

ЖУРНАЛ «ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ»

№ 3 (91), 2017

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Пазилова У. А., Хлусова Е. И., Князюк Т. В. Влияние режимов горячей пластической деформации при закалке с прокатного нагрева на структуру и свойства экономнолегированной высокопрочной стали 7

Емельянова Т. В., Грызунов В. И. Влияние режимов термоциклирования на свойства борированных поверхностных слоев штамповых сталей 20

Афанасьева Л. Е. Закономерности формирования структуры сплава Ti-6Al-4V при послойном электронно-лучевом плавлении и горячем изостатическом прессовании .. 27

Лаптев А. Б., Первухин М. В., Мовенко Д. А., Афанасьев-Ходыкин А. Н., Тимофеев В. Н., Галушка И. А. Исследование влияния магнитогидродинамической обработки сплава 1417M на структуру и содержание в нем водорода 35

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Ушаков Б. Г., Кочергин А. В., Персинин С. А., Масхулия Л. Г. Антифрикционные покрытия элементов и узлов из титановых сплавов в судовом машиностроении 44

Поляков П. А., Пугачева Н. Б., Поляков А. П. Влияние добавок на структуру и прочность спеченных композитов на основе ванадийсодержащего порошка железа 53

Асланян И. Р. Электрохимическая коррозия никель-фосфорных покрытий при фреттинге 64

Разумов Н. Г., Попович А. А. Получение порошка сферической формы высокоазотистой стали методами механического легирования и плазменной сфероидизации 74

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Никитина И. В., Савелов А. С. Полимерные композиты в узлах трения машин и механизмов северного исполнения 83

Федоров А. Л., Дьяконов А. А., Лугинова У. Р. Особенности структуры поверхности трения композитов на основе политетрафторэтилена с диоксидом титана 101

Махсидов В. В., Резников В. А., Мухаметов Р. Р., Дориомедов М. С. Интеллектуальные полимерные материалы и их применение в аэрокосмической отрасли 110

Гоголева О. В., Петрова П. Н. Исследование влияния технологий совмещения компонентов на свойства композитов на основе СВМПЭ 121

Корнопольцев В. Н., Могнонов Д. М., Аюрова О. Ж. Полимер-полимерные смеси на основе бутадиен-нитрильного каучука и новолачной смолы 127

Лебедев В. Л., Косульников В. Ю., Серый П. В., Васильева Н. Н., Логунова А. А. Температурно-частотная зависимость диссипативных свойств вибропоглощающих покрытий «жесткого» типа 133

Петухова Е. С. Полиэтиленовые композиты с поверхностно-модифицированными базальтовыми и углеродными волокнами 148

Примаченко Б. М., Строкин К. О. Теоретические и экспериментальные исследования композиционных материалов, армированных углеродными тканями. Часть 2. Механико-аналитическая модель структуры углеродной ткани 157

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Гуленко А. Г., Марголин Б. З., Бучатский А. А., Нуждов А. А. Построение расчетных кривых длительной прочности аустенитных сталей X18H9 и 08X16H11M3 с учетом нейтронного облучения 168

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Швецова В. А., Прокошев О. Ю., Марголин Б. З., Сорокин А. А., Потапова В. А. Синергетический механизм радиационного охрупчивания аустенитных нержавеющей сталей при длительном высокотемпературном облучении	182
Минкин А. И., Морозов А. М., Смирнов В. И. Совершенствование подхода для прогнозирования трещиностойкости облученной антикоррозионной наплавки реакторов типа ВВЭР	198
Марголин Б. З., Морозов А. М., Варовин А. Я., Костылев В. И., Беляева Л. А., Потапова В. А., Смирнов В. И., Прокошев О. Ю., Петров С. Н. Влияние нейтронного облучения и пострadiационного отжига на механические свойства и трещиностойкость металла антикоррозионной наплавки корпусов реакторов ВВЭР. Часть 1. Механизмы охрупчивания и восстановления свойств металла наплавки	208
Марголин Б. З., Костылев В. И., Морозов А. М., Варовин А. Я., Беляева Л. А., Потапова В. А., Смирнов В. И., Прокошев О. Ю., Петров С. Н. Влияние нейтронного облучения и пострadiационного отжига на механические свойства и трещиностойкость металла антикоррозионной наплавки корпусов реакторов ВВЭР. Часть 2. Прогнозирование механических свойств и трещиностойкости металла наплавки.....	229
ХРОНИКА	
АО «ЦНИИМ» на острие проблем материаловедения. <i>Болкисев С. А.</i>	245
Акционерному обществу «Центральный научно-исследовательский институт материалов» 105 лет	249
К юбилею профессора Виктора Евгеньевича Громова	250
Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов	252

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
ПРИ ЗАКАЛКЕ С ПРОКАТНОГО НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ**

У. А. ПАЗИЛОВА, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук, Т. В. КНЯЗЮК, канд. техн. наук

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

Статья поступила 28.08.2017

Методом EBSD-анализа исследованы особенности формирования структуры низкоуглеродистой высокопрочной экономнолегированной стали с гарантированным пределом текучести 750 МПа в зависимости от температурных режимов горячей пластической деформации. Имитационное моделирование режимов горячей пластической деформации проводили на пластометрическом комплексе GLEEBLE 3800.

Показано, что для выбора режимов может быть использован комплексный подход, включающий оценку размера зерна аустенита, определение твердости, построение гистограмм распределения размеров структурных элементов и углов разориентировок между ними, анализ относительной протяженности малоугловых границ. Результаты подтверждены при изготовлении листового проката толщиной до 40 мм в опытно-промышленных условиях.

Ключевые слова: высокопрочная экономнолегированная сталь, гарантированный предел текучести 750 МПа, пластометрический комплекс GLEEBLE 3800, статическая рекристаллизация аустенита, размер зерна, бейнитно-мартенситная структура, размер структурных элементов, разориентировки, EBSD-анализ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышов Е. А., Романов А. Д., Романова Е. А. Высокопрочные судостроительные стали и сплавы // *Металлург.* – 2016. – № 2. – С. 59–63.
2. Bandyopadhyay P. S., Kundu S., Ghosh S. K., Chatterjee S. Structure and Properties of a Low-Carbon, Microalloyed, Ultra-High-Strength Steel // *Metallurgical and materials transactions A.* – 2011. – April, V 42A. – P. 1051–1061.
3. Патент РФ № 2507295. Высокопрочная хладостойкая ас-сталь / Малышевский В. А., Хлусова Е. И., Голосиенко С. А., Хомякова Н. Ф., Милюц В. Г., Павлова А. Г., Пазилова У. Г., Афанасьев С. Ю., Гусев М. А., Левагин Е. Ю. Заявл. 17.09.2012. Опубл. 20.02.2014.
4. Olasolo M., Uranga P., Rodriguez-Ibabe J.M., Lopez B. Effect of austenite microstructure and cooling rate on transformation characteristics in a low carbon Nb–V microalloyed steel// *Materials Science and Engineering A* – 2011. – V. 528. – P. 2559–2569.
5. Miao C. L., Shang C. J., Zhang G. D., Subramanian S.V. Recrystallization and strain accumulation behaviors of high Nb-bearing line pipe steel in plate and strip rolling // *Materials Science and Engineering A.* – 2010. – V. 527 – P. 4985–4992.
6. Коротовская С. В., Орлов В. В., Хлусова Е. И. Влияние дробности деформации на формирование ультрамелкозернистой структуры в низкоуглеродистой структуры в низкоуглеродистых низколегированных сталях // *Металлург.* – 2013. – № 11. – С. 78–82.
7. Perttula J. S., Karjalainen L. P. Recrystallization in austenite measured by double compression and stress relaxation methods // *Materials Science Technologies.* – 1998. – N 14. – P. 626–630.
8. Takayama N., Miyamoto G., Furuhashi T. Effects of transformation temperature on variant pairing of bainitic ferrite in low carbon steel // *Acta Materialia.* – 2012. – V. 60. – P. 2387–2396.
9. Зисман А. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. Построение и использование карт структурных изменений при горячей деформации аустенита низкоуглеродистой стали 09ХН2МДФ для оптимизации промышленных технологий // *Вопросы материаловедения.* – 2013. – №1 (73). – С.37–48.
10. Золоторевский Н. Ю., Зисман А. А., Панпурин С. Н., Титовец Ю. Ф., Голосиенко С. А., Хлусова Е.И. Влияние размера зерна и деформационной субструктуры аустенита на кристаллогео-

УДК 621.785.5:669.14.018.25

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА БОРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ

Т. В. ЕМЕЛЬЯНОВА¹, В. И. ГРЫЗУНОВ², д-р хим. наук

¹АО «МК ОРМЕТО-ЮУМЗ», 462403, Оренбургская обл., Орск, пр. Мира, 12,
E-mail: ormeto@tmail.org.ru

²Орский гуманитарно-технологический институт (филиал ФГБОУ ВО ОГУ),
Орск, пр. Мира, 15а

Статья поступила 22.06.2017

Исследована эффективность применения процесса термоциклического борирования для упрочнения сталей, предназначенных для изготовления штампового инструмента. Установлено значительное повышение микротвердости и износостойкости. Металлографическими методами определена глубина боридного слоя, его структура.

Ключевые слова: штамповая сталь, борирование, температура, слой, микротвердость, износостойкость, диффузия, термоциклирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г. В. Борисенок, Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин и др. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Гурьев А. М., Лыгденов Б. Д., Иванов С. Г., Власова О. А., Кошелева Е. А., Гурьев М. А., Земляков С. А. Новый способ диффузионного термоциклического упрочнения поверхностей железоуглеродистых сплавов // Ползуновский альманах. – № 3. – 2008. – С. 10–16.
3. Малькова Н. Ю., Гурьев А. М., Злобин А. М. Выбор оптимальных режимов диффузионного борирования стали 20ХЛ // Ползуновский альманах. – 2008. – № 3. – С. 223–225.
4. Kulka M., Pertek A., Klimek L. The influence of carbon content in the borided Fe-alloys on the micro-structure of iron borides // Materials Characterization. – 2006. – Т. 56, № 3. – С. 232–240.
5. Нестеренко Е. А., Бартенкова Е. В. Диффузионное термоциклическое упрочнение поверхностей железоуглеродистых сплавов // Ползуновский альманах. – № 1. – 2010. – С. 201–204.
6. Гурьев М. А., Кошелева Е. А., Иванов С. Г. Оптимизация состава многокомпонентной насыщающей смеси на основе бора и хрома для поверхностного легирования сталей // Ползуновский альманах. – № 1. – 2010. – С. 131–135
7. Редькина Н. В. Разработка схем термоциклической обработки на примере сплава 44НХТЮ // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2013. – № 5 (102). – С. 358–361.

