

Михаил Валентинович КОВАЛЬЧУК (К 75-летию со дня рождения)	5
--	---

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

<i>Сыч О. В., Коротовская С. В., Хлусова Е. И., Мотовилина Г. Д., Никитина В. Р.</i> Исследование неоднородности структуры и механических свойств по толщине до 100 мм листового проката из низколегированной судостроительной стали с пределом текучести не менее 420 МПа	9
--	---

<i>Яковлева Е. А., Ларионов А. В., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И.</i> Влияние естественного и искусственного старения на механические свойства и трещиностойкость стали	28
--	----

<i>Медведев П. Н., Наприенко С. А., Кашапов О. С., Филонова Е. В.</i> Изменение структурного и текстурного состояния титанового сплава ВТ41 в результате горячей осадки и последующего отжига	40
---	----

<i>Орыщенко А. С., Леонов В. П., Чудаков Е. В., Малинкина Ю. Ю.</i> Особенности влияния рутения на коррозионные характеристики титановых сплавов различных классов	51
--	----

<i>Михайлов В. И., Козлова И. Р., Кузнецов С. В., Маркова Ю. М., Васильева Е. А.</i> Структурно-фазовые превращения при сварке высоколегированного сплава титана	63
--	----

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Бобкова Т. И., Быстров Р. Ю., Васильева О. В., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А., Красиков А. В., Кузнецов П. А., Самоделкин Е. А., Улин И. В., Фармаковский Б. В.</i> Инновационные исследования и разработки научного нанотехнологического центра НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»	82
---	----

<i>Быстров Р. Ю., Геращенко Д. А.</i> Получение покрытия многокомпонентной системы Al–Cr–Ni–Co–Fe на стальной подложке с использованием лазера	109
--	-----

<i>Геращенко Д. А.</i> Применение технологии холодного газодинамического напыления как аддитивного способа для получения материалов на основе алюминидов никеля и алюминидов титана	118
---	-----

<i>Хорова Е. А., Еремин Е. Н., Стрижак Е. А.</i> Исследование функциональных свойств резин на основе гидрированных бутадиев-нитрильных каучуков	128
---	-----

ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Колпачков Е. Д., Мараховский П. С., Петрова А. П., Щур П. А., Лонский С. Л., Черняева И. Ю., Шведов А. В.</i> Исследование влияния ионно-плазменной обработки на свойства поверхности армирующих наполнителей	136
--	-----

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

<i>Николаев Г. И., Кузьмин Ю. Л., Лишевич И. В., Ставицкий О. А., Подшивалов А. В., Малашев П. И.</i> Разработка систем катодной защиты от коррозии корпусов атомных ледоколов и арктических морских сооружений	150
---	-----

<i>Белов Д. В., Беляев С. Н., Максимов М. В., Геворгян Г. А.</i> Исследование коррозионного разрушения алюминиевых сплавов Д16Т и АМг6 при воздействии микроскопических грибов	163
--	-----

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

<i>Ильин А. В., Садкин К. Е., Забавичев Н. С.</i> К расчетной оценке усталостной прочности сварных оболочечных конструкций из высокопрочных сталей при малоцикловом нагружении. Часть 1. Оценки на начальной стадии усталостного разрушения	184
---	-----

<i>Глибенко О. В., Вихарева Т. В., Ильин А. В.</i> Исследование изменения предельных деформаций и механических свойств сталей разных структурных классов при однократном и многократном динамическом воздействии	209
--	-----

<i>Деев А. А., Калинин Г. Ю., Садкин К. Е.</i> Перспективы применения высокопрочной азотсодержащей стали для строительства ледового пояса морской техники, эксплуатирующейся в экстремальных условиях Арктического региона	229
--	-----

<i>Орыщенко А. С., Леонов В. П., Михайлов В. И.</i> Титановые сплавы для глубоководной морской техники.....	238
<i>Орыщенко А. С., Попова И. П., <u>Уткин Ю. А.</u>, Петров С. Н.</i> Работоспособность и увеличение ресурса центробежно-литых труб для высокотемпературных установок пиролиза в исследованиях НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей».....	247
<i>Алифиренко Е. А., Барахтина Н. Н., Малов Е. В.</i> Создание новых сварных крупногабаритных облегченных панелей повышенной прочности из алюминиево-магниевых сплавов для строительства скоростных судов нового типа для эксплуатации в условиях Заполярья	263
Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов	274

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПО ТОЛЩИНЕ ДО 100 мм ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ
СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ С ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ НЕ МЕНЕЕ 420 МПа**

О. В. СЫЧ, канд. техн. наук, С. В. КОРОТОВСКАЯ, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р. техн. наук,
Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук, В. Р. НИКИТИНА

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
Шпалерная ул., 49, E-mail: npk3@crism.ru*

Поступила в редакцию 11.06.2021

После доработки 23.06.2021

Принята к публикации 27.07.2021

Представлены результаты исследования структуры и свойств низколегированной судостроительной стали с пределом текучести не менее 420 МПа по толщине листового проката до 100 мм. Исследована поверхность разрушения образцов после испытаний на ударный изгиб при низких температурах. Установлено, что сочетание параметров бейнита речной морфологии (доли, средних размеров областей и их протяженности) и размера структурных элементов при заданных углах толерантности θ_i 5 и 15°, указывающих на наличие или отсутствие развитой субзеренной структуры деформационного происхождения, определяют уровень работы удара при низких температурах испытаний.

Ключевые слова: термомеханическая обработка, листовая прокат, структура по толщине, структурная неоднородность, речный бейнит, квазиполигональный феррит, механические свойства, низкая температура испытаний.

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-09-27

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Изд-во МИСиС. – 2005. – 432 с.
2. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Metallurgia. – 1986. – 224 с.
3. Opiela M., Ozgowicz W. Effects of Nb, Ti and V on recrystallization kinetics of austenite in microalloyed steels // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2012. – V. 55/2. – P. 759–771.
4. Sakai T., Belyakov A., Kaibyshev R., Miura H., Jonas J. J. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions // Progress in Materials Science. – 2014. – V. 60. – P. 130–207.
5. 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.
6. 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.
7. Pereda B., Fernandez A. I., Lopez B., Rodrigues-Ibabe J. M. Effect of Mo on dynamic recrystallization behavior on Nb–Mo microalloyed steels // ISIJ International. – 2007. – V. 47. – N 6. – P. 860–868.
8. Fernandez A. I., Uranga P., Lopez B., Rodrigues-Ibabe J.M.. Dynamic recrystallization behavior covering a wide austenite grain size range in Nb and Nb–Ti Microalloyed steels // Materials Science and Engineering A. – 2001. – A361. – P. 367–376.
9. Hodgson P. D., Zahiri S. H., Whale J. J. The static and metadynamic recrystallization behavior of an X60 Nb microalloyed steel // ISIJ International. – 2004. – V. 44, N 7. – P. 1224–1229.
10. Dehghan-Manshadi A., Barnett M., Hodgson P. Hot deformation and recrystallization of austenitic stainless steel: Part 1. Dynamic recrystallization // Metal. Mater. Trans. – 2008. – V. 39A. – P. 1359–1370.

11. Частухин А. В., Рингинен Д. А., Хадеев Г. Е., Эфрон Л. И. Кинетика статической рекристаллизации аустенита микролегированных ниобием трубных сталей // *Металлург.* – 2015. – № 12. – С. 33–38.
12. Частухин А. В., Рингинен Д. А., Эфрон Л. И., Астафьев Д. С., Головин С. В. Разработка моделей структурообразования аустенита для совершенствования стратегий горячей прокатки трубных сталей // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* – 2016. – № 3. – С. 39–53.
13. Конева Н. А., Тришкина Л. И., Козлов Э. В. Физика субструктурного и зернограничного упрочнения // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 40–49.
14. Козлов Э. В., Конева Н. А., Попова Н. А. Фрагментированная субструктура, формирующаяся в ОЦК-сталях при деформации // *Известия РАН. Серия физическая.* – 2004. – № 10. – С. 1419–1427.
15. Урцев В. Н., Корнилов В. Л., Шмаков А. В., Краснов М. Л., Стеканов П. А., Платов С. И., Мокшин Е. Д., Урцев Н. В., Счастливцев В. М., Разумов И. К., Горностырев Ю. Н. Формирование структурного состояния высокопрочной низколегированной стали при горячей прокатке и контролируемом охлаждении // *Физика металлов и материаловедение.* – 2019. – Т. 120. – № 12. – С. 1335–1344.
16. Isasti N., Jorge-Badiola D., Taheri M. L., Uranga P. Phase Transformation Study in Nb–Mo Microalloyed Steels Using Dilatometry and EBSD Quantification // *Metallurgical and materials transactions A.* – 2013. – V. 44A. – P. 3552–3563.
17. НД № 2-020101-124. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII. Материалы. – СПб.: Российский морской регистр судоходства. – 2020. – 273 с.
18. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Часть 1. Принципы легирования и требования к структуре листового проката // *Вопросы материаловедения.* – 2018. – № 3 (95). – С. 22–47.
19. Сыч О. В., Хлусова Е. И. Взаимосвязь параметров структуры с характеристиками работоспособности судостроительных сталей различного легирования // *Вопросы материаловедения.* – 2020. – № 4 (104). – С. 17–31.
20. Казаков А. А., Киселев Д. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И. Методика оценки микроструктурной неоднородности по толщине листового проката из хладостойкой низколегированной стали арктического применения // *Черные металлы.* – 2020. – № 9. – С. 11–19.
21. Казаков А. А., Киселев Д. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И. Количественная оценка структурной неоднородности в листовом прокате из хладостойкой низколегированной стали для интерпретации технологических особенностей его изготовления // *Черные металлы.* – 2020. – № 11. – С. 4–14.
22. Kazakov A. A., Kiselev D. V., Khlusova E. I. Quantitative assessment of microstructural inhomogeneity by thickness of hot-rolled plates made of cold-resistant low-alloy steel for Arctic applications // *CIR Iron and Steel Review.* – 2020. – V. 20. – P. 41–49.
23. Голи-Оглу Е. А., Бокачев Ю. А. Термомеханическая обработка плит толщиной до 100 мм из низколегированной конструкционной стали в NLMK DanSteel // *Сталь.* – 2014. – № 9. – С. 71–78.
24. Голи-Оглу Е. А., Кичкина А. А. Микро- и наноструктурная неравномерность по толщине 100 мм плит из конструкционной стали после ТМО и ТО // *Металлург.* – 2016. – № 11. – С. 54–60.
25. Казаков А. А., Киселев Д. В., Казакова Е. И., Курочкина О. В., Хлусова Е. И., Орлов В. В. Влияние структурной анизотропии в ферритно-бейнитных штрипсовых сталях после термомеханической обработки на уровень их механических свойств // *Черные металлы.* – 2010. – № 6. – С. 7–13.
26. Кичкина А. А., Матросов М. Ю., Эфрон Л. И., Клюквин М. Б., Голованов А. А. Влияние структурной анизотропии ферритно-бейнитной трубной стали на механические свойства при испытаниях на растяжение и ударный изгиб // *Металлург.* – 2010. – № 12. – С. 33–39.
27. Настич С. Ю. Особенности ферритно-бейнитной структуры и сопротивление вязким разрушениям высокопрочных трубных сталей // *Деформация и разрушение материалов.* – 2012. – № 7. – С. 19–25.
28. Пышминцев И. Ю., Борякова А. Н., Смирнов М. А., Дементьева Н. В. Свойства низкоуглеродистых сталей, содержащих в структуре бейнит // *Металлург.* – 2009. – № 12. – С. 45–50.

