V., Scudino S., Yang C., Eckert J. Effect of Powder Particle Shape on the Properties of In Situ Ti–TiB Composite Materials Produced by Selective Laser Melting // Journal of Materials Science and Technology. – 2015. – V. 31. – P. 1001–1005.
32. Hu Y., Cong W., Wang X., Li Y., Ning F., Wang H. Laser deposition-additive manufacturing of TiB–Ti composites with novel three-dimensional quasi-continuous network microstructure: Effects on strengthening and toughening // Composites. Part B. – 2018. – V. 133. – P. 91–100.
33. 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.
34. Рогачев А. С., Мукасян А. С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику. – М.: Физматлит, 2012. – 400 с.
35. Прибытков Г. А. Криницын М. Г., Коржова В. В. Исследование продуктов СВ-синтеза в порошковых смесях титана и углерода, содержащих избыток титана // Перспективные материалы. – 2016. – № 5. – С. 59–68.
36. Прибытков Г. А., Коржова В. В., Барановский А. В., Криницын М. Г. Фазовый состав и структура СВС композиционных порошков карбид титана – связка из стали Р6М5 // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2016. – № 2. – С. 64–71.
37. 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 (92). – С. 52–61.
38. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справочник. / Под ред. Т. Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.

УДК 621.793.7

КОМПОЗИЦИОННОЕ КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ ИЗ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЯ

А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, Е. А. САМОДЕЛКИН, Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА,
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

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

Приведены результаты комплексных исследований по разработке порошковой композиции Ge–Cr–Zr–Ce–WC, перспективной для получения функциональных коррозионно-стойких хладостойких покрытий методом микроплазменного напыления. Покрытие имеет высокий уровень адгезионной прочности (более 40 МПа) и микротвердости (до 10–12 ГПа) и выдерживает многократное термоциклирование в диапазоне температур от минус 60 до 20°C.

Ключевые слова: металломатричные наноконпозиты, порошковая композиция Ge–Cr–Zr–Ce–WC, микроплазменное напыление, защита от коррозии

ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин В. И., Потапов А. А., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Развитие технологий на основе наноконпозитов. – СПб.: Изд-во СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – С. 190.
2. Введение в нанотехнологию. Учебник / В. И. Марголин и др. – СПб.: Лань, 2012. – С. 464.
3. Сырков А. Г. Нанотехнологии и наноматериалы. Роль неравновесных процессов: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 194.
4. 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. 118–127.
5. Бобкова Т. И., Фармаковский Б. В., Богданов С. П. Создание композиционных наноструктурированных поверхностно-армированных порошковых материалов на основе системы Ti/WC и Ti/CN для напыления покрытий повышенной твердости // Вопросы материаловедения, – 2015. – № 3 (83) – С. 80–90.
6. Джурицкий Д. В., Фармаковский Б. В. Исследование процесса нанесения покрытий из разнородных материалов на металлические подложки методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2003. – № 2– С. 38–44.
7. Патент РФ № 2367701. Коррозионно-стойкий сплав на основе германия // Сомкова Е. А., Васильев А. Ф., Кузнецов П. А., Сергеева О. С., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., 2009.
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. Abriata J. P., Bolcich J. C., Arias D. The Ge–Zr (Germanium-Zirconium) system // Bull. Alloy Phase Diagrams. – 1986. – V. N 1. – P. 43–47.
10. 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.
11. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабров В. А., Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и плёнок. – Ижевск: Удмуртия, 2014. – С. 480.
12. Основы нанотехнологии: Учебник / Кузнецов Н. Т. и др. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – С. 397.

УДК 621.793.7

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, П. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, Е. А. САМОДЕЛКИН, 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 19.12.2017

Разработан состав прецизионного сплава на основе тройной системы Ni–Cr–Mo для нанесения износо- и коррозионно-стойких покрытий методом сверхзвукового холодного газодинамического

го напыления. Покрытия из сплава оптимального состава имеют высокий уровень эксплуатационных свойств и весьма перспективны для защиты конструкционно-функциональных элементов морской техники от агрессивных внешних воздействий.

Ключевые слова: напыление, микротвердость, адгезионная прочность

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Под ред. Ж. И. Алфёрова. – СПб.: Изд-во ИП Пермякова, 2015. – С. 137–163.
2. Фармаковский Б. В. Изготовление тонких металлических нитей из хрупких высокопрочных материалов // Изв. Академии наук СССР. Металлы. – 1977. – № 2. – С. 239–245.
3. Судзуки Х. Механизм упрочнения и последние достижения в области высокопрочных материалов // Электроника. – 1970. – С. 12–16.
4. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю. Исследование адгезионной прочности композиционных армированных покрытий системы металл – неметалл, полученных методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(78). – С. 103–117.
5. Патент 2527543 РФ Сплав на основе никеля для нанесения износа и коррозионно-стойких покрытий микроплазменная или холодным сверхзвуковым напылением / Геращенко Е. Ю. и др., 2012.
6. Фармаковский Б. В., Улин И. В. Функциональные материалы и покрытия – пути и надежды // По пути созидания. – Т. 2. СПб: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2009.
7. Горынин И. В. Размышления с оптимизмом. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014.