УДК 669.295:621.762:621.9.048.7

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СПЛАВА Ti–6Al–4V ПРИ ПОСЛОЙНОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ПЛАВЛЕНИИ И ГОРЯЧЕМ ИЗОСТАТИЧЕСКОМ ПРЕССОВАНИИ

Л. Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь,
Набережная Афанасия Никитина, 22. E-mail: common@tstu.tver.ru

Статья поступила 20 июня 2017

Методами оптической и растровой электронной микроскопии проведены исследования микроструктуры сплава Ti–6Al–4V, полученного по технологии селективного электронно-лучевого плавления. Показано, что синтезированный сплав находится в закаленном состоянии с неравновесной ($\alpha'+\beta$)-структурой. При последующем старении идет распад мартенсита по схеме $\alpha' \rightarrow (\alpha+\beta)$, что приводит к снижению микротвердости на ~130 МПа. После горячего изостатического прессования в сплаве происходит полная перекристаллизация, размер пластинок α - и β -фаз увеличивается примерно в 1,5 раза. Горячее изостатическое прессование не приводит к повышению плотности сплава, микротвердость повышается на ~100 МПа. При использовании технологии селективного электронно-лучевого плавления формируется структура сплава Ti–6Al–4V с высокой дисперсностью и плотностью.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное электронно-лучевое плавление, горячее изостатическое прессование, сплав титана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин А. А., Колачёв Б. А., Польшин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. – М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Металлография титановых сплавов / Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун и др. / Под ред.: С. Г. Глазунова, Б. А. Колачева. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
3. Логачев И. А. Исследование режима легирования и процесса плавки жаропрочного титанового сплава СТ6У с целью совершенствования технологии и повышения служебных характеристик готового изделия // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2014. – 145 с.
4. He W. W., Jia W. P., Liu H. Y., Tang H. P., Kang X. T., Huang Y. Research on preheating of titanium alloy powder in electron beam melting technology // Rare Metal Materials and Engineering. – 2011. – V. 40(12). – P. 2072–2075.
5. Li X., Wang C. T., Wang L., Zhang W. G., Li Y. C. Fabrication of bioactive titanium with controlled porous structure and cell culture in vitro // Rare Metal Materials and Engineering. – 2010. – N 39 (10). – P. 1697–1701.
6. Microstructure and mechanical properties of open-cellular biomaterials prototypes for total knee replacement implants fabricated by electron beam melting / L. E. Murr, K. N. Amato, S. J. Li et. al. // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2011. – V. 4. – P. 1396–1411.
7. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder fractions // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – V. 213. – P. 2109–2118.
8. Compression deformation behavior of Ti–6Al–4V alloy with cellular structures fabricated by electron beam melting / X. Y. Cheng, S. J. Li, L. E. Murr et. al. // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2012. – V. 16. – P. 153–162.
9. Evaluation of titanium alloy fabricated using electron beam melting system for dental applications / M. Koike, K. Martinez, L. Guo et. al. // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – V. 211. – P. 1400–1408.
10. Hrabec N., Quinn T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build plate and part size // Materials Science & Engineering A. – 2013. – V. 573. – P. 264–270.
11. Gaytan S. M., Murr L. E., Medina F., Martinez E., Lopez M. I., Wicker R. B. Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting // Materials Technology. – 2009. – V. 24. – P. 181–190.
12. Ahmed T., Rack H. J. Phase transformations during cooling in ($\alpha+\beta$)-titanium alloys / Materials Science and Engineering A. – 1998. – V. 243. – P. 206–211.
13. Safdar A., Wei L.-Y., Snis A., Lai Z. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti–6Al–4V // Materials characterization. – 2012. – V. 65. – P. 8–15.

14. Al-Bermani S. S., Blackmore M. L., Zhang W, Todd I. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V // Metall Mater Trans A. – 2010. – 41A. – P. 3422.
15. Соколов Ю. А., Афанасьева Л. Е., Барабонова И. А., Новоселова М. В., Гречишкин Р. М. Микроструктура и свойства сплава Ti-6Al-4V, полученного по технологии послойного электронно-лучевого синтеза // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2015. – № 6 (720). – С. 45–50.
16. Неруш С. В., Евгенов А. Г., Ермолаев А. С., Роголев А. М. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе для лазерной LMD наплавки // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 4 (76). – С.98–107.
17. Беккерт М., Клемм Х. М. Способы металлографического травления: Справ. изд. / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1988. – 400 с.
18. Якимов В. И., Паниван Г. Е., Муравьев В. И., Захарова Е. В., Куриный В. В. Влияние высокотемпературной газостатической обработки на структуру, механические свойства и надежность отливок из алюминиевых сплавов // Ученые записки КНАГТУ. – 2013. – № 4–1(16). – С. 67–74.
19. Белов А. Ф., Хаюров С. С. Повышение качества и надежности фасонных отливок путем высокотемпературной газостатической обработки // Авиационная промышленность. – 1986. – № 4. – С. 40–42.
20. Воробьева И. Ф., Копелиович Б. А., Хаюров С. С. Высокотемпературная газостатическая обработка литейных алюминиевых сплавов // Авиационная промышленность. – 1988. – № 7. – С. 63.

УДК 669.714:669.788

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВА 1417М НА СТРУКТУРУ И СОДЕРЖАНИЕ В НЕМ ВОДОРОДА

А. Б. ЛАПТЕВ¹, д-р техн. наук, М. В. ПЕРВУХИН², д-р техн. наук, Д. А. МОВЕНКО¹, канд. техн. наук, А. Н. АФАНАСЬЕВ-ХОДЫКИН¹, В. Н. ТИМОФЕЕВ², д-р техн. наук, И. А. ГАЛУШКА¹

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

²ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ), Красноярск, Свободный пр., 79

Статья поступила 24.05.2017

Разработан метод магнитогидродинамической обработки (МГДО) алюминиевых расплавов. Проведенными исследованиями показано, что индуцируемое в расплаве алюминиевого сплава 1417М электрическое поле изменяет концентрацию легирующих добавок и водорода в направлении вектора электрического поля. Анализ полученных результатов показал, что в индуцируемом при МГДО электрическом поле наблюдается изменение содержания легирующих элементов и водорода. Наличие градиента концентрации легирующих элементов и водорода по высоте слитка (параллельно вектору индуцируемого электрического поля) свидетельствует о перспективности выбранного направления исследований и о получении возможности повышения коррозионной стойкости поверхностного слоя за счет снижения содержания гетерогенных фаз и водорода при сохранении прочностных характеристик основного металла изделия.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, магнитогидродинамическая обработка, концентрация водорода, РЗМ.

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. Гончаренко Е. С., Трапезников А. В., Огородов Д. В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М. Б. Альтмана) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2014. – № 4. Ст.02 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.02.2017 г.). DOI:10.18577/2307-6046-2014-0-4-2-2.
3. Белов А. Ф. Алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 552 с.
4. Каблов Е. Н., Щетанов Б. В., Гращенков Д. В., Шавнев А. А., Няфкин А. Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 373–380.
5. Каблов Е. Н., Шевченко Ю. Н., Гриневич А. В. Проблемы паспортизации авиационных материалов на современном этапе // Авиационные материалы 75 лет. Избранные труды. – 2007. – С. 388–396.
6. Курс М. Г., Каримова С. А. Натурно-ускоренные испытания: особенности методики и способы оценки коррозионных характеристик алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № 1. – С. 51–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-51-57.
7. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах / Л. Б. Хохлатова, Н. И. Колобнев, В. В. Антипов. и др. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2013. – № 3. Ст. 04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 05.03.2017).
8. Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов в условиях, имитирующих факторы космического полета / Т. Г. Павловская, Е. А. Дешева, С. Н. Зайцев и др. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 3. Ст.11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 06.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-11-11.
9. Абрамов А. А., Тихомиров М. Д. Технологии получения качественных отливок из высокопрочных литейных алюминиевых сплавов // Литейное производство. – 2007. – № 5. – С.29–34.
10. Синявский В. С., Вальков В. Д., Калинин В. Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 368 с.
11. Fleming M. Solidification Processing (New York: McGraw-Hill, 1974).
12. Tiller W. A. The Science of Crystallization (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1991).
13. Лаптев А. Б., Рахимов С. Р., Латыпов О. Р., Тюсенков А. С., Ахияров Р. Ж., Бугай Д. Е. Электрохимический метод разделения водонефтяной эмульсии // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 3 (101). – С. 59–68.
14. Лаптев А. Б. Методы и агрегаты для магнитогидродинамической обработки водонефтяных сред. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Уфимский государственный нефтяной технический университет. Уфа, 2008. 48 с.
15. Альфвен Х. Космическая электродинамика. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1952. – 290 с.
16. Верте Л. А. Магнитная гидродинамика в металлургии. М.: Металлургия. 1975. 300 с.
17. Фрик П. Г. Магнитная гидродинамика: от галактик до проблем металлургии // Наука в России. – 2014. – № 5. – С. 4–10.
18. Klemp, D. Energetic states of positronium in liquids from the study of magnetic field effects and of spin conversion reactions // Chemical physics. – 1993. – V. 69, N 8. – P. 229.
19. Luck W. A. P., Klein D., Rangsriwatananon K. Anti-cooperativity of the two water OH groups // J. Mol. Struct. – 1997. – № 416. – P. 287–296.
20. Пат. 54035 РФ на полезную модель. Устройство для магнитной обработки жидкости / Лаптев А. Б., Черепашкин С. Е., Ахияров Р. Ж. Оpubл. 10.06.2006 // Бюл. № 16.

УДК 669.295:621.793:621.891:629.5

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В СУДОВОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Б. Г. УШАКОВ¹, канд. техн. наук, А. В. КОЧЕРГИН¹, С. А. ПЕРСИНИН², канд. хим. наук,
Л. Г. МАСХУЛИЯ², канд. техн. наук

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

² ООО НПП «МетКом», 173008, Великий Новгород, Сырковская ул., 21

Статья поступила 27.06.2017

Представлены результаты работ по выбору материалов покрытий, наносимых на поверхность узлов трения конструкций из титановых сплавов применительно к изделиям морской техники. Для титановых сплавов вследствие низких антифрикционных свойств и высокого коэффициента трения существует опасность появления задиров и возникновения холодной сварки в парах трения при высоких удельных давлениях.

Проблему применения титана в подвижных соединениях предлагается решить путем нанесения покрытий на поверхность титана различными методами и выбора антифрикционных материалов для пар трения.

Ключевые слова: титановые сплавы, антифрикционные покрытия, порошковые материалы, связка, детонационное напыление, плазменное напыление.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В., Ушков С. С., Хатунцев А. Н., Лошакова Н. И. Титановые сплавы для морской техники. – СПб.: Политехника, 2007. – 387 с.
2. Горынин И. В., Чечулин Б. Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990.
3. Schumacher W. Y. Tribol Offshore Pap. Semin. 10 may. – London: Bury St. Edmunds, 1985.
4. Цвиккер У. Титан и его сплавы. – М.: Metallургия, 1979.
5. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Кудрявцев А. С., Ушаков Б. Г., Титановые сплавы для морских конструкций и судового машиностроения // Технология легких сплавов. – 2014. – № 3. – С. 6–13.
6. Леонов В. П., Ушаков Б. Г., Кочергин А. В., Хромушкин К. Д. Титановые сплавы для резьбового крепежа в судовом машиностроении // Титан. – 2014. – № 3. – С. 72–76.
7. Медедяев И. А., Албагачиев А. Ю. Трение и износ деталей машин. – М.: Машиностроение, 2008. – 462 с.
8. Григорьянц А. Г., Фнтиков В. А., Третьяков Р. С.. Повышение качества поверхностных слоев деталей, полученных лазерной аддитивной технологией // Технология машиностроения. – 2015. – № 10. – С. 68–73
9. Прямое лазерное выращивание – перспективная аддитивная технология для авиадвигателестроения / Е. В. Земляков, О. Г. Климов, Г. А. Турин и др. // Сварка и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 54–57.
10. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шпис Г. И., Бемер З. М. Теория и технология азотирования. – М.: Metallургия, 1991.
11. Ловшенко Г. Ф. Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов: монография. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.
12. Русанов А. И. Термодинамические основы механохимии – СПб.: Наука, 2006. – 221 с.
13. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимические технологии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 342 с.

УДК 621.762.5:669.15

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТЬ СПЕЧЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩЕГО ПОРОШКА ЖЕЛЕЗА

П. А. ПОЛЯКОВ¹, Н. Б. ПУГАЧЕВА², д-р техн. наук, А. П. ПОЛЯКОВ¹, д-р техн. наук

¹ФГБУН «Институт машиноведения Уральского отделения РАН»,
620049, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

²ФГБОУ «Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России»,
620062, Екатеринбург, ул. Мира, 22

Статья поступила 20.03.2017

Исследовано влияние добавок порошков цинка, меди, фосфора и углерода на структурное состояние, фазовый и химический составы, твердость и прочность на сжатие спеченных композитов на основе ванадийсодержащего порошка железа. Показано, что характер изменения твердости по Бринеллю после спекания исследованных композиций обусловлен особенностями микроструктуры. Образцы с графитом характеризуются наиболее высокими значениями твердости, что связано с науглероживанием железной матрицы и формированием перлитной структуры в процессе спекания. В образцах с фосфором по границам матричных зерен формируется фосфидная эвтектика, что в ряде случаев приводит к их хрупкому разрушению при осевом сжатии.