29. Настич С. Ю. Влияние морфологии бейнитной составляющей микроструктуры низколегированной стали Х70 на хладостойкость проката больших толщин // *Металлург.* – 2012. – № 3. – С. 62–69.
30. Isasti N., Jorge-Badiola D., Taheri M. L., Uranga P. Microstructural Features Controlling Mechanical Properties in Nb–Mo Microalloyed Steels. Part II: Impact Toughness // *Metallurgical and Materials Transactions A.* – 2014. – V. 45. – P. 4972–4982.
31. Thridandapani R.R., Misra R.D.K., Mannering T., Panda D., Jansto S. The application of stereological analysis in understanding differences in toughness of V- and Nb-microalloyed steels of similar yield strength // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2006. – P. 285–291.
32. Hu J., Du L.X., Zang M., Yin S. J., Wang Y. G., Qi X. Y., Gao X. H., Misra R. D. K. On the determining role of acicular ferrite in V–N microalloyed steel in increasing strength-toughness combination // *Materials Characterization.* – 2016. – V. 118. – P. 446–453.
33. Настич С. Ю., Матросов М. Ю. Структурообразование высокопрочных трубных сталей при термомеханической обработке // *Металлург.* – 2015. – № 9 – С. 46–54.
34. Голи-Оглу Е. А. Обеспечение повышенной хладостойкости плит FH40 толщиной 70–100 мм для морских конструкций северного исполнения // *Металлург.* – 2015. – № 6. – С. 53–58.
35. Голи-Оглу Е. А., Бокачев Ю. А. Повышение уровня пластичности в Z-направлении проката толщиной до 150 мм из низкоуглеродистых сталей для ответственных сварных конструкций // *Металлург.* – 2014. – № 9. – С. 71–76.
36. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Часть 2. Технология производства, структура и характеристики работоспособности листового проката // *Вопросы материаловедения.* – 2018. – № 4 (96). – С. 14–41.
37. Сыч О. В., Хлусова Е. И., Яшина Е. А. Особенности создания технологии производства толстолистового проката из низкоуглеродистых низколегированных хладостойких сталей с индексом «Агс» в промышленных условиях // *Тяжелое машиностроение.* – 2017. – № 11–12. – С. 2 – 10.
38. Сыч О. В., Коротовская С. В., Хлусова Е. И., Новоскольцев Н. С. Разработка термодеформационных режимов прокатки низколегированной «агс»-стали с квазиоднородной ферритно-бейнитной структурой // *Вопросы материаловедения.* – 2021. – № 2 (106). – С. 5–17.

УДК 669.14.018.293:539.389:539.421

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО И ИСКУССТВЕННОГО СТАРЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ

Е. А. ЯКОВЛЕВА, А. В. ЛАРИОНОВ, Г. Д. МОТОВИЛИНА, канд. техн. наук,
Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 15.06.2021

После доработки 30.06.2021

Принята к публикации 27.07.2021

Условия эксплуатации судостроительных сталей в сварных конструкциях, в том числе в северных широтах, определяют высокие требования к их качеству. Применяемые для таких конструкций материалы должны обладать стабильностью механических свойств, хорошей технологичностью в судокорпусном производстве и гарантированной работоспособностью при отрицательных температурах. Деформационное старение обусловлено термодинамической неравновесностью структуры стали в исходном состоянии и постепенным ее приближением к равновесному состоянию в условиях достаточной диффузионной подвижности атомов внедрения. В неблагоприятных случаях это может приводить к деградации свойств при технологических обработках (холодной правке, гибке, сварке), при эксплуатации или в процессе длительного хранения.

В работе исследована возможность протекания естественного и искусственного старения за счет объемной диффузии и диффузии углерода по ядрам дислокаций («трубочная» диффузия)

сталей различного химического состава. Выполнен анализ влияния деформационного старения на механические свойства и изменение параметра трещиностойкости CTOD.

Ключевые слова: низколегированная сталь, легированная сталь, термомеханическая обработка, закалка, отпуск, естественное и искусственное старение, ферритно-бейнитная структура, ферритно-перлитная структура, механические свойства, трещиностойкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-28-39

ЛИТЕРАТУРА

1. Скаков Ю. А. Старение металлических сплавов: Металловедение (материалы симпозиума). – М.: Металлургия, 1971. – С. 118–132.
2. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: справочник. Т. 2: Строение стали и чугуна / М. Л. Бернштейн, Г. В. Курдюмов, В. С. Меськин, А. А. Попов и др. / Под ред. А. Г. Рахштадта и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 528 с.
3. Скаков Ю. А. Процессы старения в сплавах. – М.: Машиностроение, 1972. – 33 с.
4. Хотинев В. А., Полунина О.Н., Селиванова О.В., Фарбер В.М. Влияние деформационного старения на механические свойства при растяжении в металле труб класса прочности X80 // Материаловедение. – 2019. – № 1. – С. 9–14.
5. Канфор С. С. Корпусная сталь. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 375 с.
6. ГОСТ Р 52927–2015. Прокат для судостроительной стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2015 – С. 93.
7. Коротовская С. В., Круглова А.А., Орлов В.В., Хлусова Е.И. Сравнительное исследования фазовых превращений, структуры и свойств марганцевоникелевой стали после закалке с отпуском и термомеханической обработки // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2010. – № 4.– С. 60–67.
8. Васильев А. А., Голиков П.А. Модели для расчета коэффициента диффузии углерода в сталях и примеры их практического использования. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 186 с.
9. Tapasa K., Osetsky Yu. N., Bacon D. J. Computer simulation of interaction of an edge dislocation with α - carbon interstitial in α -iron and effects on glide // Acta Materialia. – 2007. – V. 55. – P. 93–104.
10. Vasilyev A. A., Lee H.-C., Kuzmin N. L. Nature of strain aging stages in bake hardening steel for automotive application // Materials Science and Engineering A. – 2008. – V. 485. – P. 282–289.

УДК 669.295:539.2:621.785.3

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНОГО И ТЕКСТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ41 В РЕЗУЛЬТАТЕ ГОРЯЧЕЙ ОСАДКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОТЖИГА

П. Н. МЕДВЕДЕВ, канд. физ.-мат. наук, С. А. НАПРИЕНКО, канд. техн. наук,
О. С. КАШАПОВ, канд. техн. наук, Е. В. ФИЛОНОВА

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

Поступила в редакцию 26.05.2021

После доработки 7.07.2021

Принята к публикации 27.07.2021

Проведено исследование структуры титанового сплава ВТ41 (Ti–Al–Si–Zr–Sn + β -стабилизаторы), подвергнутого горячей осадке в (α + β)-области, т. е. в условиях, моделирующих штамповку диска газотурбинного двигателя (ГТД). Выявлены особенности формирования текстурного состояния первичных и вторичных глобулярных зерен, а также кинетики их растворения при повышении температуры отжига. В результате термообработки при 995°C существенно повышается однородность структуры заготовки по сравнению с деформированным состоянием, что связано с перекристаллизацией пластинчатых и мелкоглобулярных зерен и сохранением первичных глобулярных зерен α -фазы. Установлена последовательность структурных изменений при нагреве в интервале температур отжига от 950 до 1040°C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев П. Н., Наприенко С. А., Кашапов О. С., Шпагин А. С., Попов И. П. Исследование неоднородности структуры заготовки титанового сплава ВТ41 после термомеханической обработки // Вопросы материаловедения. – 2019. – №1 (97) . – С. 36–46.
2. Zhang X. D., Evans D. J., Baeslack W. A., Fraser H. L. Effect of long term aging on the microstructural stability and mechanical properties of Ti–6Al–2Cr–2Mo–2Sn–2Zr alloy // Materials Science and Engineering. – 2003. – V. A344. – P. 300–311.
3. Аношкин Н. Ф., Брун М. Я., Шаханова Г. В. Требования к бимодальной структуре с оптимальным комплексом механических свойств и режимы ее получения // Титан. – 1998. – № 1 (10). – С. 35–41.
4. Lutjering G., Williams J. C. Titanium. 2nd edition. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003, 2007. – 449 p.
5. Sauer C., Lutjering G. Influence of layers at grain boundaries on mechanical properties of Ti-alloys // Materials Science and Engineering. – 2001. – V. A319–321. – P. 393–397.
6. Es-Souni M. Creep behaviour and creep microstructures of a high-temperature titanium alloy Ti–5,8Al–4,0Sn–3,5Zr–0,7Nb–0,35Si–0,06C (Timetal 834). Part I: Primary and steady-state creep // Materials Characterization. – 2001. – V. 46. – P. 365–379.
7. Кашапов О. С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства опытных поковок из сплава ВТ41 с мелкозернистой структурой // Авиационные материалы и технологии, 2017. № 3 (48). С. 3–7. DOI: 10/18577/2071-9140-2017-0-3-3-7.
8. Russo P. A., Yu K. O. Effect of Ni, Fe, and primary alpha on the creep of alpha-beta processed and annealed Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo–0,09Si // Titanium-99. Science and technology, 1999. – P. 596–603.
9. Welk B. A. Microstructural and property relationships in titanium alloy Ti-5553 // Presented in partial fulfillment of the requirements for the degree master of science in the graduate school of the Ohio State University. – The Ohio State University, 2010. – 88 p.
10. Zeng W. D., Zhou Y. G. The influence of microstructure on dwell sensitive fatigue in Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si alloy // Materials Science and Engineering. – 2000. – N A290. – P. 33–38.
11. Горбовец М. А., Ночовная Н. А. Влияние микроструктуры и фазового состава жаропрочных титановых сплавов на скорость роста трещины усталости // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 4. Ст.03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 03.12.2018). DOI:10/18577/2307-6046-2016-0-4-3-3.
12. Захарова Л. В. Влияние химического состава, термической обработки и структуры на стойкость титановых сплавов к растрескиванию от горячесолевой коррозии // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – № 9. Ст.11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 03.12.2018). DOI: 10/18577/2307-6046-2016-0-9-11-11.
13. Орлов М. Р., Наприенко С. А. Разрушение двухфазных титановых сплавов в морской воде // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2017. – № 1. Ст.10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 03.12.2018). DOI: 10/18577/2307-6046-2017-0-1-10-10.
14. Kablov E. N., Kovalev I. E., Zhemanyuk P. D., Tkachenko V. V., Voitenko S. A., Pirogov L. A., Banas F. P., Kovalev A. E. Efficiency of surface cold-work hardening of titanium alloys having different phase composition // Fifth International Conference on Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Treatment Effects “Computational and Experimental Methods”, Surface Treatment V, Seville, 2001. – P. 23–32.
15. Каблов Е. Н., Кашапов О. С., Павлова Т. В., Ночовная Н. А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из титанового псевдо- α -сплава ВТ41 // Титан. – 2016. – № 2 (52). – С. 33–42.
16. Кашапов О. С., Павлова Т. В., Калашников В. С., Заводов А. В. Влияние условий охлаждения крупных промышленных поковок из жаропрочного титанового сплава ВТ41 на фазовый со-

став и механические свойства // Цветные металлы. – 2018. – № 2. – С. 76–82. DOI: 10.17580/tsm.2018.02.10.