УДК 621.762.5:669.017.165

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА С КАРБИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ СИСТЕМЫ Ni–Al–Ta–C МЕТОДОМ ГАЗОВОЙ АТОМИЗАЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

А. М. РОГАЛЕВ, А. Н. РАЕВСКИХ, Э. Г. АРГИНБАЕВА, канд. техн. наук, С. М. ПРАГЕР

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
(ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: viam.lab16@mail.ru

Статья поступила 22.12.2017

Исследованы структура и свойства впервые изготовленных синтезированных методом селективного лазерного сплавления образцов из высокотемпературного интерметаллидного сплава с карбидным упрочнением системы Ni–Al–Ta–C. Показано, что выбранные технологические параметры атомизации обеспечивают получение металлопорошковой композиции надлежащего металлургического качества. Определены параметры селективного лазерного сплавления образцов, которые позволили получить плотную структуру синтезированного материала с пористостью 0,02%.

Ключевые слова: металлопорошковая композиция, атомизация расплава, селективное лазерное сплавление, микроструктура, интерметаллидный сплав с карбидным упрочнением, гранулометрический состав

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. – 2013. – № 10. – С. 23–32.

- 3 Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С., Сидоров В. В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2013. – № 3. – С. 47–54.
- 4 Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Светлов И. Л., Демонис И. М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 36–51.
- 5 Шмотин Ю. Н., Старков Р. Ю., Данилов Д. В., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО НПО «Сатурн» // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 2. – С. 6–8.
- 6 Оспенникова О. Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и технологических покрытий // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 19–35.
- 7 Базылева О. А., Туренко Е. Ю., Аргинбаева Э. Г. Высокотемпературные интерметаллидные сплавы для деталей ГТД // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 3. – С. 26–31.
- 8 Базылева О. А., Туренко Е. Ю., Рассохина Л. И., Битюцкая О. Н., Шитиков А. В., Лапеев Б. С. Литые блоки соплового аппарата 2-й степени ТВД из интерметаллидного сплава ВКНА-4-ВИ // Литейное производство. – 2014. – № 10. – С. 7–12.
- 9 Лыков П. А., Бромер К. А., Роцин В. Е., Брындин С. А. Определение технологических параметров получения металлических ультрадисперсных порошков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Металлургия». – 2011. – Вып. 14. – С. 17–19.
- 10 Неруш С. В., Евгенов А. Г., Ермолаев А. С., Рогалев А. М. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе для лазерной LMD наплавки // Вопросы материаловедения. – 2013. – №4 (76). – С. 98–107.
- 11 Евгенов А. Г., Неруш С. В., Василенко С. А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2014. № 5. Ст. 04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.10.2017 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4
- 12 Каблов Е. Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. – 2015. – №2 (11). – С. 52–55.
- 13 Неруш С. В., Евгенов А. Г. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава марки ЭП648-ВИ применительно к лазерной LMD-наплавке, а также оценка качества наплавки порошкового материала на никелевой основе на рабочие лопатки ТВД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2014. – № 3. Ст. 01 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 16.10.2017 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1
- 14 Неруш С. В., Ермолаев А. С., Рогалев А. М., Василенко С. А. Исследование технологии восстановления торца пера рабочей лопатки первой ступени турбины высокого давления (ТВД) из сплава ЖС32-ВИ методом лазерной газопорошковой наплавки с применением металлического порошка сплава ЖС32-ВИ, изготовленного методом атомизации // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 8 (44). – С. 4. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 16.10.2017 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-4-4.
- 15 Евгенов А. Г., Базылева О. А., Королев В. А., Аргинбаева Э. Г. Перспективы применения сплава на основе интерметаллида Ni₃Al типа ВКНА-4УР в аддитивных технологиях // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – № S1 (43). – С. 31–35. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-31-35
- 16 Евгенов А. Г., Рогалев А. М., Неруш С. В., Мазалов И. С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. Ст.02 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.10.2017 г.). DOI:10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
- 17 Евгенов А. Г., Сухов Д. И., Неруш С. В., Рогалев А. М. Механические свойства и структура сплава системы Ni–Cr–W–Mo–Al–Ti–Nb, получаемого методом селективного лазерного сплавления // Технология машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 5–9.
- 18 Евгенов А. Г., Рогалев А. М., Карачевцев Ф. Н., Мазалов И. С. Влияние горячего изостатического прессования и термической обработки на свойства сплава ЭП648, синтезированного методом селективного лазерного сплавления // Технология машиностроения. – 2015. – № 9. – С. 11–16.

19 Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS) / A. Techel et al. , <http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing/>

20 Selective laser melting of aluminium components / E. Louvis et al. // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – V. 211, № 2. – P. 275–284.

УДК 621.793.7:539.538

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЯ АЛЮМИНИЙ – УГЛЕРОДНЫЕ НАНОВОЛОКНА

А. Н. СКВОРЦОВА¹, О. В. ТОЛОЧКО², д-р техн. наук, Т. И. БОБКОВА¹, канд. техн. наук, Е. А. ВАСИЛЬЕВА¹, М. В. СТАРИЦЫН¹

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

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Статья поступила 10.01.2018

Проведены измерения микротвердости и коэффициента трения, определены модуль упругости, коэффициенты упругого восстановления и сопротивления пластической деформации функциональных покрытий алюминиевая матрица – углеродные нановолокна. Для определения износостойкости покрытий проведены испытания на интенсивность износа. Получены экспериментальные значения интенсивности износа функциональных покрытий, что позволяет прогнозировать срок их службы. На основе проведенных исследований определены покрытия с высоким уровнем механических свойств и износостойкостью.