Ключевые слова: порошок железа, испытание на сжатие, микроструктура, оксиды, эвтектика, твердость, прочность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриевский Р. А. Порошковое материаловедение. – М.: Металлургия, 1991. – 205 с.
2. Порошковая металлургия: материалы, технология, свойства, области применения: Справ. / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысльский и др. – Киев: Наукова думка, 1985. – 624 с.
3. Gundermann Ph. Overview of the status and trends in the European PM Industry. EURO PM 2015 REIMS. <http://www.europm.com/post-event/plenary-presentations/103-the-european-pm-industry-current-status-and-roadmapping-the-future/file> (accessed 11 November 2015).
4. Буланов В. Я., Рукавишникова Г. С. Порошковая металлургия в России // Вестник ОГУ. – 2003. – № 1. – С. 115–118.
5. Wittaker D. Production of Structural PM Parts // International Powder Metallurgy Directory & Yearbook. 11th Edition. – 2004/2005. – P. 31–47.
6. Акименко В. Б., Буланов В. Я., Гуляев И. А., Залазинский Г. Г., Калашникова О.Ю., Щенникова Т. Л., Анциферов В. Н. Состав, структура и свойства железных и легированных порошков. Екатеринбург: УИФ "Наука", 1996. 351с.
7. Металлы и сплавы. Справочник / В. К. Афонин, Б. С. Ермаков, Е. Л. Лебедев и др. / Под ред. Ю. П. Солнцева. – СПб.: Проффессионал, 2003. – 1062 с.
8. Höganäs Handbook for Sintered Components 2013.
9. Роман О. В., Габриелов И. П. Справочник по порошковой металлургии: порошки, материалы, процессы. – Минск, 1988. – 175с.
10. Поляков П. А., Колмыков В. Л., Поляков А. П. Исследование процесса прессования композиционных материалов на основе ванадийсодержащего порошка железа // КШП ОМД [Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением]. – 2013. – № 5. – С. 14–18.
11. Поляков П. А., Долматов А. В., Колмыков В. Л., Романова О. В., Захаров М. Н. Влияние спекания на прочность порошковых композиций на основе железа. // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2017. – № 1. – С. 13–23.
12. Савинцев П. П., Рябова Р. Ф. Влияние размера частиц распыленных железных порошков и давления формования на свойства порошковых материалов. // Физика и химия обработки материалов. – 2004. – № 2. – С. 78–83.

13. Chaurasia S. K., Prakash U., Misra P. S., Chandra K. Development of P/M Fe–P soft magnetic materials // Bull. Mater. Sci. – 2012. – V. 35, N 2. – P. 191–196.

14. Оглезнева С. А., Михайлов А. О., Зубко И. Ю. Влияние углерода на формирование структуры при механическом легировании и спекании порошковых сталей. // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2008. – № 1. – С. 9–16.

УДК 620.194.3:620.193.4

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ НИКЕЛЬ-ФОСФОРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ФРЕТТИНГЕ

И. Р. АСЛАНЯН, д-р техн. наук

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

Статья поступила 24.04.2017, в окончательной редакции – 1 06.2017

Проведены исследования фреттинг-коррозии в растворе NaCl электролитических NiP покрытий с упрочняющими добавками SiC. Потенциостатические исследования фреттинг-коррозии покрытий подтвердили наличие химической составляющей изнашивания в связи с удалением поверхностной пассивирующей пленки и анодным растворением с образованием питтингов. Показано, что в области активного растворения коррозионная стойкость поверхности трения NiP и NiP–SiC покрытий определяется уровнем остаточных напряжений и однородностью поверхности. Введение карбида кремния в NiP покрытия при фреттинг-коррозии приводит к увеличению числа питтингов, но они расположены равномерно по поверхности трения и не имеют множественного характера.

Ключевые слова: покрытия, трение, изнашивание, фреттинг-коррозия, оксиды.

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. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. – 2012. – № 11. – С. 16–21.

3. 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.

4. Kablov E. N., Muboyadzhyan S. A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTES // Russian metallurgy (Metally). – 2012. – V. 2012. – № 1. – P. 1–7.

5. 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.

6. Каблов Е. Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. – 2012. – № 3. – С. 10–15.

7. Каблов Е. Н., Мубояджян С. А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Металлы. – 2012. – № 1. – С. 5–13.

8. 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.

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

10. Мубояджян С. А., Галоян А. Г. Комплексные термодиффузионные жаростойкие покрытия для безуглеродистых жаропрочных сплавов на никелевой основе // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 3. – С. 25–30.

11. Каблов Е. Н., Мубояджян С. А., Будиновский С. А., Луценко А. Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Металлы*. – 2007. – № 5. – С. 23–34.
12. Aslanyan I. R., Bonino J.-P., Celis J.-P. Effect of reinforcing submicron SiC particle on the wear of electrolytic NiP coatings. Part 1: Uni-directional sliding // *Surface and Coatings Technologies*. – 2006. – V. 200. – P. 2909–2916.
13. 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.
14. Aslanyan I. R., Bonino J.-P., Celis J.-P. Effect of reinforcing submicron SiC particles on the wear of electrolytic NiP coatings. Part 2: Bi-directional sliding // *Surface and Coatings Technologies* 2006. – V. 201. – P. 581 – 589.
15. Асланян И. Р. Влияние внешних и внутренних факторов на износ никель-фосфорных покрытий // *Вопросы материаловедения*. – 2017. – № 1(89). – С. 130–139.

УДК 621.762.22:669.14.018.8'786

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКА СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ СТАЛИ МЕТОДАМИ МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ПЛАЗМЕННОЙ СФЕРОИДИЗАЦИИ

Н. Г. РАЗУМОВ, канд. техн. наук, А. А. ПОПОВИЧ, д-р техн. наук

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

Статья поступила 2.05.2017

Представлены результаты экспериментальных исследований по обработке в потоке термической плазмы порошков высокопрочной коррозионно-стойкой стали Fe–23Cr–11Mn–1N, полученных с помощью механического легирования. Выполненные работы показали принципиальную возможность получения порошков сферической формы для использования их в аддитивных технологиях. Установлено, что поверхность получаемых частиц после сфероидизации является неровной и отображает литую структуру материала. При этом в частице порошка сохраняется практически равномерное распределение элементов, но часть азота уходит из сплава. Скорость потери азота зависит от размера исходных частиц.

Ключевые слова: высокоазотистая сталь, механическое легирование, плазменная сфероидизация, сферический порошок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тонышева О. А., Вознесенская Н. М., Елисеев Э. А., Шалькевич А. Б. Исследование новой высокопрочной экономнолегированной азотосодержащей стали повышенной надежности // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. – 2011. – № SP2. – С. 131–136.
2. Братухин А. Г., Демченко О. Ф., Долженков Н. Н., Кривоногов Г. С. Высокопрочные коррозионно-стойкие стали современной авиации. – М.: МАИ, 2006. – 401 с.
3. Тонышева О. А., Вознесенская Н. М. Перспективные высокопрочные коррозионностойкие стали, легированные азотом (сравнительный анализ) // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № 3 (32). – С. 27–32.
4. Костина М. В., Банных О. А., Блинов В. М. Особенности сталей легированных азотом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2000. – № 12. – С. 3–6.
5. Влияние термической обработки на структурные превращения и свойства высокоазотистых сталей / В. М. Блинов, А. В. Елистратов, А. Г. Колесников и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2000. – № 6. – С. 19–24.
6. Frazier W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2014. – V. 23, N 6. – P. 1917–1928.

7. Wohlers T. Wohlers Report 2014: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry // Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates Inc., 2014. – 275 p.
8. Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G // Journal of Aerospace Engineering. – 2015. – V. 229, N 11. – P. 2132–2147.
9. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C., Wang C., Shin Y., Zhang S., Zavattieri P. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering // Computer-Aided Design. – 2015. – V. 69. – P. 65–89.
10. Зленко М. А., Попович А. А., Мутьлина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 222 с.
11. Al-Jouhori A. A., Suryanarayana C. Synthesis of austenitic stainless steel powder alloys by mechanical alloying // Journal of Materials Science. – 2017. – V. 50, N 20. – P. 11919–11932.
12. Гюлиханданов Е. Л., Попович А. А., Разумов Н. Г., Силян А. О. Механохимический синтез высоколегированных порошковых сплавов системы Fe–Cr–Ni–Mn–N // Известия высших учебных заведений // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2012. – № 1. – С. 18–22.
13. Попович А. А., Разумов Н. Г. Исследование процесса механического легирования железа аустенитообразующими элементами // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – № 10 (712). – С. 53–59.
14. Зверев С. Г. Разработка и исследование высокочастотной плазменной установки для обработки тугоплавких дисперсных материалов // Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. – СПб., СПбГПУ, 2002.
15. Патент РФ № 2311225. Плазменная установка для получения нанодисперсных порошков / Н. В. Алексеев, А. В. Самохин, Ю. В. Цветков. – Приоритет от 27.11.2007.
16. Chaturvedi V., Ananthapadmanabhan P. V., Chakravarthy Y., Bhandari S., Tiwari N., Pragatheeswaran A., Das A. K. Thermal plasma spheroidization of aluminum oxide and characterization of the spheroidized alumina powder // Ceramics International. – 2014. – V. 40, N 6. – P. 8273–8279.
17. Kumar S., Selvarajan V. Plasma spheroidization of iron powders in a non-transferred DC thermal plasma jet // Materials Characterization. – 2008. – V. 59, N 6. – P. 781–785.
18. Yang S., Gwak J.-N., Lim T.-S., Kim Y.-J., Yun J.-Y. Preparation of spherical titanium powders from polygonal titanium hydride powders by radio frequency plasma treatment // Materials Transactions. – 2013. – V. 54, N 12. – P. 2313–2316.
19. Zhu H. L., Tong H. H., Yang F. Z., Wang Q., Cheng C. M. A comparative study on radio-frequency thermal plasma spheroidization for two types of alumina ceramic powder // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 1058. – P. 221–225.
20. Tong J. B., Lu X., Liu C.C., Wang L.N., Qu X.H. Fabrication of micro-fine spherical high Nb containing TiAl alloy powder based on reaction synthesis and RF plasma spheroidization // Powder Technology. – 2015. – V. 283. – P. 9–15.

УДК 678.067:621.822

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ СЕВЕРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

А. В. АНИСИМОВ, д-р техн. наук, В. Е. БАХАРЕВА, д-р техн. наук,
И. В. НИКИТИНА, канд. хим. наук, А. С. САВЕЛОВ, канд. техн. наук

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

Статья поступила 13.04.2017

Дальнейшее экономическое развитие Арктической зоны России требует создания техники, машин и механизмов, работоспособных в условиях Арктики и Крайнего Севера. Надежность работы такой техники в большой степени зависит от работоспособности узлов трения в экстремальных природно-климатических условиях. Наиболее перспективны для такого применения фторопласты и углепластики, модифицированные фторопластами на различных уровнях модификации.

Ключевые слова: фторопласты, антифрикционные углепластики, модификация фторопластами, узел трения, северное исполнение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития арктической зоны российской федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года/ Интернет-ресурс: https://mines.gov-murman.ru/activities/strat_plan/arkticzone/

2. Большаков А. М., Захарова М. И.. Научно-технические основы риск-анализа объектов нефтехимии в арктической зоне // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 6. – С.36–39.

3. Бахарева В. Е., Николаев Г. И. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: Справочник/ Под ред. И. В. Горынина, А. С. Орыщенко. – СПб: Профессионал, 2012. – 916 с.

4. Фторопласты. Интернет ресурс <http://polimerinfo.com/ftoroplast/primenenie-ftoroplasta.html>

5. Интернет ресурс <http://www.himhelp.ru/section30/section124enciklopedia/654.html>

6. Технология полимерных материалов: Учебное пособие / А. Ф. Николаев, В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, Э. С. Шульгина, Н. А. Лавров, И. М. Дворко, Е. В. Сивцов, Ю. В. Крыжановская, А. Д. Семенова. – СПб.: Изд-во Профессия, 2008. – 544 с.)

7. Интернет ресурс <http://www.polymerbranch.com/catalogp/view/10.html&viewinfo>

8. Бузник В. М., Юрков Г. Ю. Применение фторполимерных материалов в трибологии: состояние и перспективы // Вопросы материаловедения. – № 4(72) . – 2012. – С. 133–149.

9. Sawyer W. G., Freudenberg K. D., Bhimaraj P., Schadler L. S.. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles // Wear. – 2003. – N 254. – P. 573–580.

10. Wieleba W. The statistical correlation of the coefficient of friction and wear rate of PTFE composites with steel counterface roughness and hardness // Wear. – N 252. – P. 719–729.