17. Crystallographic orientation evolution during the development of tri-modal microstructure in the hot working of TA15 titanium alloy / P. Gao et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – V.741. – P. 734–745.

18. Semiatin S. L., Seetharaman V., Ghosh A. K. Plastic flow, microstructure evolution, and defect formation during primary hot working of titanium and titanium aluminide alloys with lamellar colony microstructures // Phil. Trans. R. Soc. Lond. – 1999. – A 357. – P. 1487–1512.

19. Shell E. B., Semiatin S. L. Effect of initial microstructure on plastic flow and dynamic globularization during hot working of Ti–6Al–4V // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1999. – V. 30a. – P. 3219–3229.

20. Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti–6Al–4V with lamellar starting structure / T. Seshacharyulu et al. // Materials Science and Engineering. – 2002. – A325. – P.112–125/

21. Characterization of dynamic globularization behavior during hot working of Ti–6Al–4V alloy / J.-T.Yeom, J. H. Kim et al. // Advanced Materials Research. – 2007. – V. 26–28. – P. 1033–1036.

22. Hot deformation behavior and processing map of Ti–6Al–3Nb–2Zr–1Mo titanium alloy / C. Haisheng et al. // Rare Metal Materials and Engineering. – 2016. – V. 45(4). – P. 0901–0906.

23. Sun Z.-C., Li X. S., Wu H. L., Yang H. Morphology evolution and growth mechanism of the secondary Widmanstätten α phase in the TA15 Ti-alloy // Materials Characterization. – 2016. – V. 118. – P. 167–174.

24. Xu J., Zeng W., Ma H., Zhou D. Static globularization mechanism of Ti-17 alloy during heat treatment // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – V. 736. – P. 99–107.

25. Stefansson N., Semiatin S. L. Mechanism of globularization of Ti–6Al–4V during static heat treatment // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2003. – V. 34a. – P.691–698.

26. 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.

УДК 669.295:620.193

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ РУТЕНИЯ НА КОРРОЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ

А. С. ОРЫЩЕНКО, чл.-корр. РАН, В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук,

Е. В. ЧУДАКОВ, канд. техн. наук, Ю. Ю. МАЛИНКИНА, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 28.06.2021

После доработки 21.07.2021

Принята к публикации 27.07.2021

Рассмотрены результаты коррозионных испытаний и микроструктурных исследований поковок из титановых сплавов различных классов, модифицированных рутением, систем Ti–Al–Zr + 0,15%Ru, Ti–Al–V–Mo + 0,15%Ru, Ti–Al–V–Cr–Fe–Mo + 0,15%Ru и аналогичных систем базовых составов. На основании выполненного комплекса исследований проанализировано влияние количества β -фазы на локальное содержание рутения и, как следствие, на влияние катодной защиты в целом.

Ключевые слова: модифицированные титановые сплавы, рутений, поковки, коррозионная стойкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-51-62

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В., Чечулин Б. Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.

2. Горынин И. В., Ушков С. С., Хатунцев А. Н., Лошакова Н. И. Титановые сплавы для морской техники. – СПб.: Политехника. – 2007. – 387 с.
3. Ушков С. С. Подводная лодка пр.661 – первая в мире цельно-титановая субмарина // По пути созидания. Т. 1. / Под ред. акад. И. В. Горынина, ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. – 253 с.
4. Grauman J. Titanium and titanium alloy environmental behaviour aspects for application to offshore oil & gas production // Originally presented at a seminar “Titanium risers and flowlines”. Trondheim, 17 February 1999.
5. Чечулин Б. Б. Парогенераторы – борьба за ресурс // По пути созидания / Под ред. акад. И. В. Горынина. Т. 1. – СПб.: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. – 255 с.
6. Бахметьев А. М., Сандлер Н. Г., Былов И. А., Бакланов А. В., Кашка М. М., Филимошкин С. В. Анализ возможных причин и механизмов отказов трубных систем парогенераторов атомных судов // Арктика: экология и экономика. – 2013. – № 3(11). – С. 97–101.
7. Кашка М. М., Мантула Н. В., Пономаренко А. В. Опыт и перспективы эксплуатации в Арктике атомного ледокольного флота России // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 3(7). – С. 84–91.
8. Томашов Н. Д. Титан и коррозионно-стойкие сплавы на его основе. – М.: Metallurgia, 1985. – 80 с.
9. Электронный ресурс: URL: <https://www.metaltorg.ru/>, <http://gold-silver.ru/> (дата обращения 15.01.2021 г.)
10. Leonov V. P., Chudakov E. V., Malinkina Yu. Yu. The influence of micro additives of ruthenium on the structure, corrosive-mechanical strength and fractography of pseudo-alpha-titanium alloys // Inorganic Materials: Applied Research. – 2017. – V. 8, N 4. – P. 556–565.
11. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшин И. С. Титановые сплавы. Состав. Структура. Свойства. Справочник. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
12. Schutz R. W. Minor ruthenium additions produce cost effective corrosion resistant commercial titanium alloys // Platinum metals review. – 1996. – V. 40, N 2. – P. 54–61.
13. Scherbini V. F., Leonov V. P., Malinkina Yu. Yu. Increase in corrosion resistance of titanium alloy in concentrated aqueous solutions of chlorides at high temperatures // Inorganic Materials: Applied Research. – 2013. – V. 4, Is. 6. – P. 537–541.
14. Леонов В. П., Чудаков Е. В., Малинкина Ю. Ю., Третьякова Н. В., Петров С. Н., Цеменко А. В., Васильева Е. А. Исследование особенностей распределения рутения в титановых α -, псевдо- α - и псевдо- β -сплавах и влияние его на коррозионную стойкость // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3 (103) – С. 39–52.
15. Леонов В. П., Чудаков Е. В., Малинкина Ю. Ю. Влияние микродобавок рутения на структуру, коррозионно-механическую прочность и фразографию разрушения титановых псевдо- α -сплавов // Материаловедение. – 2017. – № 1. – С. 3–11.
16. Леонов В. П., Чудаков Е. В., Малинкина Ю. Ю. Влияние рутения на структуру, коррозионно-механические свойства и усталостные характеристики титановых α -сплавов в коррозионной среде // Вопросы материаловедения. – 2016 – № 4 (88). – С. 109–119.
17. Малинкина Ю. Ю. Использование рутения для повышения коррозионной стойкости в агрессивных средах промышленных сплавов титана // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 1(65). – С. 162–166.

УДК 669.295:621.791

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО СПЛАВА ТИТАНА

В. И. МИХАЙЛОВ, д-р техн. наук, И. Р. КОЗЛОВА, канд. техн. наук, С. В. КУЗНЕЦОВ,
Ю. М. МАРКОВА, Е. А. ВАСИЛЬЕВА

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

Поступила в редакцию 13.07.2021

После доработки 24.08.2021

Принята к публикации 25.08.2021

Исследовано изменение фазового состава и структурного состояния в процессе термического цикла сварки высоколегированного сплава титана. Показано, что структурно-фазовые превращения, происходящие в металле сварного соединения под воздействием термического и деформационного циклов сварки, приводят к образованию метастабильных фаз, последующий распад которых может привести к потере пластичности. Для приведения металла сварного соединения в равновесное состояние требуется проведение стабилизирующего отжига.

Ключевые слова: титановые сплавы, сварное соединение, электронно-микроскопическое исследование, структура, метастабильные фазы, выделение вторичных фаз, микротвердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-63-81

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 367 с.
2. Горынин И. В., Ушков С. С., Хатунцев А. Н., Лошакова Н. И. Титановые сплавы для морской техники. – СПб.: Политехника, 2007. – 387 с.
3. Моисеев В. Н., Куликов Ф. Р., Кириллов Ю. Г., Шолохова Л. В., Васькин Ю. В. Сварные соединения титановых сплавов (структура и свойства). – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
4. Козлов Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1986. – 161 с.
5. Козлова И. Р., Чудаков Е. В., Третьякова Н. В., Маркова Ю. М., Васильева Е. А. Влияние термической обработки на формирование структуры и уровень механических свойств высоколегированного сплава титана // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 4 (100). – С. 28–41.
6. Лясоцкая В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. – М.: Экомет, 2003. – 352 с.
7. Грабин В. Ф. Структура и свойства сварных соединений из титановых сплавов. – Киев: Наукова думка, 1964. – 105 с.
8. Грабин В. Ф. Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов. – Киев: Наукова Думка, 1975. – 260 с.
9. Шоршоров М. Х., Куликов Ф. Р., Кириллов Ю. Г., Мещеряков В. Н. Влияние сварки и термообработки на структуру и свойства высокопрочных сплавов титана // Сплавы титана с особыми свойствами. – М.: Наука, 1982. – С. 87–96.
10. Шоршоров М. Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. – М.: Наука, 1965. – 335 с.
11. Чечулин Б. Б., Хесин Ю. Д., Белова О. С., Суркова А. П. Морфологические особенности структуры α -сплавов титана после охлаждения из β -области с различными скоростями // Сплавы титана с особыми свойствами. – М.: Наука, 1982. – С. 68–73.
12. Лукин В. И., Лоскутов В. М., Редич В. В. Присадочные материалы для сварки конструктивных титановых сплавов // Сварочное производство. – 2002. – № 5 – С. 37–41.
13. Чечулин Б. Б., Ушаков С. С., Разуваева И. Н., Гольдфайн В. Н. Титановые сплавы в машиностроении. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977.