Ключевые слова: функциональные покрытия, холодное газодинамическое напыление, физико-механические свойства, углеродные нановолокна, углеродные нанотрубки, алюминий, коэффициент трения

ЛИТЕРАТУРА

1. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. – 1991. – N 354. – P. 56–58.
2. Lee Y. H. The physical property and application of carbon nanotube // Sae Mulli. – 2005. – N 51. – P. 84–144.
3. Скворцова А. Н., Лычева К. А., Возняковский А. А., Кольцова Т. С., Ларионова Т. В. Механизмы упрочнения свойств композиционных материалов углеродными нановолокнами // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – V. 25. – P. 30–36.
4. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Машек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(77). – С. 87–96.
5. Tonitzki A., Skvortsova A. N., Koltsova T. S., Ganin V., Danilova M. A., Shamshurin A. I. Aluminum-carbon nanofibers composite coating produced by cold spraying // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2016. – № 3 (249). – С. 81–88.
6. Скворцова А. Н., Лычева К. А., Возняковский А. А., Кольцова Т. С. Композиционные материалы на основе алюминия, упрочненные углеродными нановолокнами // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2015. – № 3(226). – С. 78–84.
7. Bakshi S.R., Lahiri D., Agarwal A. Carbon nanotube reinforced metal matrix composites // International Materials Reviews. – 2010. – V. 55(1). – P. 41.
8. Рудской А. И., Толочко О. В., Кольцова Т. С., Насибулин А. Г. Синтез углеродных нановолокон на поверхности частиц порошка алюминия // Металловедение и термическая обработка. – 2013. – № 10. – С. 53–57.

9. Лычева К. А., Скворцова А. Н., Кольцова Т. С. Исследование влияния режимов механоактивации на получение высокопрочного материала алюминий – углеродные нановолокна // Сб. докладов конференции «Неделя науки СПбПУ», 2015.

10. Бреки А. Д., Кольцова Т. С., Скворцова А. Н., Толочко О. В., Александров С. Е., Лисенков А. А., Провоторов Д. А., Сергеев Н. Н., Малий Д. В., Сергеев А. Н., Агеев Е. В., Гвоздев А. Е. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе алюминия, упрочненных углеродными нановолокнами, при трении по стали 12Х // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2016. – № 4 (21). – С. 11–23.

11. Min-Feng Yu, Lourie O., Dyer M. J., Moloni K., Kelly T. F., Ruoff R. S. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load // Science. – 2000. – V. 287, Is. 5453. – P. 637–640.

12. Bakshi S. R., Singh V., Balani K., McCartney D. G., Seal S., Agarwal A. Carbon nanotube reinforced aluminum composite coating via cold spraying // Surface & Coatings Technology. – 2008. – V. 202. – С. 5162–5169.

13. Бобкова Т. И., Деев А. А., Быстров Р. Ю., Фармаковский Б. В. Нанесение износостойких покрытий с регулируемой твердостью с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления // Металлообработка. – 2012. – № 5–6. – С. 45–49.

14. Laha T., Agarwal A. Effect of sintering on thermally sprayed carbon nanotube reinforced aluminum nanocomposite // Mater. Sci. Eng., A. – 2008. – V. 480. – P. 323–332.

15. Фармаковский Б. В., Геращенко Д. А., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Улин И. В., Бобкова Т. И. Износостойкие функционально-градиентные покрытия на основе квазикристаллов, полученные методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2017. – Т. 90, № 2. – С. 130–135.

16. Гоголинский К. В., Львова Н. А., Усеинов А. С. Применение сканирующих зондовых микроскопов и нанотвердомеров для изучения механических свойств твердых материалов на наноразмере // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 6. – С. 28–36.

17. Усеинов А. С., Кравчук К. С., Львова Н. А. Измерение износостойкости сверхтонких наноструктурированных покрытий // Наноиндустрия. – 2011. – № 4. – С. 46–50.

18. Геращенко Д. А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом «холодного» газодинамического напыления на основе армированных порошков системы Al-Sn+Al₂O₃ // Автореф. дис. ... канд. техн. наук, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, 2015.

УДК 678.074:620.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ РЕЗИНЫ ПРИ ХРАНЕНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КАК ЭКСПРЕСС-МЕТОДА

Н. В. ВАКУЛОВ^{1,2}, А. В. МЫШЛЯВЦЕВ², д-р хим. наук, В. И. МАЛЮТИН¹, Н. С. МИТЯЕВА²

¹ ФГУП ФНПЦ «Прогресс», 644050, Омск, 5-я Кордная ул., д. 4

² ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, 644018, пр. Мира, д. 11

Статья поступила 17 ноября 2017

Рассматривается возможность с использованием метода динамического механического анализа определять изменение свойств резины после эксплуатации в составе крупногабаритных изделий в сопоставлении с исходными физико-механическими свойствами этой резины. С помощью совмещенной прогнозирующей кривой, построенной по наиболее характерному показателю старения, можно методом динамического механического анализа прогнозировать изменения свойств резин при хранении и эксплуатации изделий.