11. Бейдер Э. Я, Донской А. А., Железина Г. Ф., Кондрашов Э. К., Сытый Ю. В., Сурнин Е. Г. Опыт применения фторполимерных материалов в авиационной технике // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). – 2008. – Т. LII, № 3. – С. 30–44.

12. Хатипов С. А., Серов С. А., Садовская Н. В. Новый класс износостойких материалов, полученных радиационной модификацией политетрафторэтилена в расплаве // Вопросы материаловедения, № 4 (72). – 2012. – С. 191–202.

13. Рыбин В. В., Бахарева В. Е., Николаев Г. И., Анисимов А. В. Антифрикционные углепластики в машиностроении // Вопросы материаловедения. – 2006. – №1(45) . – С. 178–190.

14. Бахарева В. Е., Орыщенко А. С. Углепластики для деталей узлов трения оборудования, работающего в условиях Арктики и Крайнего Севера. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2017. – 262 с.

15. Бахарева В. Е., Николаев Г. И., Анисимов А. В. Улучшение функциональных свойств антифрикционных полимерных композитов для узлов трения скольжения // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). – 2009. – Т. LIII, № 4. – С.4–19.

16. Lancaster S. K. Polymer-based bearing materials. The role of fillers and fiber reinforcement // Tribology. – 1972. – P. 249–255/

17. Klingshirn C., Koizumi M., Hauptert F., Giertsch H., Friedrich K. Structure and wear of centrifuged epoxy-resin/carbon fiber functionally graded materials. Journal of materials science letters. 2000. – N 19. – P. 263– 266.

18. Tsotra P., Friedrich K. Electrical and mechanical properties of functionally graded epoxy-resin/carbon fiber composites // *Composites: Part A*. – 2003. – N 34. – P. 75–82.
19. Shivakumar K. N., Swaminathan G., Sharpe M. Carbon/vinyl ester composites for enhanced performance in marine applications // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2006. – N 25. – P. 1101–1116.
20. Бахарева В. Е., Анисимов А. В., Блышко И. В., Савелов А. С. Модификация терморезистивных антифрикционных углепластиков // *Вопросы материаловедения*. – 2012. – № 4(72). – С. 66–80.
21. Горячева И. Г. Математическое моделирование фрикционного взаимодействия деформируемых тел // *Вопросы материаловедения*. – 2012. – № 4(72). – С. 34–45.
22. Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Рыбин В. В. Модификация антифрикционных полимерных композиционных материалов на различных масштабных уровнях // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 1(57). – С. 9–16.
23. Бахарева В. Е., Анисимов А. В., Савелов А. С., Пеклер К. В., Ильин С. Я., Моркин О. В. Создание макромоодифицированных фторопластом углепластиков для подшипников скольжения рабочих колес поворотных лопастных гидротурбин // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 1(57). – С. 17–25.
24. Патент РФ 2181128, Антифрикционная наполненная композиция и способ ее получения/ Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Лобынцева И. В., Савелов А. С., Пеклер К. В., Демьянов А., Ильин И. Я., Моркин О. В., Цыганков С. А., 2002 / Бюлл. № 10. – 2004.
25. Рубин М. Б., Бахарева В. Е. Подшипники в судовой технике. Справочник. – Л.: Судостроение, 1987. – 344 с.
26. Лысенков М. П. Технологичность неметаллических подшипников коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 1(57). – С. 181–185.
27. Степанов Б. П. Создание углепластиковых подшипников судовых валопроводов // *Вопросы материаловедения*. – 2003. – № 3(355). – С. 16–24.
28. Бахарева В. Е., Анисимов А. В., Лобынцева И. В., Савелов А. С. Макромоодификация антифрикционных углепластиков фторопластом – эффективный путь снижения коэффициента трения // *Вопросы материаловедения*. – 2012. – № 4(72). – С. 81–88.
29. Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Савелов А. С. Исследование морфологии поверхности трения и механизма макромоодификации углепластиков фторопластом // *Вопросы материаловедения*. – № 4 (72). – 2012. – С. 89–92.
30. Бахарева В. Е., Анисимов А. В., Ильин С. Я., Моркин О. В., Пеклер К. В. Стендовые триботехнические испытания антифрикционного макромоодифицированного фторопластом углепластика УГЭТ-МФ для узлов трения гидротурбин // *Вопросы материаловедения*. – 2012. – № 4(72). – С. 93–97.
31. Добычин М. Н., Курбаткин И. Н., Морозов А. В., Никулин А. В., Сачек Б. Я., Савелов А. С., Анисимов А. В. Исследование углепластиков, макромоодифицированных фторопластом // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 1 (57). – С.26–32.

УДК 678.743.41:621.891

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА С ДИОКСИДОМ ТИТАНА

А. Л. ФЕДОРОВ¹, канд. техн. наук, А. А. ДЪЯКОНОВ², У. Р. ЛУГИНОВА²

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

²ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова. Институт естественных наук, Якутск, ул. Кулаковского, 48

Статья поступила 28.03.2017, в окончательной редакции – 1.06.2017

Представлены результаты исследования триботехнических свойств полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена с использованием в качестве наполнителя диоксида титана TiO_2 , а также влияния этих свойств на формирование поверхностной структуры композита в зоне трения. Показано, что на поверхности трения композитов формируется слой, образованный из частиц наполнителя, которые прочно удерживаются благодаря химическому взаимодействию между образующимися из самого полимера в процессе трибохимических превращений перфторкарбоновыми кислотами. В результате реакции TiO_2 с перфторкарбоновыми кислотами образуются соли перфторкарбоневой кислоты, от концентрации которых на поверхности трения зависит износостойкость композита.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, диоксид титана, соли перфторкарбоновых кислот, ИК-спектроскопия, растровая электронная микроскопия, поверхность трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Makinson K. R., Tabor D. The friction and transfer of polytetrafluoroethylene // Proc. R. Soc. London, Part A: Math. Phys. Eng. Sci. – 1964. – V. 281 (1384). – P. 49–61.
2. Blanchet T. A. Kennedy F. E. Sliding wear mechanism of polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE composites // Wear. – 1992. – V. 153 (1). – P. 229–243.
3. Gong D.; Xue Q.; Wang H. Study of the wear of filled polytetrafluoroethylene composite // Wear. – 1989. – V. 134. – P. 283–295.
4. Tanaka K.; Uchiyama Y.; Toyooka S. The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene // Wear. – 1973. – V. 23 (2). – P. 153–172.
5. Адерица В. Н., Шаповалов В. А., Плескачевский Ю. М. Прочностные свойства, структура и износостойкость композитов ПТФЭ – технический углерод // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 2. – С. 160–168.
6. Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Васильев А. П. Исследование влияния оксида алюминия на структуру и свойства ПТФЭ // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – С. 2557–2562.
7. Парникова А. Г., Охлопкова А. А. Влияние наноструктурных оксидов алюминия и магния на закономерности формирования структуры ПКМ на основе ПТФЭ // Вестник СВФУ. – 2010. – Т. 7, № 4. – С. 47–52.
8. Машков Ю. К., Косаренко Р. И., Чемисенко О. В., Макиенко В. А. Влияние наноразмерных модификаторов на структуру и триботехнические свойства ПТФЭ-композитов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2005. – № 2. – С. 114–118.
9. McElwain S. E.; Blanchet T. A.; Schadler L. S.; Sawyer W. G. Effect of particle size on the wear resistance of alumina-filled PTFE micro- and nanocomposites // Tribol. Trans. – 2008, 51, 247–253.
10. Pitenis A. A.; Harris K. L.; Junk C. P.; Blackman G. S.; Sawyer W. G.; Krick B. A. Ultralow wear PTFE and alumina composites: It is all about tribochemistry // Tribol. Lett. – 2015. – V. 57.
11. Harris K. L.; Pitenis A. A.; Sawyer W. G.; Krick B. A.; Blackman G. S.; Kasprzak D. J.; Junk C. P. PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of protective surface films // Macromol. – 2015. – V. 48. – P. 3739–3745.
12. Sidebottom M. A., Pitenis A. A., Junk C. P., Kasprzak D. J., Blackman G. S., Burch H. E., Harris K. L., Sawyer W. G., Krick B. A. Ultralow wear Perfluoroalkoxy (PFA) and alumina composites // Wear 2016, 362–363, 179–185.
13. Breiby D. W., Sølling T. I., Bunk O., Nyberg R. B., Norrman K., Nielsen M. M. Structural Surprises in Friction-Deposited Films of Poly(tetrafluoroethylene). Macromol. 2005, 38, 2383–2390.
14. Krick B. A., Pitenis A. A., Harris K. L., Junk C. P., Sawyer W. G., Brown S. C., Rosenfeld H. D., Kasprzak D. J., Johnson R. S., Chan C. D., Blackman G. S. Ultralow wear fluoropolymer composites: Nanoscale functionality from microscale fillers // Tribology International. – 2016. – V. 95. – P. 245–255.
15. Diebold U. The surface science of titanium dioxide // Surface Science Reports. – 2003. – V. 48 – P. 53–229.

УДК 678.067:629.76

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

В. В. МАХСИДОВ, канд. техн. наук, В. А. РЕЗНИКОВ, Р. Р. МУХАМЕТОВ, канд. техн. наук,
М. С. ДОРИОМЕДОВ, канд. техн. наук

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

Статья поступила 6.04.2017

За последнее время объем применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в аэрокосмической отрасли значительно возрос и продолжает увеличиваться. Главные причины этого – низкая плотность ПКМ и их высокая прочность. Стремление максимально снизить массу изделия и одновременно создать более надежную конструкцию привело материаловедов к идее реализовать необходимый функционал в самом материале. Появление в материаловедении несколько десятилетий назад нового понятия «интеллектуальный материал» предопределило развитие материаловедения на последующее столетие, а это выдвигает качественно новые задачи и требует принципиально новых методов их решения. Первыми такими материалами были металлические сплавы с памятью формы, но они не могли быть использованы в аэрокосмических изделиях из-за большого веса. Разработанные вскоре после этого материалы с памятью формы на основе различных полимеров обладали большим набором функций в части памяти состояния, были значительно легче и их можно было изготавливать разнообразными методами. В настоящей работе представлены концепции развития интеллектуальных материалов в Японии, США, России и показано их применение в аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: полимеры с памятью формы, «интеллектуальный» материал, полимерный композиционный материал, углепластик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. – 2002. – Т. 72, № 1. – С. 3-12.
2. Каблов Е. Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. – 2010. – № 4. – С. 2–7.
3. Серебренникова Н. Ю., Антипов В. В., Сенаторова О. Г., Ерасов В. С., Каширин В. В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминийлитиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – №3 (36). – С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8.
4. Дориомедов М. С., Дасковский М. И., Скрипачев С. Ю., Шеин Е. А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 7. Ст. 12 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.11.2016 г.).
5. Петров А. В., Дориомедов М. С., Скрипачев С. Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов. Обзор. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2015. – № 8. – Ст.09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 26.02.2016 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-9-9.
6. Гуляев И. Н., Гуняев Г. М., Раскутин А. Е. Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 242–253.
7. Голубкова Т. А., Короткова В. И., Золкина Т. Г., Гладышева Л. В. Концепция и основные принципы конструирования «интеллектуальных материалов» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.viam.ru/public/files/1994/1994-201678.pdf> (дата обращения: 09.02.2016).
8. Techno Japan. – 1993. – V. 26, N 9. – P. 8–27.
9. Aerospace America. – 1990. – V. 28, N 3. – P. 30–34.
10. Techno Japan. – 1994. – V. 27, N 5. – P. 64–65.
11. Махсидов В. В., Яковлев Н. О., Ильичев А. В., Шиёнок А. М., Фирсов Л. Л. Определение деформации материала конструкции из ПКМ с помощью интегрированных оптоволоконных сенсоров // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2016. – Т. 22, №3. – С. 402–413.