УДК 621.763:001.891

ИННОВАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ НАУЧНОГО НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕНТРА НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ЦНИИ КМ «ПРОМЕТЕЙ»

Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ, О. В. ВАСИЛЬЕВА, канд. техн. наук,
А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, А. В. КРАСИКОВ, канд. хим. наук,

П. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, Е. А. САМОДЕЛКИН, И. В. УЛИН, канд. техн. наук,
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 29.06.2021

После доработки 8.07.2021

Принята к публикации 27.07.2021

Приведены результаты комплексных инновационных исследований, проведенных за последние годы в научном нанотехнологическом центре НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» в следующих направлениях: создание покрытий на основе квазикристаллов системы Al–Cu–Fe, технологий лазерного синтеза, систем электромагнитной защиты технических средств и биологических объектов, конструкционной керамики и композиционных материалов, технологий модификации поверхности и магнетронного напыления, получение порошков методом распыления расплава, водородная и альтернативная энергетика.

Ключевые слова: квазикристаллы, лазерный синтез, электромагнитная защита, композиционные материалы, модификация поверхности, магнетронное напыление, водородная и альтернативная энергетика

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-82-108

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Отв. ред. Ж. И. Алферов и др. – СПб: Изд-во ИП Пермяков С.А., 2015. – 543 с.
2. Векилов Ю. Х., Исаев Э. И. Структура и физические свойства квазикристаллов / Сб. докл. Первого всероссийского совещания по квазикристаллам, 2003. – С. 5–9.
3. Векилов Ю. Х., Черников М. А. Квазикристаллы // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180, № 6. – С. 561–586.
4. Патент РФ № 2664010 Способ получения сотового тонкостенного энергопоглотителя с помощью лазерного спекания / Бобырь В. В., Владимиров С. В., Деев А. А., Жуков А. С., Кузнецов П. А., Мадин В. В., Петраускене Я. В., Сапожников В. И. Опубликовано 14.08.2018 // Бюлл. № 23.
5. Барахтин Б. К., Жуков А. С., Бобырь В. В., Шакиров И. В., Кузнецов П. А. Факторы повышения прочности металлов, полученных селективным лазерным сплавлением порошков // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3(95). – С. 68–75.
6. Кузнецов П. А., Жуков А. С., Бобырь В. В. Энергопоглощающие свойства сотовых структур с различной толщиной стенки, изготовленных методом селективного лазерного сплавления // Тр. IV Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее», 30 марта 2018 г., Москва, ВИАМ.
7. Shakirov I., Kuznetsov P., Bobyr V., Zhukov A., Dub A., Shchurenkova S. Creating an element of the reactor vessel internals of the VVER by directed metal deposition (DMD) methods // Materials Today: Proceedings. – 2020. – V. 38, part 4. – P. 1946–1951.
8. Жуков А. С., Камынин А. В., Гавриков И. С., Барахтин Б. К., Кузнецов П. А. Мультифрактальный анализ и магнитные свойства аддитивного магнитотвердого сплава 25X15KA // Вестник машиностроения. – 2021. – № 1. – С. 60–63.
9. Экранирующая камера для ослабления магнитного поля земли на основе рулонных магнитных материалов / С. А. Гудошников, П. А. Кузнецов, С. А. Маннинен и др. // Измерительная техника. – 2012. – № 3. – С. 58–61.
10. Маннинен С. А., Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В., Жуков А. С. Экранирование подземных кабельных линий для обеспечения электромагнитной экологии // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2013. – Вып. 1, 2 (46). – С. 199–205.
11. Жуков А. С., Васильева О. В. Модульные магнитные экраны и экранирующие конструкции на их основе для защиты от постоянных и переменных магнитных полей // Труды 12-й международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии, порошковая металлур-

гия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка». 25–27 мая 2016 г., г. Минск (РБ), Институт порошковой металлургии.

12. Патент РФ № 2655377 Многослойный магнитный и электромагнитный экран для защиты от излучения силовых кабелей / Васильева О. В., Жуков А. С., Кузнецов П. А., Мазеева А. К., Фармаковский Б. В., Шуранова В. С. Опубликовано: 28.05.2018 // Бюлл. № 16.

13. Патент РФ № 2636269 Способ получения магнитного и электромагнитного экрана / Васильева О. В., Жуков А. С., Кузнецов П. А., Мазеева А. К., Маннинен С. А., Песков Т. В., Фармаковский Б. В. Опубликовано 21.11.2017 // Бюлл. № 33.

14. Патент РФ № 2644399 Композиционный радиопоглощающий материал и способ его изготовления / Васильева О. В., Ешметьева Е. Н., Климов В. Н., Кузнецов П. А., Повышев А. М., Петраускене Я. В., Самоделкин Е. А. Опубликовано 12.02.2018 // Бюлл. № 5.

15. Shikunov, S. L., Kurlov, V. N. SiC-Based Composite Materials Obtained by Siliconizing Carbon Matrices // Technical Physics. – 2017. – V. 62(12). – P. 1869–1876.

16. Markov M. A., Perevislov S. N., Krasikov A. V., Gerashchenkov D. A., Bykova A. D., Fedoseev M. L. Study of the microarc oxidation of aluminum modified with silicon carbide particles // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2018. – T. 91, № 4. – P. 543–549.

17. Markov M. A., Krasikov A. V., Bykova A. D., Staritsyn M. V., Ordan'yan S. S., Vikhman S. V., Perevislov S. N. Preparation of MoSi₂-SiC-ZrB₂ structural ceramics by free sintering // Refractories and Industrial Ceramics. – 2019. – V. 60, № 4. – P. 385–388.

18. Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Геращенко Е. Ю., Геращенко Д. А., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. Наноструктурированные композиционные порошки для получения защитных покрытий деталей и узлов машиностроения // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 1 (105). – С. 52–59.

19. Бобкова Т. И., Григорьев А. А., Жиров Д. С. Разработка композиционных порошков и покрытий для защиты и восстановления изделий, претерпевающих существенное температурное воздействие в процессе эксплуатации // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3 (103). – С. 70–79.

20. Bobkova T. I., Farmakovskiy B. V. Wear- and Corrosion-Resistant Functionally Gradient Coatings Based on Composite Powders of Metal-Nonmetal System // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – V. 9, N 6. – P. 1096–1099.

21. Заявка на патент РФ № 2018130610 от 23.08.2018. Способ получения градиентного композиционного покрытия и композиционного порошка на основе алюминия с нитридом кремния для его напыления / Бобкова Т. И., Соколова Н. А., Фармаковский Б. В.

22. Патент РФ № 2573309 от 08.07.2014 Способ получения композиционного армированного порошкового материала / Бобкова Т. И., Деев А. А., Елисеев А. А., Климов В. Н., Самоделкин Е. А., Черныш А. А., Юрков М. А., Опубликовано 20.01.2016 // Бюлл. № 2.

23. Патент РФ № 2568555 от 08.07.2014 Способ получения наноструктурированного конгломерированного порошкового материала для нанесения покрытий методами газодинамического и газотермического напыления / Бобкова Т. И., Деев А. А., Елисеев А. А., Климов В. Н., Юрков М. А., Черныш А. А. Опубликовано 20.11.2015 // Бюлл. № 32.

24. Investigation of the intermetallic coating of the Ni-Fe system obtained by surface laser treatment on a steel substrate / D. A. Gerashchenkov et al. // J. Phys. Conf. Ser. IOP Publishing. – 2021. – V. 1758, N 1. – P. 12011.

25. Study of the method of obtaining functional interest-metallic coatings based on Ni-Ti reinforced with WC nanoparticles / A. M. Makarov et al. // Key Engineering Materials. – 2019. – V. 822.

26. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / Под ред. В. М. Фомина. – М.: Физматлит, 2009. – 536 р.

27. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю. Исследование адгезионной прочности композиционных армированных покрытий системы металл – неметалл, полученных методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 1 (77). – P. 103–117.

28. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Машек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – P. 87–96.