Ключевые слова: резина, хранение и эксплуатация, физико-механические свойства, динамический механический анализ

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьминский А. С., Лежнев Н. Н., Зуев Ю. С. Окисление каучуков и резин. М.: Госхимиздат, 1957. – 318 с.
2. Заиков Г. Е. Старение и стабилизация полимеров // Пластические массы. – 2008. – № 2. – С. 54-56.
3. Brown R. P. Practical guide to the assessment of the useful life of Rubbers. – Papra Technology Ltd, 2001.
4. Бартенев Г. М. Структура и релаксационные свойства эластомеров. – М.: Химия, 1979. – 288 с.
5. ГОСТ 9.713-86. Единая система защиты от коррозии и старения резины. Метод прогнозирования изменения свойств при термическом старении. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 12 с.

УДК 678.067.5:621.777:621.396.67

ЭПОКСИДНЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКИ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ СУДОВЫХ АНТЕННЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ И ЗАЩИТЫ АНТЕНН В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ И РАДИОЛОКАЦИИ

В. Е. БАХАРЕВА, д-р техн. наук, И. В. НИКИТИНА, канд. хим. наук, А. А. ЧУРИКОВА

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

Статья поступила 4.09.2017

Статья посвящена решению актуальной научной проблемы создания и внедрения в судостроении высокопрочных, водостойких диэлектрических стеклопластиков горячего прессования на основе би- и полифункциональных эпоксиаминных связующих и стеклотканей из бесщелочного, кварцевого и кремнеземного стекол.

Ключевые слова: стеклопластики, горячее прессование, антенные обтекатели радиолокационных станций, прочностные и диэлектрические свойства, водопоглощение, пористость

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: Справ. / Под ред. И. В. Горынина, А. С. Орыщенко, В. Е. Бахарева, Г. И. Николаева. – СПб.: НПО «Профессионал», 2014.
2. Бахарева В. Е., Орыщенко А. С. Высокопрочные стеклопластики для арктического машиностроения. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2017. – 222 с.
3. Chawla K. K. Composite Materials: Science and Engineering. – Springer Science & Business Media, 2013. – 542 p.
4. Plastics in Europe // Reinforced Plastics. – 1987. – V. 31, N 7. – P. 175–180.
5. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. – СПб.: Профессия, 2006. – 624 с.
6. Nazarov A. N., Vovk Ja. N., Lysenko V. S., Kon'kov O., Terukov E. Charge transport, trapping and electroluminescence in erbium doped a-Si : H/n-Si light-emitting heterodiodes // 16th international conference on composite materials: the first 100 years The Boeing Company Composites Materials, Boeing Aerospace Co // Materials Science and Engineering. – 1988. – V. 105, N 3. – P. 63.
7. Reinforced Plastics in Ship Radio Engineering // Reinforced Plastics. – 1987. – V. 31, N 5. – P. 110–115.
8. Composite Materials: Mechanics, Mechanical Properties and Fabrication / K. Kawata, T. Akasaka, (Eds.). – Elsevier Science Publishers B. V., 1982. – 562 p.
9. Орыщенко А. С., Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Саргсян А. С., Чурикова А. А. Создание высокопрочных водостойких диэлектриков и разработка технологии изготовления изделий радиотехнического назначения и судовой электроизоляции // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 3(79). – С. 97–108.

10. Glass Reinforced Plastics Details of Antennas // Reinforced Plastics. – 1987. – V. 31, N 5. – P. 132–134.
11. Давыдова И. Ф., Кавун Н. С. Стеклопластики – многофункциональные композиционные материалы // *Авиационные материалы и технологии* / Под общ. ред. акад. РАН Е. Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2012. – С. 253–260.
12. Гуртовник И. Г., Соколов В. И., Трофимов Н. Н., Шалгунов С. И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. – М.: Мир, 2003. – 369 с.
13. Гуртовник И. Г., Спортсмен В. Н. Стеклопластики радиотехнического назначения. – М.: Химия, 1987. – 160 с.
14. Бахарева В. Е., Конторовская И. А., Петрова Л. В. Изделия электроизоляционного назначения из стеклопластиков и технология их изготовления. – Л.: ЛДНТП, 1981. – 28 с.
15. Бахарева В. Е., Конторовская И. А., Петрова Л. В., Уткина В. Ф. Эксплуатационная стойкость эпоксидных композиционных материалов. – Л.: ЦНИИ «Румб», 1987. – 108 с.
16. Бахарева В. Е., Конторовская И. А., Мурович В. Л., Степанова И. И. Влияние структурно-технологических и эксплуатационных факторов на свойства эпоксидных стеклопластиков // *Высокопрочные армированные полимерные материалы конструкционного назначения*. – Л.: ЛДНТП, 1978. – С. 73–79.
17. Манин В. Н., Громов А. И. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. – Л.: Химия. – 1980. – 340 с.
18. Малкин А. Я., Чалых А. Е. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. – М.: Химия, 1979. – 302 с.
19. Ремизов И. А., Чалых А. Е., Попов В. Я. Определение констант диффузии жидкостей в полимере методами сорбции и спектроскопии внутреннего отражения // *Высокомолекулярные соединения*. Серия А. – 1982. – Т. 24. – С. 1630–1635.
20. Рейтлингер С. А. Проницаемость полимерных материалов. – М.: Химия, 1974. – 360 с.
21. Перрен А. А., Седлецкий Р. В. Анализ и экспериментальное обоснование синхронно-волнообразного характера изменения механической прочности и диэлектрических потерь при водопоглощении (водосбросе) в конструкционных полимерных композитах (сферо-, стекло-, углепластиках) // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 4(84). – С. 80–90.