12. Takeda N., Tajima N., Sakurai T., Kishi T. Recent advances in composite fuselage demonstration program for damage and health monitoring in Japan // *Structural control and health monitoring*. – 2005. – V. 12. – P. 245–255.
13. Михайлов В. П., Селиваненко А. С., Базиненков А. М. Платформы для активной виброизоляции на основе магнитореологических эластомеров // *Вестник машиностроения*. – 2015. – № 4. – С. 28–31.
14. Meng H., Mohamadian H., Stubblefield M., Jerro D., Ibekwe S., Pang S., Li G. Various shape memory effects of stimuli-responsive shape memory polymers // *Smart Materials and structures*. – 2013. – V. 22. DOI: 10.1088/0964-1726/22/9/093001.
15. Chung T., Romo-Urbe A., Mather P. Two-way reversible shape memory in a semicrystalline network // *Macromolecules*. – 2008. – V. 41. – P. 184–192.
16. White T., Tabiryani N., Tondiglia V., Serak S., Hrozhyk V., Vaia R., Bunning T. High frequency photodriven polymer oscillator // *Soft Matter*. – 2008. – № 4. – P. 1796–1798
17. Beavers F. L., Munshi N. A., Lake M. S., Maji A., Carpenter B., Rawal S., Qassim K. Design and testing of an elastic memory composite deployment hinge for spacecraft // *Proc. of 43th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, 2002. DOI: 10.2514/6.2002-1452.
18. Tupper M., Munshi N., Beavers F., Gall K., Mikulas M., Meink T. Development in elastic memory composite materials for spacecraft structures // *IEEE Aerospace Conf. Proc.* – 2001. – V. 5. – P. 2541–2547. DOI: 10.1109/AERO.2001.931215.
19. Keller P. N., Lake M. S., Francis W., Barrett R., Wintergerst J., Harvey J., Ruhl E., Winter J., Scherbarch M. R. Murphey T. W. Development of a deployable boom for microsatellites using elastic memory composite material // *Proc. of 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, 2004. DOI: 10.2514/6.2004-1603.
20. Fetchko P., Sellers J. J., Spanjers G., Scherbarth M., Winters J., Barrett R., Lake M. S., Keller P. N. Deployment optimization of a boom for FalconSAT-3 using elastic memory materials // *Proc. of 18th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*. 2004.
21. Barrett R., Taylor R., Keller P. N., Codell D., Adams L. Deployable reflectors for small satellites // *Proc. of 21th Annual Conf. Small Satellites*. 2007.
22. Keller P. N., Lake M. S., Codell D., Barrett R., Taylor R., Schultz M. R. Development of elastic memory composite stiffeners for a flexible precision reflector // *Proc of 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf.* – 2006. – V. 10. – P. 6984–6994. DOI: 10.2514/6.2006-2179.
23. Hinkle J., Lin J., Kling D. Design and materials study of secondary structures in deployable planetary and space habitats // *Proc. of 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf.* 2011. DOI: 10.2514/6.2011-2024.
24. Cornerstone Research Group Inc.: офиц. сайт. URL: <http://www.crgpr.com/technology/portfolio/self-constructing-structures.html> (дата обращения: 09.02.2016).
25. Chen S. B., Chen Y. J., Feng N., Liu Y. J., Leng J. S. Experiment and analysis of morphing skin embedded with shape memory polymer composite tube // *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* – 2014. – V. 25. – P. 2052–2059. DOI: 10.1177/1045389X13517307.
26. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

УДК 678.742.2.046:621.891

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СОВМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВМПЭ

О. В. ГОГОЛЕВА, канд. техн. наук, П. Н. ПЕТРОВА, канд. техн. наук

Представлены результаты исследований по разработке перспективных полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), содержащих слоистый наполнитель. Показано, что высокоэнергетические методы воздействия на полимерные композиционные материалы на основе СВМПЭ обеспечивают активацию материалов и позволяют достичь значительного повышения уровня их механических и триботехнических свойств.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, вермикулит, структурообразование, механическая активация, совместная активация, ультразвуковое воздействие

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергеева Е. А., Букина Ю. А., Ибатуллина А. Р. Влияние плазменной обработки на физико-механические свойства волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 17, Т. 15. – С. 116–119.
2. Модификация сверхвысокомолекулярного полиэтилена методами высокоэнергетической обработки поверхности / С. В. Панин, Л. А. Корниенко, Т. Т. Пувадин и др. // Перспективные материалы. – 2011. – № 3. – С. 376–383.
3. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования / Е. Г. Селютин, Ю. Ю. Гаврилов, Е. Н. Воскресенская и др. // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – № 18. – С. 375–388.
4. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Гоголева О. В. Износостойкие композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для эксплуатации в экстремальных условиях // Материаловедение. – 2011. – № 9. – С. 10–13.
5. Охлопкова А. А., Никифоров Л. А., Гоголева О. В., Борисова Р. В. Модификация сверхвысокомолекулярного полиэтилена слоистыми глинами // Материаловедение. – 2014. – № 1. – С. 45–49.
6. Слепцова С. А., Кириллина Ю. В., Лазарева Н. Н., Макаров М. М. Разработка и исследование полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и слоистых силикатов // Вестник СВФУ. – 2015. – № 6 (50). – С. 95–104.
7. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
8. Краснов А. П., Грибова И. А., Чумаевская А. Н. Химическое строение полимеров и трибохимические превращения в полимерах и наполненных системах // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 2. – С. 258–279.
9. Сенатов Ф. С., Сенатова С. И., Горшенков М. В., Чердынцев В. В. Структура пленок СВМПЭ после облучения ускоренными тяжелыми ионами // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10046>
10. Краснов А. Л., Токарева Н. В., Попов В. К., Хоудл С., Морлей К., Афоничева О. В. Роль трибохимических процессов при трении сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного сереброорганическим соединением // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 1. – С. 72–76.
11. Panin S. V., Kornienko L. A., Nguen Suan T., Ivanova L. R., Poltaranin M. A., Shil'ko S. V. Wear Resistance of Composites Based on Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Filled with Graphite and Molybdenum Disulfide Microparticles // Journal of Friction and Wear. – 2014. – V. 35, N 4. – P. 290–296.

УДК 678.7.046

ПОЛИМЕР-ПОЛИМЕРНЫЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА И НОВОЛАЧНОЙ СМОЛЫ

В. Н. КОРНОПОЛЬЦЕВ, канд. техн. наук, Д. М. МОГНОНОВ, д-р хим. наук,
О. Ж. АЮРОВА, канд. техн. наук

ФГБУН «Байкальский институт природопользования» СО РАН, 670047, Улан-Удэ,
Республика Бурятия, ул. Сахьяновой, 6, E-mail: info@binm.bsnet.ru

Статья поступила 28.04.2017

Исследовано взаимодействие бутадиен-нитрильного каучука с новолачной смолой, отвержденной динитрилом, предложен способ получения композитов с твердосмазочным наполнителем в виде коксо-графитовой смеси. Приведены результаты физико-механических и триботехнических лабораторных и производственных испытаний разработанных композитов. Эксплуатационный ресурс узлов трения погружных насосов водоподъема благодаря применению упрочненной технической резины увеличен в 2,5–3,0 раза.

Ключевые слова: полимер-полимерные смеси, бутадиен-нитрильный каучук, новолачная смола, коксографитовая смесь, триботехнические свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулезнев В. Н. Смеси полимеров. – М.: Химия, 1980. – 304 с.
2. Ньюмен С., Пол Д. Полимерные смеси. В 2 т. / Пер. с англ. Ю. К. Годовского, А. П. Коробко. Т. 2. – М.: Мир, 1981. – 453 с.
3. Ленская Е. В., Жейвот В. И., Могнонов Д. М. Термодинамические и адсорбционные свойства полувзаимопроникающих полимерных сеток на основе полибензимидазолов и полиаминоимидной смолы // Изв. АН. Сер. хим. – 2003. – Т. 52, № 5. – С. 1025–1034.
4. Девирц Э. А. Бутадиен-нитрильные каучуки: свойства и применение. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1972. – 128 с.
5. Шварц А. Г., Гинзбург Б. Н. Совмещение каучуков с пластиками и синтетическими смолами. – М.: Химия, 1972. – 224 с.
6. Бурдуковский В. Ф., Могнонов Д. М. Взаимодействие новолачной смолы с ароматическими динитрилами // Журнал прикладной химии. – 2011. – Т. 84, № 6. – С. 1044–1046.
7. Патент 2440373 РФ. МПК С08G 8/10, С08К 5/16, С08К 3/10 / Способ отверждения новолачной смолы / Бурдуковский В. Ф., Могнонов Д. М., Шурыгин Р. С. 20.01.2012 // Бюл № 2.

УДК 678.7:620.178.311.6

ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ «ЖЕСТКОГО» ТИПА

В. Л. ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук, В. Ю. КОСУЛЬНИКОВ, П. В. СЕРЫЙ, канд. техн. наук,
Н. Н. ВАСИЛЬЕВА, А. А. ЛОГУНОВА

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

Статья поступила 25.05.2017

Исследованы температурно-частотные зависимости коэффициентов механических потерь и модулей упругости полимерных материалов, позволившие рассчитать эффективность вибропоглощающих покрытий на подложках из металлов и «жестких» композитов в заданных условиях эксплуатации.

Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных для различных составов вибропоглощающих материалов. Исследования выполнены с применением полимерных композиций на основе модифицированных эпоксидных смол и армирующих наполнителей.

Ключевые слова: вибропоглощающие покрытия, коэффициент механических потерь, модуль упругости,

ЛИТЕРАТУРА

1. ASTM international. E 756–98(04). Standart test method for measuring vibration-damping properties of materials. USA, 2004.
2. Справочник по технической акустике / Пер. с нем. / Под ред. М. Хекла и Х. А. Мюллера. – Л.: Судостроение, 1980.
3. Армашев К. И., Паршина Л. В., Ярцев Б. А. Диссипативные свойства неоднородных композитных структур // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2016. – Вып. 94(378). – С. 47–64.
4. Иванов. Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. – М.: Университетская книга. Логос, 2008.
5. Алексеев С. П., Казаков А. М., Колотилов Н. Н. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1970.
6. Пелех Б. Л., Саяк Б. И. Экспериментальные методы исследования динамических свойств композиционных структур.– Киев: Наукова Думка, 1990.
7. Эластомерные и композиционные материалы в шумопоглощающих судовых конструкциях / А. В. Ионов и др. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2005.
8. Никифоров А. С., Будрин С. В. Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. – Л.: Судостроение, 1968.
9. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963.
10. Каргин В. А. Структура и механические свойства полимеров. – М.: Наука, 1979.
11. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. – М.: Наука, 1973.
12. Бартенев Г. М., Зеленев Ю. В. Физика и механика полимеров. – М.: Высшая школа, 1983.
13. Тагер А. А. Физикохимия полимеров. Изд. 4-е. – М.: Научный мир, 2007.

УДК 678.7.046:539.216.1

ПОЛИЭТИЛЕНОВЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПОВЕРХНОСТНО-МОДИФИЦИРОВАННЫМИ БАЗАЛЬТОВЫМИ И УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Е. С. ПЕТУХОВА, канд. техн. наук

ФГБУН «Институт проблем нефти и газа» Сибирского отделения РАН, 677007, Якутск,
ул. Автодорожная, 20, E-mail: inm@ysn.ru

Статья поступила 29.05.2017

Изложены результаты исследования дисперсно-армированных углеродным и базальтовым волокном полиэтиленовых композиционных материалов. Исследованы особенности строения поверхности волокон до и после поверхностной модификации. Показано, что обработка базальтовых волокон путем наращивания углеродных нановолокон на их поверхности не влияет на характеристики межфазного взаимодействия в системе полиэтилен/волокно и физико-механические свойства композитов. Установлено, что фторопластовый слой на поверхности углеродных волокон обеспечивает повышение прочности композита при разрыве за счет более полного смачивания волокна расплавом полимера, вызванного пониженной поверхностной энергией фторорганического слоя.