29. Патент РФ № 2354749 С2 Способ получения наноструктурированных функционально-градиентных износостойких покрытий / Горынин И. В. Фармаковский Б. В. Геращенко Д. А., Васильев А.Ф. Опубликовано 20.10 2009.
30. Oryshchenko A. S., Gerashchenkov D. A. Aluminum matrix functional coatings with high microhardness on the basis of Al–Sn + Al₂O₃ composite powders fabricated by cold gas dynamic spraying // *Inorg. Mater. Appl. Res.* – 2016. – V. 7, N 6.
31. Technological aspects of obtaining functional gradient coatings to protect machinery from wear / D. A. Gerashchenkov et al. // *Key Engineering Materials.* – 2019. – V. 822.
32. Investigation of the influence of laser treatment modes on coatings of aluminum, nickel–titanium systems / A. M. Makarov et al. // *J. Phys. Conf. Ser. IOP Publishing.* – 2021. – V. 1758. – P. 12024.
33. Ешметьева Е. Н., Беляков А. Н., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Красиков А. В., Фармаковский Б. В. Магнетронное напыление функционально-градиентных покрытий системы Ti–Ru–O для систем очистки воды // *Вопросы материаловедения.* – 2014. – № 3 (79). – С. 90–96.
34. Бобкова Т. И., Ешметьева Е. Н., Фармаковская А. Я. Многослойные износостойкие и коррозионно-стойкие наноструктурированные функционально-градиентные покрытия, полученные методом магнетронного напыления // *Вопросы материаловедения.* – 2014. – № 3 (79). – С. 79–89.
35. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Васильева О. В., Васильев А. Ф., Виноградова Т. С., Ешметьева Е. Н., Мухамедзянова Л. В., Самоделкин Е. А., Кузнецов П. А. Биотехнические исследования, проводимые в научном нанотехнологическом центре ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» // *Вопросы материаловедения.* – 2016. – № 3(87). – С. 82–96.
36. Беляков А. Н., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Ешметьева Е. Н., Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Особенности формирования покрытий системы Ti–Ru–O методом вакуумного магнетронного напыления на постоянном токе // *Вопросы материаловедения.* – 2017. – № 1(89). – С. 115–122.
37. Быстров Р. Ю., Беляков А. Н., Кузнецов П. А. Ешметьева Е. Н. Активное покрытие на основе оксидов титана и рутения для систем очистки воды // Тезисы докладов «XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии», Уральское отделение РАН, 2016. – С. 271.
38. Кузнецов П. А., Шакиров И. В., Бобырь В. В., Жуков А. С., Климов В. Н. Особенности газового распыления расплава и селективного лазерного сплавления порошков высокопрочной аустенитной азотсодержащей стали // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2020. – № 1 (775) . – С. 76–80.
39. Земляницын Е. Ю., Самоделкин Е. А., Коркина М. А., Фармаковский Б. В. Получение плакированного порошка на дезинтеграторе с новой конструкцией ротора // *Вопросы материаловедения.* – 2019. – № 4 (100). – С. 91–96.
40. Баракова Н. В., Самоделкин Е. А., Луневская Я. И., Мартыненко В. Е. Применение ударно-активаторно-дезинтеграторной обработки (УДА-обработки) для подготовки зернового сырья при конструировании продуктов питания с повышенной усвояемостью // *Материалы конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке», 2015.* – С. 247–250.
41. Патент РФ № 2670156 Способ получения этилового спирта / Алимova Д. С., Баракова Н. В., Самоделкин Е. А., Сложеникин Е. В., Романов В. А. Опубликовано 18.10.2018 // Бюлл. № 29.
42. Литвиненко В. С., Цветков П. С., Двойников М. В., Буслаев Г. В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // *Записки Горного института.* – 2020. – Т. 244. – С. 428–438.
43. Патент РФ на изобретение № 2680144 Носитель катализатора на металлической основе / Геращенко Д. А., Красиков А. В., Улин И. В., Яковлева Н. В., Марков М. А., Шишкова М. Л. Опубликовано 18.02.2019 // Бюлл. № 5.
44. Виноградова Т. С., Гюлиханданов Е. Л., Улин И. В., Фармаковский Б. В., Яковлева Н. В. Каталитически активные порошковые композиции для систем снижения токсичности вредных выбросов в атмосферу // *Вопросы материаловедения.* – 2019. – №3 (99). – С. 51–60.
45. Шишкова М. Л., Яковлева Н. В. Каталитически активные покрытия для систем паровой конверсии природного газа: синтез и каталитические свойства // *Вопросы материаловедения.* – 2018. – № 1 (94). – С. 96–105.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОКРЫТИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ Al–Cr–Ni–Co–Fe НА СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРА

Р. Ю. БЫСТРОВ, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 3.08.2021

После доработки 3.09.2021

Принята к публикации 8.09.2021

В последние годы уникальные физико-механические свойства высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС) являются предметом повышенного внимания исследователей. Изучение термодинамических характеристик ВЭС может представлять интерес для формулировки принципов формирования структур материала с необходимыми функциональными характеристиками. Поскольку процессы структуро- и фазообразования, а также диффузионная подвижность атомов, механизм формирования механических свойств и термическая стабильность существенно отличаются от аналогичных процессов в традиционных сплавах, ВЭС выделены в особую группу материалов.

В работе представлен краткий обзор результатов получения высокоэнтропийного сплава комбинированным способом. На первом этапе методом ХГДН наносится прекурсорный слой, на втором он подвергается высокоэнергетическому воздействию с использованием лазера. Изучен высокоэнтропийный сплав типа Al–Cr–Ni–Co–Fe. При вариации соотношения компонентов удалось получить практически эквимольный состав для данной системы.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, прекурсорный слой, метод ХГДН, лазер, эквимольный состав, термодинамические характеристики

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-109-117

ЛИТЕРАТУРА

1. Ang A. S. M., Berndt C. C. A Review of Testing Methods for Thermal Spray Coatings // *Int. Mater. Rev.* – 2014. – V. 59, N 4.
2. Davis J. R. Handbook of Thermal Spray Technology, 1st ed. – ASM International, Materials Park, 2004.
3. Renner M. Thermal Spray Coating Applications in the Chemical Process Industries // *Materials and Corrosion.* – 1995. – V. 46, N 11.
4. Cantor B., Chang I. T. H., Knight P., Vincent A. J. B. Microstructural Development in Equiatomic Multicomponent Alloys // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2004. – P. 375–377(1–2).
5. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // *Adv. Eng. Mater.* – 2004. – V. 6, N 5.
6. Chuang M. H., Tsai M. H., Wang W. R., Lin S. J., Yeh J. W. Microstructure and Wear Behavior of $Al_xCo_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_y$ High-Entropy Alloys // *Acta Mater.* – 2011. – V. 59, N 16.
7. Butler T. M. Phase Stability and Oxidation Behavior of Al–Ni–Co–Cr–Fe Based High-Entropy Alloys, Ph.D. Thesis, The University of Alabama, 2016.
8. Haas S., Mosbacher M., Senkov O. N., Feuerbacher M., Freudenberger J., Gezgin S., Völkl R., Glatzel U. Entropy Determination of Single-Phase High Entropy Alloys with Different Crystal Structures Over a Wide Temperature Range // *Entropy.* – 2018. – V. 20, N 9.
9. Pogrebnyak A. D., Bagdasaryan A. A., Yakushchenko I. V., Beresnev V. M. The Structure and Properties of High-Entropy Alloys and Nitride Coatings Based on Them // *Russ. Chem. Rev.* – 2014. – V. 83, N 11.
10. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Alkhimov A., Fomin V. M. Cold Spray Technology. – Elsevier Ltd., 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045155-8.X5000-5>.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «ХОЛОДНОГО» ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ КАК АДДИТИВНОГО СПОСОБА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ И АЛЮМИНИДА ТИТАНА

Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 3.08.2021

После доработки 6.09.2021

Принята к публикации 8.09.2021

Аддитивная технология производства металлов широко изучается из-за ее уникальных преимуществ по сравнению с традиционными производственными процессами. Она применяется для формирования сложных компонентов сплавов Ti, Fe или Ni, для цветных сплавов – алюминиевых, магниевых, медных – аддитивные технологии не используют из-за быстрого плавления при обработке лазером, электронным лучом и/или дугой. «Холодное» напыление широко применяется в качестве эффективной технологии нанесения высококачественных покрытий при массовом производстве изделий из металлов и сплавов и/или композитных покрытий с металлической матрицей. Кроме того, «холодное» напыление является эффективным инструментом для аддитивного производства металлов, и в настоящее время исследования в данном направлении становятся интенсивными. В работе показано, что применение технологии «холодного» напыления позволяет получать композиционные материалы на основе алюминия и титана, армированные карбидом бора. Выбранный в качестве армирующей компоненты диоксид циркония не удалось ввести в состав композита на основе алюминия и никеля, что, скорее всего, объясняется крупным размером частиц. В результате термической обработки материалов, полученных по технологии «холодного» напыления, образуются новые химические соединения – как интерметаллиды, так и керамические упрочняющие включения, что наблюдается в системе алюминид титана. При этом примерно в 7 раз повышается микротвердость, но уменьшаются линейные размеры, чего не наблюдается в системе на основе алюминид никеля. Уменьшение геометрических размеров в образцах алюминид титана после термической обработки необходимо учитывать при изготовлении деталей.

Ключевые слова: аддитивная технология, «холодное» газодинамическое напыление, интерметаллидные соединения, микротвердость, рентгеноструктурный фазовый анализ

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-118-127

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibson D., Rosen B. S. Additive Manufacturing Technologies. – New York: Springer International Publishing, 2010. – 675 p.
2. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D. D. Gu et al. // Int. Mater. Rev. Taylor & Francis. – 2012. – V. 57, N 3. – P. 133–164.
3. Murr Lawrence E. Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication // J. Mater. Sci. Technol. – 2016. – V. 32, N 10. – P. 987–995.
4. Cold spraying – a materials perspective / H. Assadi et al. // Acta Mater. – 2016. – V. 116. – P. 382–407.
5. Papyrin A. Cold spray technology // Adv. Mater. Process. – 2001. – V. 159. – P. 49–51.
6. Analysis of Thermal History and Residual Stress in Cold-Sprayed Coatings / Z. Arabgol et al. // J. Therm. Spray Technol. – 2014. – V. 23, N 1. – P. 84–90.
7. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review / W. Li et al. // J. Mater. Sci. Technol. The editorial office of Journal of Materials Science & Technology. – 2018. – V. 34, N 3. – P. 440–457.
8. Ziemian C. W., Wright W. J., Cipoletti D. E. Influence of Impact Conditions on Feedstock Deposition Behavior of Cold-Sprayed Fe-Based Metallic Glass // J. Therm. Spray Technol. Springer US. – 2018. – V. 27, N 5. – P. 843–856.
9. Karmakar R., Maji P., Ghosh S. K. A Review on the Nickel Based Metal Matrix Composite Coating // Metals and Materials International. – Korean Institute of Metals and Materials, 2020.

10. Champagne V., Helfritch D. The unique abilities of cold spray deposition // *Int. Mater. Rev.* Taylor & Francis. – 2016. – V. 61, N 7. – P. 437–455.
11. Residual stress development in cold sprayed Al, Cu and Ti coatings / T. Suhonen et al. // *Acta Mater.* – 2013. – V. 61. – P. 6329–6337.
12. Comparison of the Properties of Cold-Sprayed Cu–0.5Cr–0.05Zr Alloys after Various Heat Treatments Versus Forged and Vacuum Plasma-Sprayed Alloys / P. Coddet et al. // *J. Therm. Spray Technol.* – 2014. – V. 23, N 3. – P. 486–491.
13. Mechanical Properties of Cu–0.1Ag Alloys Deposited by Cold Spray with Various Powder Feed Rate and Heat Treatment / P. Coddet et al. // *J. Therm. Spray Technol.* – 2015. – V. 24, N 1. – P. 119–125.
14. The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them / A.D. Pogrebnyak et al. // *Russ. Chem. Rev. Turpion-Moscow Limited.* – 2014. – V. 83, N 11. – P. 1027–1061.
15. Bagherifard S., Roscioli G., Zuccoli M.V., Hadi M., D'Elia G., Demir A. G., Previtali B., Kondás J., Guagliano M. Cold spray deposition of freestanding inconel samples and comparative analysis with selective laser melting // *J. Therm. Spray Technol.* – 2017. – V. 26. – P. 1517–1526.
16. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Мачек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе «холодного» газодинамического напыления функциональных покрытий // *Вопросы материаловедения.* – 2014. – Т. 2, № 77. – С. 87–96.
17. Zhao H., Bing C. Formation of TiB₂-TiC Composites by Reactive Sintering // *Ceram. Int.* – 1999. – V. 25. – P. 353–358.
18. Pan C., Zhang J., Zhu B. Structure formation and densification of TiB₂-TiC-Ni composites produced by chemical reaction of Ti-B 4 C system in high-gravity field // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2018. – V. 382. – P. 22049.