УДК 678.686:536.46

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭПОКСИДСОДЕРЖАЩИМИ ФОСФАЗЕНАМИ

И. В. ТЕРЕХОВ¹, канд. хим. наук, Е. М. ЧИСТЯКОВ², канд. хим. наук,
С. Н. ФИЛАТОВ², д-р хим. наук, И. С. ДЕЕВ¹, канд. техн. наук, Е. В. КУРШЕВ¹, С. Л. ЛОНСКИЙ¹

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

² ФБГОУ ВО Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9

Статья поступила 23.11.2017

Исследована стойкость к горению эпоксидных композиций на основе смолы D.E.R.-330, изометилтетрагидрофталевого ангидрида и новых эпоксидсодержащих арилоксициклотрифосфазенов по ГОСТ 28157–89 (аналог теста UL-94), проведен термогравиметрический анализ и микроструктурные исследования образующегося при горении коксового остатка. Определено, что увеличение содержания фосфазенов в отвержденных композициях значительно повышает их стойкость к горению, что связано как с увеличением количества образующегося при горении пористого коксового остатка, который выступает барьером для распространения пламени и передачи тепла от пламени на образец, так и с увеличением размеров образующихся в нем пор. Полученные данные можно использовать при создании прочных и стойких к горению композиционных материалов для микроэлектроники, авиастроения и других областей промышленности.

Ключевые слова: микроструктура, стойкость к горению, поликонденсация, фосфазены, эпоксидные смолы

ЛИТЕРАТУРА

1. Song T., Li Z., Liu J., Yang S. Synthesis, characterization and properties of novel crystalline epoxy resin with good melt flowability and flame retardancy based on an asymmetrical biphenyl unit // *Polymer Science, Ser. B.* – 2013. – V. 55 (3–4). – P. 147–157.
2. Каблов Е. Н., Антипов В. В., Сенаторова О. Г. Слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1441 и сотрудничество с Airbus и TU Delft // *Цветные металлы.* – 2013. – № 9. – С. 50–53.
3. Wu N., Xiu Z., Du J. Preparation of microencapsulated aluminum hypophosphite and flame retardancy and mechanical properties of flame-retardant ABS composites // *Journal of Applied Polymer Science.* – 2017. – V. 134, is. 33. DOI: 10.1002/app.45008.
4. Liang T., Jiang Z., Wang C., Liu J. A facile one-step synthesis of flame-retardant coatings on cotton fabric via ultrasound irradiation // *Journal of Applied Polymer Science.* – 2017. – V. 134, is. 30. DOI: 10.1002/app.45114.
5. Yang Y., Luo H., Cao X., Kong W., Cai X. Preparation and characterization of a water resistance flame retardant and its enhancement on charring-forming for polycarbonate // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* – 2017. – V. 129, is. 2. – P. 809–820.
6. Dehestani M., Teimortashlu E., Molaei M., Ghomian M., Firoozi S., Aghili S. Experimental data on compressive strength and durability of sulfur concrete modified by styrene and bitumen // *Data in Brief.* – 2017. – V. 13. – P. 137–144.
7. Jin X., Sun J., Zhang J. S., Gu X., Bourbigot S., Li H., Tang W., Zhang S. Preparation of a novel intumescent flame retardant based on supramolecular interactions and its application in polyamide 11 // *ACS Applied Materials and Interfaces.* – 2017. – V. 9, is. 29. – P. 24964–24975.
8. Яценко В. С., Василевский Д. А., Безрученко В. С., Докучаев В. Н., Ольховик В. К. Новые высокопрочные термостойкие сополимеры поли-*p*-фенилен-1,3,4-оксадиазола // *Высокомолекулярные соединения, Сер. Б.* – 2014. – Т. 56 (3). – С. 277–283.
9. Волынский А. Л., Бакеев Н. Ф. Новый подход к созданию нанокомпозитов с полимерной матрицей // *Высокомолекулярные соединения, Сер. С.* – 2011. – Т. 53 (1). – С. 1203–1216.
10. Назаров В. Г., Столяров В. П., Петрова Г. Н., Грязнов В. И., Бузник В. М. Особенности поверхностного фторирования термоэластопластов на основе полиуретана и его влияние на свойства полимера // *Перспективные материалы* – 2016. – № 2. – С. 52–60.
11. Кохановская О. А., Раздьяконова Г. И., Лихолобов В. А. Физико-химические свойства и структура композиционных материалов аэрогельного типа поливиниловый спирт/технический углерод // *Перспективные материалы.* – 2017. – № 2. – С. 35–42.
12. Horrocks A. R., Price D. Fire retardant materials. – Abington: Woodhead Publishing Limited, 2001. – 429 p.
13. Lu S. Y., Hamerton I. Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers // *Progress in Polymer Science.* – 2002. – V. 27. – P. 1661–1712.
14. Liu R., Wang X. Synthesis, characterization, thermal properties and flame retardancy of a novel nonflammable phosphazene-based epoxy resin // *Polymer Degradation and Stability.* – 2009. – V. 94. – P. 617–624.
15. Chen-Yang Y. W., Lee H. F., Yuan C. Y. A flame-retardant phosphate and cyclotriphosphazene-containing epoxy resin: Synthesis and properties // *Journal of Polymer Science Part A.* – 2000. – V. 38. – P. 972–981.
16. Inoue K., Kaneyuki S., Tanigaki T. Polymerization of 2-(4-methacryloyloxyphenoxy) pentachlorocyclotriphosphazene // *Journal of Polymer Science Part A.* – 1992. – V. 30. – P. 145–148.
17. Medici A., Fantin G., Pedrini P., Gleria M., Minto F. Functionalization of phosphazenes. 1. Synthesis of phosphazene materials containing hydroxyl groups // *Macromolecules.* – 1992. – V. 25. – P. 2569–2574.