Ключевые слова: полиэтилен, углеродное волокно, базальтовое волокно, модификация поверхности, композит, структура, физико-механические характеристики, межфазное взаимодействие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленский Э. С., Куперман А. М., Горбаткина Ю. А., Иванова-Мумжиева В. Г., Берлин А. А. Армированные пластики – современные конструкционные материалы // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). – 2001. – Т. XLV, № 2. – С. 56–74.
2. Страхов И. С., Губанов А. А., Устинова М. С., Кривцов Д. И., Варшавский В. Я., Ваграмян Т. А., Коршак Ю. В. Химическая и электрохимическая обработка поверхности углеродного волокна // Физико-химия полимеров. Синтез, свойства, применение. – 2013. – № 19. – С. 277–282.
3. Zhang Q., Liu J., Sager R., Dai L., Baur J. Hierarchical composites of carbon nanotubes on carbon fiber: Influence of growth condition on fiber tensile properties // Composites Science and Technology. – 2009. – V. 69. – P. 594–601.
4. Gong Q.-J., Li H.-J., Wang X., Fu Q.-G., Wang Z.-w., Li K.-Z. In situ catalytic growth of carbon nanotubes on the surface of carbon cloth // Composites Science and Technology. – 2007. – V. 67. – P. 2986–2989.
5. Karab K. K., Rahaman A., Agnihotri P., Sathiyamoorthy D. Synthesis of Carbon Nanotubes on the Surface of Carbon Fiber/fabric by Catalytic Chemical Vapor Deposition and Their Characterization // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2009. – V. 17. – P. 209–229.
6. Rodriguez A. J., Guzman M. E., Lim C., Minaie B. Mechanical properties of carbon nano-fiber/fiber-reinforced hierarchical polymer composites manufactured with multiscale-reinforcement fabrics // Carbon. – 2011. – № 49. – P. 937–948.
7. Tzeng S. S., Hug K. H., Ko T. H. Growth of carbon nanofibers on activated carbon fiber fabrics // Carbon. – 2006. – № 44. – P. 859–865.
8. Lachman N., Wiesel E., Guzman de Villoria R., Wardle B. L., Wagner H. D. Interfacial load transfer in carbon nanotube/ceramic microfiber hybrid polymer composites // Composites Science and Technology. – 2012. – № 72. – P. 1416–1422.
9. Petukhova E. S., Krasnikova I. V. The effect of surface nanostructuring behavior of a fiber-reinforced polyethylene composite // AIP Conference Proceedings 1785, 030021 (2016); Doi: 10.1063/1.4967042. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4967042>
10. Petukhova E. S., Savvinova M. E., Krasnikova I. V., Mishakov I. V., Okhlopkova A. A., Jeong D.-Y., Cho J.-H. Reinforcement of Polyethylene Pipes with Carbon Microfibers // Journal of the Korean Chemical Society. – 2016. – V. 60, N 3. – P. 177–180.
11. Токарева И. В., Мишаков И. В., Ведягин А. А., Корнеев Д. В., Петухова Е. С., Саввинова М. Е. Модифицирование углеволокон для армирования трубного полиэтилена ПЭ80 // Композиты и наноструктуры. – 2014. – Т. 6, № 3. – С. 158–167.
12. Воропаев В. В., Струк В. А., Яроцкий В. Ю., Эйсымонт Е. И. Технологические аспекты получения волокнистых наполнителей для фторкомпозитов // Вестник Гродненского государственного университета им. Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2013. – № 3(158). – С. 54–62.
13. Прушак Д. А., Горбацевич Г. Н., Струк В. А. Технология модифицирования волокнистых наполнителей полимерных композиционных материалов // Материалы респ. науч.-техн. конф. «Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития». Гродно, Беларусь. – 2011. – С. 241.

14. Бабаев В. Б., Строкова В. В., Нелюбова В. В., Савгир Н. Л. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2013. – № 2. – С. 63–66.

15. Кнотько А. В., Путляев В. А., Гаршев А. В., Третьяков Ю. Д. Химические методы повышения коррозионной и термической стойкости базальтовых стекловолокон // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2007. – № 3. – С. 60–71.

16. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Васильев С. В., Гоголева О. В. Разработка базальтопластиков триботехнического назначения на основе ПТФЭ методом механоактивации // Вестник машиностроения. – 2016. – № 1. – С. 56–59.

17. Охлопкова А. А., Васильев С. В., Гоголева О. В. Разработка полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и базальтового волокна // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 6. – С. 404–410.

18. Кузьмин К. Л. Влияние химического состава и поверхностной модификации на механические свойства алюмосиликатных волокон // Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – М., 2017.

19. Серков А. Т. Вязкоупругие волокна. Гл. 7. – М.: Химия, 1980. – С. 215–221.

20. Углеродные волокна и углекомпози́ты / Пер. с англ. / Под ред. Э. Фитцера. – М.: Мир. – 1988. – Гл. 1. С. 85–91. (Carbon fibres and their composites. Edited by E. Fitzer, Springer-Verlag, Berlin, 1985. pp. 296).

УДК 678.067.2:661.666

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ТКАНЯМИ.

Часть 2. Механико-аналитическая модель структуры углеродной ткани

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

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна»
(СПГУТД). E-mail: primbm@mail.ru

Статья поступила 18.07.2017

Исследования посвящены разработке механико-аналитической модели структуры углеродной ткани. Модель позволяет рассчитать силу взаимного давления между основными и уточными нитями в области контактов; длины, прогибы, структурные углы и сжатие нитей; фазу строения; толщину структуры; линейное, поверхностное и объемное заполнение нитями; поверхностную и объемную пористость; поверхностную и объемную плотность.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Примаченко Б. М., Строкин К. О. Теоретические и экспериментальные исследования композиционных материалов, армированных углеродными тканями. Часть 1. Исследования области контакта углеродных нитей в тканой структуре // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 4(84). – С. 109–116.

2. Тимошенко С. П. Соппротивление материалов. Т. 1. – М.: Физматгиз, 1965. – 379 с.

3. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.

4. Примаченко Б. М. Исследование нелинейности дифференциального уравнения изгиба участка текстильной нити // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2005. – № 11. – С. 10–14.

5. Примаченко Б. М. Теоретическое исследование процесса приобоя уточной нити на ткацком станке // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2006. – № 12. – С. 56–64.

6. Кукин Г. Н., Соловьев А. Н., Кобляков А. И. Текстильное материаловедение (текстильные полотна и изделия). – М.: Легпромбытиздат, 1992. – 272 с.

УДК 621.039.531:669.15–194.56:539.4

ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ X18H9 И 08X16H11M3 С УЧЕТОМ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А. Г. ГУЛЕНКО¹, канд. техн. наук, Б. З. МАРГОЛИН¹, д-р техн. наук,
А. А. БУЧАТСКИЙ¹, канд. техн. наук, А. А. НУЖДОВ²

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

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

Статья поступила 5.06.2017

На основе анализа экспериментальных данных по длительной прочности необлученных аустенитных материалов и прогнозных зависимостей, полученных с помощью физико-механической модели межзеренного разрушения, определен коэффициент запаса для построения кривых длительной прочности материалов как в исходном, так и в облучаемом состояниях. На базе физико-механической модели и экспериментальных данных рассчитаны нормативные кривые для исходного и облучаемого состояний сталей X18H9 и 08X16H11M3. Нормативные кривые верифицированы на основе результатов испытаний.

Ключевые слова: ползучесть, длительная прочность и пластичность, расчетные кривые, внутривыпускные испытания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86. Госатомнадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Курсевич И. П., Бучатский А. А. Прогнозирование длительной прочности аустенитных материалов при нейтронном облучении // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2 (42). – С. 163–186.
3. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Курсевич И. П., Бучатский А. А. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 1. Физико-механическая модель // Проблемы прочности. – 2006. – № 3. – С. 5–22.
4. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Курсевич И. П., Бучатский А. А. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 2. Прогнозирование длительной прочности аустенитных материалов // Проблемы прочности. – 2006. – № 5. – С. 5–15.
5. Гуленко А. Г., Бучатский А. А., Марголин Б. З., Каштанов А. Д., Федорова В. А. Исследование скорости роста трещины в аустенитных сталях при длительном статическом нагружении в условиях ползучести // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2 (70). – С. 120–137.
6. Курсевич И. П., Марголин Б. З., Прокошев О. Ю., Кохонов В. И. Механические свойства аустенитных сталей при нейтронном облучении: влияние различных факторов // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 4(48). – С. 55–68.
7. Data sheets on the elevated temperature properties of 18Cr–8Ni stainless steel for boiler and heat exchanger seamless tubes (SUS 304H TB)/NRIM creep data sheets No. 4B. – National research institute for metals. – Tokyo, Japan, 1986. – 32 p.
8. Data sheets on the elevated temperature properties of 18Cr–12Ni–Mo stainless steel tubes for boiler and heat exchangers (SUS 316H TB)/NRIM creep data sheets No. 6B. – National research institute for metals. – Tokyo, Japan, 2000. – 36 p.
9. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. N-47-32. ASME, Three Park Avenue New York, NY 10016-5990, 1976.

10. Степнов М. Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1972. – 232 с.
11. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Бучатский А. А., Нестерова Е. В., Каштанов А. Д. Исследование влияния термического старения на длительную прочность и пластичность стали X18N9 // Вопросы материаловедения. – № 4 (64). – 2010. – С. 118–127.
12. Гришмановская Р. Н., Кудрявцев А. С., Марков В. Г. Оценка изменения свойств сталей марок X18N9 и X16N11M3 после эксплуатации в течении 130 000 ч в составе промпароперегревателя РУ БН-600 // Труды 9-ой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», 6–8 июня 2006, Санкт-Петербург. Т. 2. – С. 290–298.
13. Вотинов С. Н., Горынин И. В., Николаев В. А., Прохоров В. И., Разов И. А.. Влияние нейтронного облучения на длительную прочность аустенитных нержавеющей сталей // Труды научно-технической конференции «Атомная энергетика, топливные циклы, радиационное материаловедение», 5–10 октября, Ульяновск, 1970. Т. 3. – М.: СЭВ, Пост. комиссия по использованию атомной энергии в мирных целях, 1971. – С. 612–630.
14. Курсевич И. П., Лапин А. Н., Николаев В. А. Радиационная повреждаемость конструкционных материалов, используемых в реакторах типа БН // Радиационные эффекты изменений механических свойств конструкционных материалов и методы их исследований. – Киев: Наукова Думка, 1976. – 52 с.
15. Андреев В. В., Николаев В. А., Паршин А. М. Некоторые аспекты радиационного повреждения сталей при облучении в быстром реакторе // Радиационные эффекты изменений механических свойств конструкционных материалов и методы их исследований. – Киев: Наукова Думка, 1976. – 52 с.
16. Вотинов С. Н., Прохоров В. И., Островский З. Е. Облученные нержавеющей стали. – М.: Наука, 1987. – 128 с.
17. Вотинов С. Н., Прохоров В. И., Финько А. Г. Изменение характеристик жаропрочных труб из стали 1X18N10T при температурах 550–700°C в процессе облучения. – Димитровград: НИИАР, 1980. – Препринт НИИАР-39 (447). – 18 с.
18. Вотинов С. Н., Лосев Н. П., Прохоров В. И., Самсонов Б. В., Цыканов В. А., Финько А. Г. Оценка внутриреакторной длительной прочности конструкционных материалов // Проблемы прочности. – 1971. – № 5. – С. 61–64.
19. Вотинов С. Н., Прохоров В. И., Финько А. Г. Сравнительная оценка длительной прочности сплава ХН77ТЮР и стали X18N10T при 700°C в условиях внутриреакторного облучения // Проблемы прочности. – 1976. – № 12. – С. 30–35.
20. Kurata Y., Itabashi Y., Mimura H., Kikuchi T., Amezawa H., Shimakawa S., Tsuji H., Shindo M. In-pile and post-irradiation creep of type 304 stainless steel under different neutron spectra // Journal of Nuclear Materials. – 2000. – V. 9. – P. 286–390.
21. Писаренко Г. С., Киселевский В. Н. Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках. – Киев: Наукова думка, 1979. – 284 с.

УДК 621.039.531:669.15–194.56

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ РАДИАЦИОННОГО ОХРУПЧИВАНИЯ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

В. А. ШВЕЦОВА, канд. физ.-мат. наук, О. Ю. ПРОКОШЕВ, канд. техн. наук,
Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. А. СОРОКИН, канд. техн. наук, В. А. ПОТАПОВА

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

Статья поступила 26.06.2017

Представлены результаты исследования механизмов разрушения и охрупчивания аустенитных сталей типа X18N9 и X18N10T после нейтронного облучения при повышенных температурах в течение длительного времени. Выполнен анализ влияния времени, температуры и дозы нейтрон-

ного облучения на критическую деформацию и механизмы разрушения. На основе полученных результатов и специально проведенных экспериментов предложен и обоснован синергетический механизм охрупчивания материала в условиях высокотемпературного длительного облучения, обусловленный воздействием двух факторов – термического старения и диффузии гелия. Термическое старение приводит к образованию фазовых выделений по границам зерен и, следовательно, к снижению прочности границ зерен, а диффузия гелия при повышенных температурах испытаний вызывает образование и рост гелиевых пузырьков на ослабленных границах.