УДК 678.074

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ РЕЗИН НА ОСНОВЕ ГИДРИРОВАННЫХ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНЫХ КАУЧУКОВ

Е. А. ХОРОВА^{1,2}, Е. Н. ЕРЕМИН², д-р техн. наук, Е. А. СТРИЖАК¹, канд. хим. наук

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

² ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»,
644050, Омск, пр. Мира, д. 11

Поступила в редакцию 9.02.2021

После доработки 16.07.2021

Принята к публикации 27.07.2021

Представлены результаты исследований резин на основе гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков марок Therban AT 5065 VP, Therban AT 5005 VP различной степени ненасыщенности и их совмещенных композиций с помощью оптической микроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии, динамического механического анализа. С их помощью получены оперативные данные о функциональных свойствах нитрильных резин, не прибегая к длительным испытаниям при различных температурах. Установлено, что в резинах с увеличением доли Therban AT 5005 VP от 20 до 50 мас. ч. возрастает степень диспергирования наполнителя от 61,8 до 90,5% и повышается температура начала деструкции от 261,9 до 275,3°C. Показано, что при минимальной (–30°C) и максимальной (150°C) температурах резина с соотношением каучуков 50:50 к окончанию эксперимента имеет наименьший динамический модуль упругости (311 и 1,6 МПа соответственно) и низкий тангенс угла механических потерь (0,20).

Ключевые слова: гидрированные бутадиен-нитрильные каучуки, смеси полимеров, микроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия, динамический механический анализ

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-128-135

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысова Г. А., Донцов А. А. Гидрированные бутадиен-нитрильные каучуки. Свойства. Рецептуростроение. Применение: тематический обзор // Производство резинотехнических и асбестотехнических изделий. – Вып. 6. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991. – 56 с.
2. Большой справочник резинщика. Ч. 1: Каучуки и ингредиенты / Агаянц И. М. и др / Под ред. С. В. Резниченко, Ю. Л. Морозова. – М.: Техинформ, 2012. – 735 с.
3. Трибельский И. А., Шалай В. В., Зубарев А. В., Трибельский М. И. Расчетно-экспериментальные методы проектирования сложных резинокордных конструкций: Монография. – Омск: ОмГТУ, 2011. – 240 с.
4. Гидрированный бутадиен-нитрильный каучук. – Текст: электронный. – URL: <http://rezinoviy-compensator.ru/hydrogenated-nbr-hnbr-hbnr.html>, дата обращения 6 сентября 2021.
5. Khorova E. A., Razdyakonova G. I., Khodakova S. Ya. Effect of the structure of hydrogenated butadiene-nitrile rubber on the resistance to aggressive media and high temperatures // Procedia Engineering. – 2016. – V. 152. – P. 556–562. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.655.
6. Хорова Е. А., Мышлявцев А. В. Применение гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков в составе изделий, эксплуатируемых в условиях воздействия повышенных температур и агрессивных сред // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3 (95). – С. 129–136. DOI: 10.22349/1994-6716-2018-95-3-129-136.
7. Хорова Е. А., Мышлявцев А. В., Стрижак Е. А., Третьякова Н. А. Исследование гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков методами дифференциальной сканирующей калориметрии и динамического механического анализа // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 1. – С. 11–16.
8. ASTM D7723–11 Standard test method for rubber property-macro-dispersion of fillers in compounds.
9. Жовнер Н. А., Чиркова Н. В., Хлебов Г. А. Структура и свойства материалов на основе эластомеров. – Омск: РосЗИТЛП. Филиал, 2003. – 276 с.
10. Черникова Е. В., Ефимова А. А., Спиридонов В. В. Спецпрактикум по физико-химическим и физико-механическим методам исследования полимеров. Ч. 1: Теория. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. – 112 с.
11. Сутягин В. М., Бондалетова Л. И. Химия и физика полимеров. – Томск: ТПУ, 2003. – 208 с.
12. Кузьминский А. С., Любчанская Л. И., Дегтева Т. Г. Метод ускоренного определения гарантийных сроков хранения резин // Каучук и резина. – 1963. – № 4. – С. 17–20.
13. Хорова Е. А., Еремин Е.Н., Вакулов Н.В. Прогнозирование изменения свойств резин на основе гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков при термическом старении в агрессивных средах // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 2 (102). – С. 149–155. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-102-2-149-155.
14. Каблов В. Ф., Новопольцева О. М. Смеси полимеров, термодинамика, получение, применение [Электронный ресурс]: Учебное пособие. – Волжский: ВПИ (филиал) ВолгГТУ, 2018.
15. Schawe J. Curve interpretation. Part 6: Variation of DMA measurement conditions. Thermal Analysis User Com 43. – URL: <https://www.mt.com/us/en/home/library/usercoms/lab-analytical-instruments/thermal-analysis-UserCom-43.html> (reference date 06/09/2021).

УДК 666.166:621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ АРМИРУЮЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

Е. Д. КОЛПАЧКОВ¹, канд. техн. наук, П. С. МАРАХОВСКИЙ¹, д-р техн. наук, А. П. ПЕТРОВА¹,
П. А. ЩУР², С. Л. ЛОНСКИЙ¹, И. Ю. ЧЕРНЯЕВА², канд. техн. наук, А.В. ШВЕДОВ²

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

² ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Поступила в редакцию 16.06.2021

После доработки 28.06.2021

Принята к публикации 28.07.2021

Представлены результаты исследования гидрофильных свойств стеклянных нитей марки ВМПС-10 84×4 и углеродных жгутов марки SYT-49S 12K. Установлено, что краевой угол смачивания стеклянных и углеродных волокон, уменьшающийся после ионно-плазменной обработки, возвращается к исходным значениям в течение 8 сут. Значения капиллярности волокон обоих типов необратимо увеличиваются, но для углеродных волокон наблюдается более значительное изменение данного параметра. В ходе исследования микроструктуры поверхности волокон наполнителей до и после обработки установлено, что все образцы равномерно покрыты пленкой активного замасливателя с микродисперсной структурой, однако для стеклянных волокон размер частиц аппрета в ходе обработки увеличивается, а для углеродных волокон – уменьшается. Также были проведены теплофизические исследования исследуемых армирующих наполнителей и было установлено, что в ходе ионно-плазменной модификации протекает эрозия пленки аппрета.

Ключевые слова: ионно-плазменная обработка в вакууме, ионно-плазменная обработка при атмосферном давлении, краевой угол смачивания, капиллярность, микроструктура поверхности

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-136-149

ЛИТЕРАТУРА

1. Башаров Е. А., Вагин А. Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов // Труды МАИ. – 2017. – № 92. – С. 1–33.
2. Бузник В. М., Каблов Е. Н. Арктическое материаловедение. – Томск: ИД Томского государственного университета. – 2018. – 44 с.
3. Каблов Е. Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. – 2012. – № 3. – С. 10–15.
4. Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. – 2012. – № 6. – С. 520–530.
5. Липатов Ю. С. Межфазные явления в полимерах. – Киев: Наук. Думка, 1980. – 259 с.
6. Гуляев А. И. Измерение адгезионной прочности «волокно–матрица» с применением наноиндентирования (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. – № 3 Ст.75. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 02.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78.
7. Гуляев А. И., Медведев П. Н., Сбитнева С. В., Петров А. А. Экспериментальное исследование по оценке адгезионной прочности «волокно–матрица» в углепластиках на основе эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 4. С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
8. Кудрявцева А. Н., Терехов И. В., Гуревич Я. М., Григорьева К. Н. Модификация эпоксидных связующих для ПКМ резорцином // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – № 2. Ст.04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 02.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-35-42.
9. Котомин С. В. Оценка адгезионной прочности связи волокно – термопластичная матрица методом петли // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2015. – №12 (48). – С. 1–10. URL: <https://cyberleninka.ru> (дата обращения: 13.03.2021).
10. Богданова Ю. Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов // Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы». – М.: МГУ, 2010. – 68 с.
11. Курносов А. О., Вавилова М. И., Мельников Д. А. Технологии производства стеклянных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 1. – С. 64–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70.

12. Тихомиров А. С., Сорокина Н. Е., Авдеев В. В. Модифицирование поверхности углеродного волокна растворами азотной кислоты // Неорганические материалы. – 2011. – № 6 (47). – С. 684–688.
13. Li J., Sun F. F. The effect of nitric acid oxidization treatment on the interface of carbon fiber-reinforced thermoplastic polystyrene composite // Polym.-Plast. Technol. and Eng. – 2009. – N 7 (48). – P. 711–715.
14. Vinke P., Vander Eijk M., Verbree M., Voskamp A. F., Van Bekkum H. Modification of the surfaces of a gas activated carbon and a chemically activated carbon with nitric acid, hypochlorite and ammonia // Carbon. – 1994. – V. 32, N 4. – P. 675–686.
15. Moreno-Castilla C., Ferro-Garcia M. A., Joly J. P., Bautista-Toledo I., Carrasco-Marin F., Rivera-Utrilla J. Activated carbon surface modifications by nitric acid, hydrogen peroxide and ammonium peroxydisulfate treatments // Langmuir. – 1995. – V. 11, N 11. – P. 4386–4392.
16. Сергеева Е. А. Ибатуллина А. Р. Изменение поверхностных и физико-механических свойств арамидных волокон, модифицированных потоком плазмы высокочастотного емкостного разряда пониженного давления // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 4. – С. 63–66.
17. Гарифуллин А. Р. Исследование свойств углеродных волокон, модифицированных высокочастотным емкостным разрядом // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 18. – С. 32–34.
18. Гарифуллин А. Р., Абдуллин И. Ш. Плазменная гидрофилизация углеродной ленты для создания композиционных материалов с повышенными прочностными характеристиками // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 17. – С. 101–102.
19. Гарифуллин А. Р., Абдуллин И. Ш., Скидченко Е. А. Исследование плазменного воздействия на прочность соединения углеродного волокна с эпоксидной матрицей при получении композиционных материалов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 21. – С. 69–70. URL: <https://cyberleninka.ru> (дата обращения: 13.03.2021).