18. Yuan W. Z., Zhu L., Huang H. B., Zheng S. X., Tang X. Z. Synthesis, characterization and degradation of hexa-armed star-shaped poly(l-lactide)s and poly(d,l-lactide)s initiated with hydroxyl-terminated cyclotriphosphazene // *Polymer Degradation and Stability*. – 2005. – V. 87. – P. 503–509.
19. Ottman G., Lederle H. F., Hooks H., Kober E. Aminophenoxy- and isocyanatophenoxyphosphonitriles // *Inorganic Chemistry*. – 1967. – V. 6. – P. 394–395.
20. Bing B., Li B. Synthesis, thermal property and hydrolytic degradation of a novel star-shaped hexa[*p*-(carbonylglycinomethyl-ester)phenoxy]cyclotriphosphazene // *Science in China Ser. B-Chem.* – 2009. – V. 52, is. 12 – P. 2186–2194.
21. Brown D. E., Allen C. W. Homo- and copolymerization of (Methacryloyl ethenedi-oxo)pentachlorocyclotriphosphazene // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. – 1991. – V. 1, is. 2. – P. 189–198.
22. Terekhov I. V., Filatov S. N., Chistyakov E. M., Borisov R. S., Kireev V. V. Synthesis of oligomeric epoxycyclotriphosphazenes and their properties as reactive flame-retardants for epoxy resins // *Phosphorus, Sulfur Silicon Relat. Elem.* – 2017. – V. 192, is. 5. – P. 544–554.
23. Коробейничев О. П., Шварцберг В. М., Шмаков А. Г. Химия горения фосфорорганических соединений // *Успехи химии*. – 2007. – Т. 76 (11). – С. 1094–1121.

УДК 621.791.042:669.14.018.295

ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ БОРОМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНОГО ШВА, ВЫПОЛНЕННОГО ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ, ДЛЯ СВАРКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ С НОРМИРУЕМЫМ ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ 750 МПа

П. В. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, В. В. ГЕЖА, канд. техн. наук,
Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, В. А. МОГИЛЬНИКОВ

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

Статья поступила 7.12.2017

Исследовано влияние микролегирования бором на структуру и механические свойства сварного шва высокопрочной стали с нормируемым пределом текучести 750 МПа. На основе полученных результатов разработана порошковая проволока марки 48ПП-69.

Ключевые слова: порошковая сварочная проволока, микролегирование сварного шва, полуавтоматическая сварка в защитном газе

ЛИТЕРАТУРА

1. Грабин В. Ф., *Металловедение сварки плавлением*. – Киев: Наукова думка, 1982. – С. 416.
2. Походня И. К., Орлов Л. Н., Шевченко Г. А., Шлепаков В. Н. Влияние легирования на механические свойства сварных швов, выполненных порошковыми проволоками // *Автоматическая сварка*. – 1985. – № 7 (388). – С. 10–11.
3. Evans G. M. Microstructure and properties of ferritic steel welds containing Al and Ti // *Welding Journal*. – August 1995. – P. 249–261.
4. Пат. 2434070 РФ, МПК С22С38/00, В23К35/30, В23К9/23. Высокопрочная сварная стальная труба, металл сварного шва которой обладает высоким сопротивлением холодному растрескиванию, и способ ее изготовления / Н. Хаякава, С. Сакагути, Ф. Кавабата, М. Окацу, М. Ота, С. Нисияма, К. Нагатани, К. Исизаки. – № 2009139659/02; заявл. 19.03.2008; опубл. 20.11.2011. – Бюл. № 32. – С. 26.
5. Файнберг Л. И., Рыбаков А.А., Алимов А.Н., Розерт Р. Микролегирование швов титаном и бором при многодуговой сварке газонепроводных труб большого диаметра // *Автоматическая сварка*. – 2007. – № 5. – С. 20–25.
6. Подгаецкий В. В. О влиянии химического состава шва на его микроструктуру и механические свойства // *Автоматическая сварка*. – 1991. – № 2. – С. 1–9.