Ключевые слова: аустенитная сталь, высокотемпературное длительное нейтронное облучение, критическая деформация, синергетический механизм разрушения, радиационное охрупчивание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barnes R.S. Embrittlement of stainless steels nickel based alloys at high temperature induced by neutron radiation // *Nature*. – 1965. – V. 206. – P.1307.
2. Ward A. L., Holmes J. J. Ductility Loss in Fast Reactor irradiated stainless steel // *Nuclear Applications & Technology*. – 1970. – V. 9.
3. Claudson T. T., Barker R. W. The effects of fast flux irradiation on the mechanical properties and dimensional stability of stainless steel // *Nuclear Applications & Technology*. – 1970. – V. 9. – P. 10–23.
4. Роль облучения в высокотемпературной хрупкости стали / С. Н. Вотинов, В. И. Прохоров, В. Д. Балашов и др. // *Радиационная физика твердого тела и реакторное материаловедение*. – М.: Атомиздат, 1970. – С. 82–84.
5. Fish R. L., Hunter C. W. Tensile Properties of Fast Reactor Irradiated Type 304 Stainless Steel. – ASTM STP 611, 1976. – P. 119–138.
6. Высокотемпературное радиационное охрупчивание материалов. Аналитический обзор / В. Ф. Зеленский, Н. М. Кирюхин, И. М. Неклюдов и др. – Харьков: ХФТИ, 1983.
7. Вотинов С. Н., Прохоров В. И., Островский З. Е. Облученные нержавеющие стали. – М.: Наука, 1987.
8. Tavassoli A. A., Picker C., Wareign J. Data collection on the effect of irradiation on the mechanical properties of austenitic stainless steels and weld metals // ASTM STP, 1270. – 1996. – P. 995–1010.
9. Воеводин В. Н., Неклюдов И. М. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов. – Киев: Наукова Думка, 2006.
10. Hugon M. Update on EURATOM R&D activities in nuclear fission and radiation protection. PERFORM60 Final Workshop, Les Renardieres, December 10–12, 2013.
11. Курсевич И. П., Марголин Б. З., Прокошев О. Ю., Смирнов В. И., Федорова В. А., Нестерова Е. В., Петров С. Н. Влияние длительного температурного воздействия на механические свойства и структуру аустенитной стали X18H9 и металла сварных швов // *Вопросы материаловедения*. – 2012. – № 3. – С. 109–125.
12. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Бучатский А. А., Нестерова Е. В., Каштанов А. Д. Исследование влияния термического старения на длительную прочность и пластичность стали X18H9 // *Вопросы материаловедения*. – 2010. – № 4 (64). – С. 118–127.
13. Федорова В. А., Марголин Б. З., Каштанов А. Д., Поздняков М. Л. Исследование влияния термического старения на скорость роста усталостной трещины в стали 10X18H9 и металле сварного соединения // *Вопросы материаловедения*. – 2012. – № 3 (71). – С. 126–135.
14. Неустроев В. С., Белозеров С. В., Буланова Т.М., Варивцев А.В., Жемков И. Ю., Карсаков А. А., Е. И. Макаров, Обухов А.В., Слезко В. С. Материаловедческие исследования штанги исполнительного механизма стержня аварийного регулирования АР2 после эксплуатации в реакторе БОР-60 около 32 лет при высоких температурах. // X Российская конференция по реакторному материаловедению (Электронный ресурс). Сборник докладов. Димитровград. ОАО «ГНЦ НИИАР», 2013. – С. 647–664.
15. Курсевич И. П., Прокошев О. Ю., Потапова В. А. Оценка эксплуатационной повреждаемости металла внутрикорпусного оборудования реактора БН-600 // *Радиационное материаловедение и конструкционная прочность реакторных материалов / Под ред. И. В.Горынина*. – СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей». – 2002. – С. 212–221.

16. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. – М.: Мир, 1970.
17. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993.
18. Энгель Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение. Справочник. – М.: Metallurgiya, 1986.
19. Малфорд Р. А. Зернограничное охрупчивание никеля и его сплавов // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Под ред. К. Л. Брайента и С. К. Бенерджи. – М.: Metallurgiya, 1988. – С. 13–29.
20. Залужный А. Г., Сокурский Ю. Н., Тебус В. Н. Гелий в реакторных материалах. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
21. Неклюдов И. М., Морозов А. Н., Журба В. И., Кулиш В. Г., Галицкий А. Г. Удержание изотопов водорода в стали X18H10T, имплантированной ионами гелия // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2008. – Вып. 2. – С. 41–46.
22. Водород и радиогенный гелий в стали 12X18H10T / Е. А. Денисов, А. А. Курдюмов, Т. Н. Компаниец и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2008. – Вып. 2. – С. 56–66.
23. Holmes J. J., Robbins R. E., Brimhall J. L. Effect of fast reactor irradiation on the tensile properties of 304 stainless steel // J. of Nuclear Materials. – 1969. – N 32. – P. 330–339.
24. Horak J. A., Sikka V. K., Raske D. T. Review of effects of long-term aging on the mechanical properties and microstructures of types 304 and 316 stainless steel // International conference on nuclear power plant aging, variability factor and reliability analysis, San-Diego, Ca (USA), 7–12 July, 1983. – P. 301–313.
25. Gusev M. N., Maksimkin O. P., Garner F. A. Peculiarities of plastic flow involving “deformation waves” observed during low-temperature tensile tests of highly irradiated 12Cr18Ni10Ti and 08Cr16Ni11Mo3 steels // J. Nucl. Mater. – 2010. – N 403. – P. 121–125.
26. Gusev M. N., Field K. G., Busby J. T. Strain-induced phase transformation at the surface of an AISI-304 stainless steel irradiated to 4.4dpa and deformed to 0.8% strain // J. Nucl. Mater. – 2014. – V. 446. – P. 187–192.

УДК 621.039.536.2:621.791.92:539.422.22

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ОБЛУЧЕННОЙ АНТИКОРРОЗИОННОЙ НАПЛАВКИ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР

А. И. МИНКИН, А. М. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, В. И. СМЕРНОВ, канд. техн. наук

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

Статья поступила 10.08.2017

Приведены результаты дополнительных экспериментальных исследований статической трещиностойкости материалов антикоррозионной наплавки реакторов типа ВВЭР, облученных в диапазоне от 0 до $1,8 \cdot 10^{20}$ нейтр./см². На базе этих и полученных ранее данных усовершенствован разработанный авторами метод прогнозирования трещиностойкости материала наплавки, получены статистически обоснованные медианная и консервативная зависимости статической трещиностойкости металла наплавки от флюенса нейтронов и температуры.

Ключевые слова: антикоррозионная наплавка, облучение, трещиностойкость, прогноз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин Б. З., Швецова В. А., Прокошев О. Ю., Курсевич И. П., Смирнов В. И., Минкин А. И. Характеристики антикоррозионной наплавки для расчета сопротивления хрупкому разрушению материала корпуса реактора // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2(42). – С. 186–213.
2. Минкин А. И., Марголин Б. З., Костылев В. И., Смирнов В. И. Прогнозирование консервативных J_R -кривых для материала антикоррозионной наплавки корпусов реакторов типа ВВЭР с

учетом влияния нейтронного облучения // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 3(46). – С. 91–100.

3. Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials. United States Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.99 Rev. 2, 1988.

4. Прокошев О. Ю. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на охрупчивание антикоррозионной наплавки корпусов реакторов типа ВВЭР // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 2005. – 23 с.

5. Haggag F. M., Nanstad R. K. Effect of thermal aging and neutron irradiation on the mechanical properties of three-wire stainless steel weld overlay cladding. NUREG/CR-6363, ORNL/TM-13047, 1997.

6. ASTM E 1820. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.

7. Минкин А. И., Марголин Б. З., Смирнов В. И., Сорокин А. А. Развитие модели для прогнозирования статической трещиностойкости аустенитных материалов в условиях нейтронного облучения // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 3(75). – С. 107–119.

8. Хеллан К. Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1998. – 364 с.

9. Закс Л. Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.

10. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969. – 396 с.

11. Vries M. I. De Fatigue Crack Growth and Fracture Toughness Properties of Low Fluence Neutron-Irradiated Type 316 and Type 304 Stainless Steels // 13th Inter. Symp. "Influence of Radiation on Material Properties (Pt II)", Philadelphia, Pa (USA), ASTM. – 1987. – P. 174–190.

12. Киселевский В. Н. Изменение статической трещиностойкости аустенитных сталей и сплавов при радиационном повреждении // Проблемы прочности. – 1991. – № 7. – С. 3–10.

13. Little E. A. Fracture Mechanics Evaluations of Neutron Irradiated Type 321 Austenitic Steel // J. Nucl. Mater. – 1986. – V. 139. – P. 261–276.

УДК 621.039.536.2:621.791.92:539.422.22

**ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ПОСТРАДИАЦИОННОГО ОТЖИГА
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛА АНТИКОРРОЗИОННОЙ
НАПЛАВКИ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР. Часть 1. Механизмы охрупчивания
и восстановления свойств металла наплавки**

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. М. МОРОЗОВ, канд. техн. наук,
А. Я. ВАРОВИН, канд. техн. наук, В. И. КОСТЫЛЕВ, канд. техн. наук,
Л. А. БЕЛЯЕВА, канд. техн. наук, В. А. ПОТАПОВА, В. И. СМИРНОВ, канд. техн. наук,
О. Ю. ПРОКОШЕВ, канд. техн. наук, С. Н. ПЕТРОВ, канд. техн. наук

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

Статья поступила 27.06.2017

Исследовано влияние нейтронного облучения и пострadiaционного отжига на трещиностойкость металла антикоррозионной наплавки корпусов реакторов с различным содержанием фосфора и δ-феррита. Рассмотрено влияние температуры отжига на степень восстановления и деградации металла наплавки. Изучены процессы, протекающие при отжиге, которые оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на восстановление свойств металла наплавки. Результаты исследований могут быть использованы при обосновании сопротивления хрупкому разрушению корпусов реакторов после проведения отжига.

Ключевые слова: корпус реактора, антикоррозионная наплавка, пострadiaционный отжиг, сопротивление хрупкому разрушению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов атомных реакторов АЭС с ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет. РД ЭО 1.1.3.99.0871–2012.