УДК 620.197.5:629.561.5

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ КОРПУСОВ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ И АРКТИЧЕСКИХ МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Г. И. НИКОЛАЕВ, д-р хим. наук, Ю. Л. КУЗЬМИН, д-р техн. наук, И. В. ЛИШЕВИЧ, канд. техн. наук,
О. А. СТАВИЦКИЙ, канд. техн. наук, А. В. ПОДШИВАЛОВ, П. И. МАЛАШЕВ

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

Поступила в редакцию 25.06.2021

После доработки 27.07.2021

Принята к публикации 28.07.2021

Приведены результаты разработок и внедрения на атомных ледоколах и морских сооружениях специальных ледостойких анодов, способных обеспечивать долговременную эффективную работу систем катодной защиты от коррозии в условиях ударного и истирающего воздействия арктических льдов. Показаны результаты осмотров состояния корпуса и корпусных элементов катодной защиты атомного ледокола «50 лет Победы» и МЛСП «Приразломная» после их длительной эксплуатации. Описывается проектируемая система катодной защиты атомного ледокола «Лидер».

Ключевые слова: атомные ледоколы, арктические морские сооружения, катодная защита от коррозии, ледостойкие аноды

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-150-162

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратов Н. А. Освоение Арктики: стратегические интересы России // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2014. – № 1. – С. 120–126.

2. Алексашин А. А., Половинкин В. Н. Современное состояние и перспективы развития ледового судостроения и судоходства // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 1 (17). – С. 18–30.
3. Развитие морской деятельности в российской Арктике / В. С. Никитин, В. Н. Половинкин, Ю. М. Иванов и др. // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 2 (18). – С. 86–95.
4. Атомная энергетика в арктическом регионе / В. С. Никитин, В. Н. Половинкин, Ю. А. Симонов и др. // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 4 (20). – С. 86–95.
5. Горынин И. В. Конструкционные материалы для освоения арктического шельфа // Вестник Российской академии наук. – 1999. – Т. 69, № 1. – С. 8–15.
6. Цой Л., Легостаев Ю., Кузьмин Ю. Ледокол XXI века или ржавый утюг? // Морской флот. – 2014. – № 4. – С. 42–52.
7. Суров О. Э., Компанец В. А. Исследование характера коррозионного разрушения листов наружной обшивки ледового пояса судов из стали 09Г2 // Черные металлы. – 2015. – № 10. – С. 39–44.
8. Кузьмин Ю. Л., Орыщенко А. С. Коррозия и электрохимическая защита морских судов. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2017. – С. 239–248.
9. Материалы для судостроения и морской техники: Справочник. Т. 2, разд. 7.3: Электрохимическая защита судов от коррозии / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2009. – С. 588–625.
10. Бибииков Н. Н., Люблинский Е. Я., Поварова Л. В. Электрохимическая защита морских судов от коррозии. – Л.: Судостроение, 1971.
11. Люблинский Е. Я. Электрохимическая защита от коррозии. – М.: Металлургия, 1987.
12. Ставицкий О. А., Кузьмин Ю. Л., Троценко В. Н. Новые ледостойкие платинониобиевые аноды для систем катодной защиты от коррозионно-эрозионных разрушений корпусов ледоколов и морских сооружений // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 2 (86). – С. 137–146.
13. Ставицкий О. А., Кузьмин Ю. Л., Подшивалов А. В. Эффективность и параметры работы в арктических условиях системы катодной защиты от коррозионно-эрозионных разрушений корпуса а/л «50 лет Победы» с ледовым поясом из плакированной стали // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 2(86). – С. 127–136.

УДК 669.715:620.193.82

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Д16Т И АМг6 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ГРИБОВ

Д. В. БЕЛОВ¹, канд. хим. наук, С. Н. БЕЛЯЕВ², М. В. МАКСИМОВ¹, Г. А. ГЕВОРГЯН¹

¹Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт «Буревестник» (АО «ЦНИИ «Буревестник»), 603950, Нижний Новгород, Сормовское шоссе, 1а,
E-mail: belov.denbel2013@yandex.ru

²ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики Российской академии наук», 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

Поступила в редакцию 13.04.2021

После доработки 9.06.2021

Принята к публикации 28.07.2021

Приведены результаты экспериментального исследования биокоррозии сплавов алюминия марок Д16Т и АМг6. Показана определяющая роль активных форм кислорода в биокоррозии алюминия консорциумом плесневых грибов. Предложена модель, согласно которой инициаторами коррозионных повреждений поверхности металла являются супероксидный анион-радикал и пероксид водорода, выделяемые в процессе жизнедеятельности микромицетов. Предполагается, что инициирование и развитие биокоррозии происходит в том числе в результате процесса восстано-

вительной активации кислорода и фентоновского разложения пероксида водорода. Сделано заключение о механизме возникновения межкристаллитной и язвенной коррозии алюминиевых сплавов, находящихся во взаимодействии с микроскопическими грибами.

Ключевые слова: алюминий, Д16Т, АМг6, биокоррозия, микроскопические грибы, активные формы кислорода, супероксид анион-радикал, пероксид водорода, межкристаллитная коррозия, язвенная коррозия, восстановительная активация кислорода

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-163-183

ЛИТЕРАТУРА

1. Sigwalt J. P. M. Aluminium in the Chemistry and Food Industries. – London: British Aluminium Co. Ltd., 1964. – P. 46.
2. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Медведев И. М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 2. – С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Birbilis N., Hinton B. Corrosion and corrosion protection of aluminum // *Fundamentals of Aluminium Metallurgy. Production, Processing and Applications*. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 2011. – P. 574–604. DOI: 10.1533/9780857090256.2.574.
4. Anaee R. A. M. Thermodynamic and kinetic study for the corrosion of aluminum and some of its alloys in the basic media. – University of Technology, Iraq, 2007. – 261 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.3021.5204.
5. Bailey J. C., Porter F. C., Pearson A. W., Jarman R. A. Aluminium and Aluminium Alloys // *Corrosion / Third Edition*. – 1994. – V. 1. – P. 4:3–3:37. DOI: 10.1016/B978-0-08-052351-4.50043-1.
6. Kip N., van Veen J. A. The dual role of microbes in corrosion // *The ISME Journal*. – 2015. – V. 9, N 3. – P. 542–551. DOI: 10.1038/ismej.2014.169.
7. Checinska S. A., Urbaniak C., Mohan G. B. M., Stepanov V. G., Tran Q., Wood J. M., Minich J., McDonald D., Mayer T., Knight R., Karouia F., Fox G. E., Venkateswaran K. Characterization of the total and viable bacterial and fungal communities associated with the International Space Station surfaces // *Microbiome*. – 2019. – V. 7, N 1. DOI: 10.1186/s40168-019-0666-x.
8. Makimura K., Saton K., Sugita T., Yamazaki T. Fungal Biota in Manned Space Environment and Impact on Human Health. *Nippon Eiseigaku Zasshi // Japanese Journal of Hygiene*. – 2011. – V. 66, N 1. – P. 77–82. DOI: 10.1265/jjh.66.77.
9. Satoh K., Nishiyama Y., Yamazaki T., Sugita T., Tsukii Y., Takatori K., Benno Y., Makimura K. Microbe-I: fungal biota analyses of the Japanese experimental module KIBO of the International Space Station before launch and after being in orbit for about 460 days // *Microbiology and Immunology*. – 2011. – V. 55, N 12. – P. 823–829. DOI: 10.1111/j.1348-0421.2011.00386x.
10. Takashi S., Takashi Y., Makimura K., Otomi C., Shin Y., Hiroshi O., Chiaki M., Comprehensive analysis of the skin fungal microbiota of astronauts during a half-year stay at the International Space Station // *Medical Mycology*. – 2016. – V. 54, N 3. – P. 232–239. DOI: 10.1093/mmy/myv121.
11. Понизовская В. Б., Дьяков М. Ю., Антропова А. Б., Биланенко Е. Н., Мокеева В. Л., Ильин В. К. Влияние условий космического полета на жизнеспособность микромицетов // *Вестник Московского университета. Серия 16. Биология*. – 2017. – Т. 72, № 1. – С. 9–15.
12. Imo E. O., Orji J. C., Nweke C. O. Influence of *Aspergillus fumigatus* on corrosion behaviour of mild steel and aluminium // *International Journal of Applied Microbiology and Biotechnology Research*. – 2018. – V. 6. – P. 61–69. <https://www.researchgate.net/publication/336749182>.
13. Билай В. И., Элланская И. А., Кириленко Т. С. Микромицеты почв. – Киев: Наукова думка, 1984. – 264 с.
14. Ахияров Р. Ж., Лаптев А. Б., Мовенко Д. А., Белова Н. А. Исследование аномально низкой коррозионной стойкости трубной стали теплообменной аппаратуры для нефтепереработки // *Нефтяное хозяйство*. – 2016. – № 1. – С. 118–121.
15. Панова О. А., Великанова Л. Л., Тимонин В. А. Коррозия металлов, вызываемая микроскопическими грибами // *Микология и фитопатология*. – 1982. – Т. 16, № 6. – С. 514–518.
16. Заикина Н. А., Дуганова Н. В. Образование органических кислот грибами, выделенными с образцов, пораженных биокоррозией // *Микология и фитопатология*. – 1975. – Т. 9, № 4. – С. 303–307.