7. Oerlikon Schweisstechnik Gmbh, Consumables, (reference date 15/03/2018), URL: <https://www.oerlikon-welding.com>
8. Drahtwarenfabrik-Drahtzug Stein Gmbh & Co KG, Materialien & Verfahren, (reference date 15/03/2018), URL: <http://www.drahtzug.com/de/unternehmen/materialien-und-verfahren/>
9. Stainless Steel Welding: ESAB Technical Handbook, (reference date 15/03/2018), <http://www.esab.com/gb/en/support/upload/Technical-Handbook-Stainless-Steel-Welding.pdf>
10. Макаренко В. Д., Беляев В. А., Прохоров Н. Н., Шатило С. П., Чернов В. Ю. Влияние модифицирующих добавок на механические и вязкопластические свойства сварных соединений нефтегазопроводов // Сварочное производство. – 2001. – № 5. – С. 9–13.
11. Гудремон Э. Учение о специальных сталях. – М.-Л.: Главная редакция литературы по черной металлургии, 1937. – С. 532–535.
12. Burkhard J., Lau T., North T. H., Esperance G. L. Effect of aluminium on the Ti–O–B–N balance in submerged arc welding // Welding Journal. – 1988. – С. 25–30.

УДК 621.791.92:669.35'295

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Cu–Ti

А.И. КОВТУНОВ, д.-р техн. наук, Т. В. СЕМИСТЕНОВА, канд. техн. наук, А. М. ОСТРЯНКО

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 445020, Самарская обл., Тольятти, Белорусская ул., 14, E-mail: office@tlttsu.ru

Статья поступила 11.12.2017

Предложена технология аргодуговой наплавки титановой проволоки на медные изделия с целью получения жаростойких износостойких покрытий на основе купридов титана. Установлено влияние режимов наплавки на химический состав и структуру формируемых покрытий. Исследована стойкость к абразивному изнашиванию и жаростойкость при 600 и 800 °С покрытий системы медь–титан, содержащих от 8 до 63% титана.

Ключевые слова: куприды титана, микротвердость, аргодуговая наплавка титановой проволокой, медь, титан, жаростойкость, износостойкость

ЛИТЕРАТУРА

1. Колпачева О. В. Электронная энергетическая структура тетрагональных купридов титана и сплавов Cu–Ti–Ni // Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук по специальности 01.04.07. – Ростов-на-Дону, 2007.
2. Shmorgun V. G., Gurevich L. M., Slautin O. V., Arisova V. N., Evstropov D. A. Formation of Ti–Cu-Based intermetallic coatings on the surface of copper during contact melting // Metallurgist. – 2016. – V. 59, Is. 9–10. – P. 974–979. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0203-0>.
3. Effect of Cu content on wear resistance and mechanical behavior of Ti–Cu binary alloys / F. Yu, H. Wang, G. Yuan et al. // Appl. Phys. A. – 2017. – V. 123. – P. 278. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-0921-6>.
4. Евстропов Д. А. Формирование структуры и свойств композиционных покрытий системы Cu–Ti на поверхности медных деталей // Автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.16.09. – Волгоград, 2016.
5. Bateni M.R., Szpunar J.A., Ashrafizadeh F., Zandrahimi M. The effect of novel Ti–Cu intermetallic compound coatings on tribological properties of copper. – The Annals of University of Galati, 2003.
6. Морозова Е. А. Лазерное легирование поверхности титана медью / Е.А. Морозова, В.С. Муратов. // Успехи современного естествознания. – 2009. – № 11.
7. Крашенинников С. В., Кузьмин С. В., Лысак В. И. Исследование процессов формирования покрытий методом диффузионной интерметаллизации // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвузовский сборник научных трудов / ВолгГТУ.– Волгоград, 2002.– С. 102–110.

8. Радюк А. Г., Титлянов А. Е., Украинцев А. Е. Формирование диффузионных слоев на поверхности меди и ее сплавов // Цветные металлы. – 2007. – № 5. – С. 95–97.
9. Radek N. Experimental investigations of the Cu–Mo and Cu–Ti electrospark coatings modified by laser beam // Advances in Manufacturing Science and Technology. – 2008. – Т. 32, №. 2. – С. 53–68.
10. Ковтунов А. И., Семистенов Д. А., Семистенова Т. В., Стародубцев А. Д. Особенности формирования износостойких слоев при механизированной наплавке алюминия на сталь // Технология машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 47–50.
11. Ковтунов А. И., Плахотный Д. И., Гуцин А. А., Бочкарев А. Г., Плахотная С. Е. Влияние режимов наплавки на структуру и свойства покрытий системы титан–алюминий // Сварка и диагностика. – 2016. – № 2. – С. 35–37.
12. Elrefaey A. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer // Journal of materials processing technology. – 2009. – Т. 209. – № 5. – P. 2746–2752.
13. Крашенинников С. В. Исследование особенностей формирования и свойств интерметаллидных покрытий систем Ti–Cu и Ti–Ni на поверхности стальных деталей // Автореф. дис. ... канд. тех. наук по специальности 05.02.01 – Волгоград, 2006 – 20 с.

УДК 620.193.2:621.785.5:621.88

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА КРЕПЕЖНЫХ ДЕТАЛЯХ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 25Х1МФ ПОСЛЕ АЛИТИРОВАНИЯ

М. И. ОЛЕНИН¹, канд. техн. наук, В. И. ГОРЫНИН¹, д-р техн. наук,
Б. И. БЕРЕЖКО¹, канд. техн. наук, И. М. ХОВРАТОВИЧ², А. В. ПТАШНИК¹

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

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

Статья поступила 31 июля, в окончательной редакции – 24 ноября 2017

Исследована стойкость к атмосферной коррозии стали марки 25Х1МФ после алитирования и последующего термического улучшения. Установлено, что пониженная стойкость алитированного слоя к атмосферной коррозии вызвана наличием дефектов типа трещин и пор на поверхности либо частичным удалением слоя, содержащего интерметаллид Fe₃Al. В алитированном слое, содержащем легированный алюминием феррит, обнаружены нитриды алюминия, способствующие предотвращению холодной диффузионной сварки сопрягаемых резьбовых поверхностей крепежных деталей.