2. Erak D., Gurovich B., Shtrombakh Ya., Zhurko D. Degradation and recovery of mechanical properties of VVER-1000 pressure vessel materials. International Symposium FONTEVRAUD 7, Avignon, France, 26–30 September, 2010, N O12-A096-T01.
3. Правила и нормы в атомной энергетике. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. ПНАЭ Г-7-010–89. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Медовар Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. – М.: Машиностроение, 1958. – 339 с.
5. Каховский Н. И. Сварка нержавеющей сталей. – Киев: Техника, 1968. – 312 с.
6. Кравцов Т. Г. Электродуговая наплавка электродной лентой. – Машиностроение, 1978. – С. 168.
7. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. – М.: Машиностроение, 1985. – 239 с.
8. Баданин В. И., Игнатов В. А., Курсевич И. П., Николаев В. А., Рыбин В. В., Тимофеев Б. Т. Стойкость против хрупкого разрушения аустенитно-ферритной стали, наплавленной на сталь 15Х2МФА // Автоматическая сварка. – 1989. – № 3. – С. 4–7.
9. Копельман-Серпухова З. И., Шаманин М. В. Некоторые данные по влиянию хрома и молибдена на тепловое охрупчивание аустенитно-ферритного наплавленного металла // Сварка: Сб. статей. – № 5. – Л.: Судпромгиз, 1962. – С. 54–60.
10. Карасик Н. Я., Шлепянова Н. Е. Химический состав и скорость образования σ -фазы в наплавленном металле 1Х25Н13 // Автоматическая сварка. – 1964. – № 2. – С. 38–42.
11. Баданин В. И., Игнатов В. А., Курсевич И. П., Николаев В. А., Рыбин В. В. Радиационное охрупчивание хромоникелевых аустенитных материалов с малым содержанием δ -феррита // Труды II Международной конференции «Радиационное воздействие на материалы термоядерных реакторов», СПб., 21–24 сентября 1992. – С. 128–147.
12. Николаев В. А., Курсевич И. П., Нестерова Е. В., Прокошев О. Ю., Рыбин В. В. Склонность к хрупкости металла антикоррозионной наплавки на корпусах реакторов водо-водяного типа // Радиационное материаловедение и конструкционная прочность реакторных материалов. Сб. научных статей, посвященный 100-летию со дня рождения академиков И. В. Курчатова и А. П. Александрова. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2002. – С. 232–251.
13. Гудремон Э. Специальные стали, Т. 1. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 952 с.
14. Haggag F. M., Nanstad R. K. Effect of thermal aging and neutron irradiation on the mechanical properties of three-wire stainless steel weld overlay cladding. NUREG/CR-6363, ORNL/TM-13047, 1997.
15. Курсевич И. П., Николаев В. А., Прокошев О. Ю. Влияние нейтронного облучения и послерадиационного отжига на сопротивление хрупкому разрушению металла антикоррозионной наплавки корпусов водо-водяных реакторов // Труды IV Международной конференции «Проблемы материаловедения при изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», СПб., июнь 1996. – С. 20–21.
16. Курсевич И. П., Николаев В. А., Прокошев О. Ю., Михалева Э. И., Морозовская И. А., Нестерова Е. В. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на механические свойства металла антикоррозионного покрытия корпусов реакторов водо-водяного типа // Труды VI Международной конференции «Проблемы материаловедения при изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», СПб., июнь 2000. – С. 170–182.
17. Марголин Б. З., Швецова В. А., Прокошев О. Ю., Курсевич И. П., Смирнов В. И., Минкин А. И. Характеристики антикоррозионной наплавки для расчета сопротивления хрупкому разрушению материала корпуса реактора // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2 (42). – С. 186–213.
18. Утевский Л. М. Отпускная хрупкость конструкционных сталей. – М.: Metallurgiya, 1961. – 191 с.
19. Карк Г. С. Металловедение и термическая обработка специальных сталей и сплавов для энергомашиностроения. – М.: ЦНИИТМАШ. – 1978. – № 142. – С. 5–12.
20. Утевский Л. М., Гликман Е. Э., Карк Г. С. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. – М.: Metallurgiya, 1987. – 224 с.

21. Williams R. O. Further Studies of the Iron-Chromium System // Transactions of the metallurgical society of AIME. – 1958. – V. 212. – P. 497–502.
22. Устиновщиков Ю. И., Пушкарев Б. Е. Структурные и фазовые превращения в железохромистых сплавах // Металлы. – 1999. – № 2. – С. 52–58.
23. Miller M. K., Hyde J. M., Hetherington M. G., Cerezo A., Smith G. D. W., Elliott C. M. Spinodal Decomposition in Fe–Cr Alloys: Experimental Study at the Atomic Level and Comparison with Computer Models-I. Introduction and Methodology // Acta Metal. Mater. – 1995. – V. 43, N 9. – P. 3385–3401.
24. Miller M. K., Hyde J. M., Hetherington M. G., Cerezo A., Smith G. D. W., Elliott C. M. Spinodal Decomposition in Fe–Cr Alloys: Experimental Study at the Atomic Level and Comparison with Computer Models-II. Development of Domain Size and Composition Amplitude // Acta Metal. Mater. 1995. – V. 43, N 9. – P. 3403–3413.
25. Miller M. K., Hyde J. M., Hetherington M. G., Cerezo A., Smith G. D. W., Elliott C. M. Spinodal Decomposition in Fe–Cr Alloys: Experimental Study at the Atomic Level and Comparison with Computer Models-III. Development of Morphology // Acta Metal. Mater. – 1995. – V. 43, N 9. – P. 3415–3426.
26. Каменецкая Д. С., Каминский Э. З., Колонцов В. Ю., Мойш Ю. В. Распад твердых растворов железа – хром высокой степени чистоты // ФММ. – 1976. – № 46, вып. 1. – С. 216–218.
27. Grobner P. J. The 885°F (475°C) Embrittlement of Ferritic Stainless Steels // Metall. Trans. – 1973. – V. 4. – P. 251–260.
28. Hattestrand M., Larsson P., Chai G.-C., Nilsson J.-O., Odqvist J. Study of Decomposition of Ferrite in a Duplex Stainless Steel Cold Worked and Aged at 450–500°C // Materials Science and Engineering A. – 2009. – V. 499, Iss. 1–2. – P.489–492.
29. Sahu J. K, Krupp U., Ghosh R. N., Christ H.-J. Effect of 475°C Embrittlement on the Mechanical properties of Duplex Stainless Steel // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – V. 508, Iss. 1–2. – P. 1–14.
30. Chandra K., Sinhal R., Kain V., Raja V. S. Low Temperature of Duplex Stainless Steel: Correlation between Mechanical and Electrochemical Behavior // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – V. 527, Iss. 16–17. – P. 3904–3912.
31. Головин И. С., Саррак В. И., Суворова С. О., Дмитриев В. Б. Распад твердого раствора внедрения и расслоение высокохромистого феррита. – ФММ. – 1987. – Т. 64, вып. 3. – С.540–548.
32. Бородин О. В., Воеводин В. Н., Неклюдов И. М., Агеев В. С., Медведева Е. Ф. Влияние облучения тяжелыми ионами на структуру сталей и сплавов с 10–13%Cr // Физика и химия обработки материалов. – № 6. – 1994. – С. 14–24.
33. Irradiation response of delta ferrite in as-cast and thermally aged cast stainless steel / Z.-B. Li, W.-Y. Lo, Y. E. Chen et al. // Journal of Nuclear Material. – 2015. – V. 466. – P. 201–207.
34. Гальперин М. А., Ардентов В. В., Иванов К. М., Копельман-Серпухова З. И. Изучение влияния длительной термической обработки на физико-механические свойства аустенитного наплавленного металла // Сварка. – № 1. – Л.: Судпромгиз, 1958. – С. 75–85.
35. Земзин В. Н., Петров Г. Л. Влияние ферритной фазы на свойства аустенитного наплавленного металла // Сварочное производство. – 1967. – № 5. – С. 6–8.
36. Иванов К. М. Влияние температуры старения и скорости охлаждения на процессы охрупчивания аустенитно-ферритного наплавленного металла // Сварка. – № 4. – Л.: Судпромгиз, 1961. – С. 91–107.
37. Иванов К. М. Влияние легирующих элементов на механические свойства аустенитно-ферритного металла швов при старении // Сварка. – № 11. – Л.: Судпромгиз, 1968. – С. 45–66.
38. Закс И. А. Влияние термической обработки и длительного нагрева на ферритно-аустенитные швы // Сварочное производство. – 1961. – № 7. – С. 6–9.
39. Ардентов В. В., Иванова Т. И., Младзиевский К. К. Структура и свойства металла, наплавленного под слоем флюса ленточным электродом из нержавеющей стали. – Сварка. – № 4. – Л.: Судпромгиз, 1961. – С. 158–167.

40. Копельман-Серпухова З. И., Ардентов В. В., Комарова Н. П. Сварочная проволока для автоматической наплавки антикоррозионной защиты сосудов // Сварка. – № 2. – Л.: Судпромгиз, 1959. – С. 77–83.
41. Копельман-Серпухова З. И., Ардентов В. В., Комарова Н. П. Автоматическая сварка стали марки 1X18H9T проволокой марки ЭИ-898 // Сварка. – № 3. – Л.: Судпромгиз, 1960. – С. 100–109.
42. Ардентов В. В., Макарова В. И., Петров Г. Л., Старец Е. Е. Регламентация содержания ферритной фазы в металле швов, выполненных аустенитными хромоникельмолибденовыми электродами // Сварка. – № 4. – Л.: Судпромгиз, 1961. – С. 76–91.
43. Житников Н. П., Валовельский Д. Э., Тимофеев Д. Б., Брусницин М. Ю., Тимофеев Б. Т. Материалы научно-практической конференции «Влияние режимов термической обработки на служебные свойства металла антикоррозионной наплавки». – Л., 1989. – С. 86–92.
44. Тимофеев Б. Т., Чернаенко Т. А. Влияние технологии изготовления на свойства антикоррозионной наплавки (обзор) // Труды VIII Международной конференции «Проблемы материаловедения при изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», СПб., 2004. – С. 111–126.
45. Копельман-Серпухова З. И., Шаманин М. В. О влиянии некоторых легирующих элементов на свойства аустенитно-ферритного наплавленного металла // Сварка. – №7. – Л.: Судпромгиз. – 1964. – С. 102–107.
46. ASTM E 1820–09 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. Annual Book of ASTM Standards, V. 03.01.
47. Методика прогнозирования свойств антикоррозионной наплавки для расчета прочности корпусов реакторов ВВЭР-1000 с учетом влияния коррозионной среды и облучения на сопротивление зарождению и развитию трещины при продлении срока эксплуатации до 60 лет. МТ 1.2.3.06.0102–2012.
48. Методика определения вязкости разрушения по результатам испытаний образцов-свидетелей для расчета прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР-1000. РД ЭО 1.1.2.09.0789–2012
49. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. ГОСТ 25.506–85. – М., 1985.
50. Конобеевский С. Т. Действие облучения на материалы. – М.: Атомиздат, 1967. – 402 с.

УДК 621.039.536.2:621.791.92:539.422.22

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ПОСТРАДИАЦИОННОГО ОТЖИГА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛА АНТИКОРРОЗИОННОЙ НАПЛАВКИ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР.

Часть 2. Прогнозирование механических свойств и трещиностойкости металла наплавки

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, В. И. КОСТЫЛЕВ, канд. техн. наук,
А. М. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, А. Я. ВАРОВИН, канд. техн. наук,
Л. А. БЕЛЯЕВА, канд. техн. наук, В. А. ПОТАПОВА, В. И. СМИРНОВ, канд. техн. наук,
О. Ю. ПРОКОШЕВ, канд. техн. наук, С. Н. ПЕТРОВ, канд. техн. наук

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

Статья поступила 27.06.2017

Исследовано влияние нейтронного облучения, пострадиационного отжига и повторного облучения на механические свойства и трещиностойкость металла антикоррозионной наплавки корпусов реакторов. Предложены зависимости для прогнозирования диаграммы деформирования и трещиностойкости металла наплавки с учетом влияния режима отжига и повторного нейтронного облучения. Полученные зависимости могут быть использованы для расчетов напряженно-

деформированного состояния корпусов реакторов, а также для оценки сопротивления хрупкому разрушению корпуса реактора в процессе его эксплуатации после отжига.

Ключевые слова: корпус реактора, антикоррозионная наплавка, пострadiaционный отжиг, сопротивление хрупкому разрушению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет. РД ЭО 1.1.3.99.0871–2012.
2. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-440 (В-213) при продлении срока эксплуатации до 60 лет. Методика. МТ ЭО 1.2.1.15.0232–2014.
3. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Стандартиформ, 2005.
4. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при пониженных температурах. М.: Изд-во стандартов, 1984.
5. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. М.: Изд-во стандартов, 1984.
6. Lee J. S., Kim I. S., Kasada R., Kimura A. Microstrural characteristics and embrittlement phenomena in neutron irradiated 309L stainless steels RPV clad // Journal of Nuclear Materials. – 2004. – V. 326. – P. 38–46.
7. Алексеенко Н. Н., Амаев А. Д., Горынин И. В., Николаев В. А. Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 191 с.
8. Марголин Б. З., Швецова В. А., Прокошев О. Ю., Курсевич И. П., Смирнов В. И., Минкин А. И. Характеристики антикоррозионной наплавки для расчета сопротивления хрупкому разрушению материала корпуса реактора // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2 (42). – С. 186–213.
9. Методика прогнозирования свойств антикоррозионной наплавки для расчета прочности корпусов реакторов ВВЭР-1000 с учетом влияния коррозионной среды и облучения на сопротивление зарождению и развитию трещины при продлении срока эксплуатации до 60 лет. МТ 1.2.3.06.0102–2012.
10. ASTM E 813–89 Standard Test Method for J_{1C} . A Measure of Fracture Toughness. – Annual Book of ASTM Standards, Section 3. – V. 03.01. – P. 700–714.