Ключевые слова: стальные крепежные детали, сопрягаемые резьбовые поверхности, коррозионное повреждение, холодная диффузионная сварка, алитирование, термическое улучшение

ЛИТЕРАТУРА

1. Блантер М. Е. Теория термической обработки. – М.: Металлургия, 1984. – 328 с.
2. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов в активированных газовых средах. – М.: Машиностроение, 1979. – 224 с.
3. Земсков Г. В., Коган Р. Л. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
4. Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки / Под ред. Ю. М. Лахтина и Я. Д. Когана. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
5. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 2. – М.: Металлургия, 1966. – 1274 с.
6. Полевой С. Н., Евдокимов В. Д. Упрочнение металлов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
7. Термическая обработка в машиностроении. Справочник / Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

8. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Кн. 1. / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эггин и др. / Пер с англ. – М.: Мир, 1984. – 303 с.
9. Микроанализ и растровая электронная микроскопия / Под ред. Ф. Морис, Л. Мени, Р. Тиксье / Пер с франц. – М.: Металлургия, 1985. – 392 с.
10. Горынин В. И. Высокопрочные материалы для резьбовых соединений. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2016. – 431 с.
11. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые соединения. – М.: Машиностроение, 1973. – 256 с.

УДК 621.039.531:539.367

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЦИОННОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ СБОРОК АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРОВ ТИПА БН И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В ПК ANSYS

А. В. РЯБЦОВ, О. Ю. ВИЛЕНСКИЙ, канд. техн. наук

АО «ОКБМ-Африкантов», 603074, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15,
E-mail: sigma@okbm.nnov.ru

Статья поступила 5.06.2017, в окончательной редакции – 13.11.2017

Определен один из основных критериев работоспособности тепловыделяющих сборок активной зоны реактора – критерий допускаемого формоизменения шестигранного чехла. Уравнения, позволяющие исследовать кинетику напряженно-деформированного состояния трехмерного тела, адаптированы для условий эксплуатацииборок активной зоны. Предложена математическая модель радиационного формоизменения стали ферритно-мартенситного класса ЭП-450. С учетом предложенной модели, а также данных по радиационному формоизменению других используемых перспективных конструкционных материалов активной зоны реактора БН созданы блоки учета эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести для программного комплекса ANSYS, что позволило использовать его возможности в этом направлении. Приведен тестовый пример с предложенными моделями радиационного распухания и радиационной ползучести, который показал, что разработанные для ПК ANSYS пользовательские блоки адекватно описывают радиационное формоизменение рассмотренных конструкционных материалов, подвергнутых радиационному облучению. Выполнен расчет радиационного формоизменения шестигранного чехла ТВС активной зоны с различными скоростями радиационного распухания и модулями радиационной ползучести. Проведено сравнение результатов расчета с результатами послереакторных обмеров сборки. Сформулированы рекомендации по использованию представленных моделей для выполнения расчета и оценки радиационного формоизменения и определения напряженного состоянияборок.

Ключевые слова: радиационное распухание, радиационная ползучесть, математическая модель, численный метод решения, аналитическое решение, тестовые примеры, сравнение

ЛИТЕРАТУРА

1. Кайдалов В. Б., Лапшин Д. А., Рябцов А. В., Исаков С. А. Расчетное моделирование радиационного формоизменения ТВС реакторов типа БН // Проблемы прочности и пластичности. – 2013. – № 75 (1). – С. 33–39.
2. Забудько Л. М., Лихачев Ю. И., Прошкин А. А. Работоспособность ТВС быстрых реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Капустин С. А., Горохов В. А., Виленский О. Ю., Кайдалов В. Б., Марголин Б. З., Бучатский А. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций из нержавеющей сталей, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморadiационных воздействий // Проблемы прочности и пластичности. – 2007. – Вып. 69. – С. 106–116.
4. Чуев В. В. Поведение конструкционных материалов в спектре нейтронов быстрого реактора большой мощности // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, ГНЦ РФ ФЭИ, 2007.
5. Дворяшин А. М., Поролло С. И., Конобеев Ю. В., Гарнер Ф. А. Влияние высокодозного нейтронного облучения на структуру ферритно-мартенситной стали ЭП-450 // Сб. докл. 7-й российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 2003. – С. 45–60.

6. Радиационное набухание ферритно-мартенситных сталей ЭП-450 и НТ-9 при облучении металлическими ионами до сверхвысоких доз / О. В. Бородин, В. В. Брык, В. Н. Воеводин и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – № 2 (97). – С. 10–15.

7. Виленский О. Ю., Рябцов А. В. Математические модели радиационного набухания и радиационной ползучести чехловой стали ЭП-450 сборок активной зоны реакторов быстрых натриевых // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы – 2017. – № 3. – С. 199–207.