17. Жданова Г.В. Биологическая коррозия конструкционных материалов предприятий атомной энергетики // *Коррозия: материалы, защита*. – 2009. – № 3. – С. 36–40.
18. Imo E. O., Chidiebere A. M. Fungal influenced corrosion of Aluminium in the presence of *Acremonium kiliense* // *International Journal of Applied Microbiology and Biotechnology Research*. – 2019. – V. 7. – N 1. – P. 1–6. DOI: 10.33500/ijambr.2019.07.001.
19. Xinyan D., Hua W., Lu-Kwang J., Gang C., Hongbo C., Bi-min Zhang N. Corrosion of aluminum alloy 2024 caused by *Aspergillus niger* // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2016. – V. 115. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.07.009.
20. Jiayue Z., Laszlo C., Geoffrey M. G. Biocorrosion of copper metal by *Aspergillus niger* // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2020. – V. 154, Article № 105081. DOI: 10.1016/j.ibiod.2020.105081.
21. Wu Yiling, Shao Xiaoqing, Jiao Hang, Song Xinwei, He Kun, Li Zhen. Tracking the fungus-assisted biocorrosion of lead metal by Raman imaging and scanning electron microscopy technique // *Journal of Raman Spectroscopy*. – January 2020. DOI: 10.1002/jrs.5796.
22. Belov D. V., Kalinina A. A., Sokolova T. N., Smirnov V. F., Chelnokova M. V., Kartashov V. R. Role of superoxide anion radicals in the bacterial corrosion of metals // *Applied Biochemistry and Microbiology*. – 2013. – V. 48, N 3. – P. 270–274. DOI: 10.1134/S00036838120300273.
23. Лугаускас А. Ю., Миккульскене А. И., Шляужене Д. Ю. Каталог микромицетов-биодеструкторов полимерных материалов. Биологические повреждения. – М.: Наука, 1987. – 344 с.
24. Коваль Э. З., Сидоренко Л. П. Микодеструкторы промышленных материалов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 187 с.
25. Ринальди М., Саттон Д., Фотергилл А. Определитель патогенных и условно патогенных грибов. – М.: Мир, 2001. – 486 с.
26. Zaki A. The kinetics of anodic and cathodic polarization of aluminium and its alloys // *Anti-Corrosion Methods and Materials*. – 1986. – V. 33, N 11. – P. 4–11. DOI: 10.1108/eb020492.
27. Dunlop H. M., Benmalek M. Role and Characterization of Surfaces in the Aluminum Industry // *Journal de Physique. Archives*. – 1997. – V. 7, N C6. – C6-163–C6-174. DOI: 10.1051/jp4:1997614.
28. Schultze J. W., Hassel A. W. Passivity of Metals, Alloys, and Semiconductors // *Encyclopedia of Electrochemistry*, 2007. DOI: 10.1002/9783527610426.bard040302.
29. Costa D., Ribeiro T., Mercuri F., Pacchioni G., Marcus P. Atomistic Modeling of Corrosion Resistance: A First Principles Study of O₂ Reduction on the Al (111) Surface Covered with a Thin Hydroxylated Alumina Film // *Advanced Materials Interfaces*. – 2014. – V. 1, N 3. DOI: 10.1002/admi.201300072.
30. Cornette P., Costa D., Marcus P. Relation between Surface Composition and Electronic Properties of Native Oxide Films on an Aluminium-Copper Alloy Studied by DFT // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2020. – V. 167. DOI: 10.1149/1945-7111/abc9a1.
31. Юнг Л. Анодные оксидные пленки / Пер. с англ. / Под ред. Л. Н. Закгейма и Л. Л. Одынца. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-е, 1967. – 232 с.
32. McCafferty E. Semiconductor aspects of the passive oxide film on aluminium as modified by surface alloying // *Corrosion Science*. – 2003. – V. 45, N 2. – P. 301–308. DOI: 10.1016/s0010-938x(02)00095-1.
33. Levine K. L., Tallman D. E., Bierwagen G. P. Mott–Schottky analysis of aluminium oxide formed in the presence of different mediators on the surface of aluminium alloy 2024-T3 // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – V. 199, N 1. – P. 321–326. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.023.
34. Kiss A. B., Keresztury G., Farkas L. Raman and IR spectra and structure of boehmite (γ-AlOOH). Evidence for the recently discarded D172h space group // *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular Spectroscopy*. – 1980. – V. 36, N 7. – P. 653–658. DOI: 10.1016/0584-8539(80)80024-9.
35. Shephard J. J., Dickie S. A., McQuillan A. J. Structure and Conformation of Methyl-Terminated Poly(ethylene oxide)-Bis[methylenephosphonate] Ligands Adsorbed to Boehmite (AlOOH) from Aqueous Solutions // *Attenuated Total Reflection Infrared (ATR-IR) Spectra and Dynamic Contact Angles. Langmuir*. – 2010. – V. 26, N 6. – P. 4048–4056. DOI: 10.1021/la903506q.

36. Tsyganenko A.A., Mardilovich P.P. Structure of alumina surfaces // *Journal of the Chemical Society Faraday Transactions*. – 1996. – V. 92. – N 23. – P. 4843–0. DOI: 10.1039/ft9969204843.
37. Bunker B.C., Nelson G.C., Zavadil K.R., Barbour J.C., Wall F.D., Sullivan J.P., Windisch C.F., Engelhardt M.H., Baer D.R. Hydration of Passive Oxide Films on Aluminum // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2002. – V. 106, N 18. – P. 4705–4713. DOI: 10.1021/jp013246e.
38. Белов Д.В., Калинина А.А., Карташов В.Р., Смирнов В.Ф., Соколова Т.Н., Челнокова М.В. Генерация супероксидного анион-радикала микромицетами и его роль в коррозии металлов // *Химия и химическая технология. Известия вузов*. – 2011. – Т. 54, № 10. – С. 133–136.
39. Белов Д.В., Калинина А.А., Карташов В.Р., Смирнов В.Ф., Соколова Т.Н., Челнокова М.В. Активные формы кислорода в коррозии металлов // *Коррозия: материалы, защита*. – 2011. – № 3. – С. 19–26.
40. Белов Д.В., Соколова Т.Н., Смирнов В.Ф., Кузина О.В., Косюкова Л.В., Карташов В.Р. Коррозия алюминия и его сплавов под воздействием микроскопических грибов // *Коррозия: материалы, защита*. – 2007. – № 9. – С. 36–41.
41. Deepa Prabhu, Padmalatha Rao Corrosion behaviour of 6063 aluminium alloy in acidic and in alkaline media // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2014. – V. 10, N 2. – P. S2234–S2244. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.07.059.
42. Reena Kumari P. D., Nayak Jagannath; Nityananda Shetty A. Corrosion behavior of 6061/Al-15 vol. pct. SiC(p) composite and the base alloy in sodium hydroxide solution // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2012. – V. 9, N 2. – P. S1144–S1154. DOI: 10.1016/j.arabjc.2011.12.003.
43. Awad S. A., Kamel K. H. M., Kassab A. Corrosion behaviour of aluminium in NaOH solutions // *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*. – 1979. – V. 105, N 2. – P. 291–294. DOI: 10.1016/s0022-0728(79)80123-0.
44. Zhang J., Klasky M., Letellier B. C. The aluminum chemistry and corrosion in alkaline solutions // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – V. 384, N 2. – P. 175–189. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.11.009.
45. Дресвянников А. Ф., Колпаков М. Е. Электрохимические процессы в растворах с участием алюминия и формирование микро- и наноразмерных прекурсоров полиметаллических систем // *Вестник технологического университета*. – 2016. – Т. 19, № 9. – С. 36–50.
46. Yang S. L., Chung G. K.-R. The NADPH oxidase-mediated production of hydrogen peroxide (H₂O₂) and resistance to oxidative stress in the necrotrophic pathogen *Alternaria alternata* of citrus // *Molecular Plant Pathology*. – 2012. – V. 13, N 8. – P. 900–914. DOI: 10.1111/j.1364-3703.2012.00799.x.
47. Bienert G. P., Schjoerring J. K., Jahn T. P. Membrane transport of hydrogen peroxide // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*. – 2006. – V. 1758, N 8. – P. 994–1003. DOI: 10.1016/j.bbamem.2006.02.015.
48. Hayyan M., Hashim A. M., AlNashef I. M. Superoxide Ion: Generation and Chemical Implications // *Chemical Review*. – 2016. – V. 116, N 5. – P. 3029–3085. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00407.
49. Ribeiro T., Motta A., Marcus P., Gaigeot M.-P., Lopez X., Costa D. Formation of the OOH radical at steps of the boehmite surface and its inhibition by gallic acid: A theoretical study including DFT-based dynamics // *Journal of Inorganic Biochemistry*. – 2013. – V. 128. – P. 164–173. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2013.07.024.
50. Bunker B. C., Nelson G. C., Zavadil K. R., Barbour J. C., Wall F. D., Sullivan J. P., Windisch C. F., Engelhardt M. H., Baer D. R. Hydration of Passive Oxide Films on Aluminum // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2002. – V. 106, N 18. – P. 4705–4713. DOI: 10.1021/jp013246e.
51. Mujika J. I., Ruipérez F., Infante I., Ugalde J. M., Exley C., Lopez X. Pro-oxidant Activity of Aluminum: Stabilization of the Aluminum Superoxide Radical Ion // *The Journal of Physical Chemistry A*. – 2011. – V. 115, N 24. – P. 6717–6723. DOI: 10.1021/jp203290b.
52. Kong S., Liochev S., Fridovich I. Aluminum (III) facilitates the oxidation of NADH by the superoxide anion // *Free Radical Biology and Medicine*. – 1992. – V. 13, N 1. – P. 79–81. DOI: 10.1016/0891-5849(92)90168-g.
53. Ruipérez F., Mujika J.I., Ugalde J.M., Exley C., Lopez X. Pro-oxidant activity of aluminum: Promoting the Fenton reaction by reducing Fe (III) to Fe (II) // *Journal of Inorganic Biochemistry*. – 2012. – V. 117. – P. 118–123. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2012.09.008.

54. Exley C. The pro-oxidant activity of aluminum // Free Radical Biology and Medicine. – 2004. – V. 36, N 3. – P. 380–387. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2003.11.017.
55. Турьян Я. И. Окислительно-восстановительные реакции и потенциалы в аналитической химии. – М.: Химия, 1989. – 242 с.
56. Murphy A. P. Chemical removal of nitrate from water // Nature. – 1991. – V. 350. – P. 223–225. DOI: 10.1038/350223a0.
57. Hsing-Lung Lien, Wilkin R. Reductive Activation of Dioxygen for Degradation of Methyl tert-Butyl Ether by Bifunctional Aluminum // Environmental Science & Technology. – 2002. – V. 36, № 20. – P. 4436–4440. DOI: 10.1021/es011449a.
58. Fengzhen Z., Yunfei Z., Mengjie P., Junfeng N Aerobic degradation of aqueous pollutants with nanoscale zero-valent aluminum in alkaline condition: Performance and mechanism especially at particle surface // Journal of Cleaner Production. – 2020. – V. 244. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118905.

УДК 621.791.019:539.431:669.14.018.295:620.178.3

К РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Часть 1. Оценки на начальной стадии усталостного разрушения

А. В. ИЛЬИН, д-р техн. наук, К. Е. САДКИН, канд. техн. наук, Н. С. ЗАБАВИЧЕВ

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

Поступила в редакцию 6.07.2021

После доработки 21.07.2021

Принята к публикации 29.07.2021

Существующие нормативные методики расчета усталостной прочности сварных соединений имеют ограниченное применение для малоциклового участка нагрузок и, как правило, не учитывают возможное широкое варьирование асимметрии цикла эксплуатационных напряжений, различия в ожидаемом уровне остаточных напряжений, многообразие возможных геометрий соединений. На основе экспериментальных данных по сопротивлению усталостному разрушению, а также физического моделирования отдельных стадий усталостного повреждения, обобщения результатов численных исследований методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния разработаны процедуры таких оценок применительно к оболочечным конструкциям из высокопрочных сталей, нагружаемых как наружным, так и внутренним давлением.

Ключевые слова: высокопрочные стали, сварные оболочечные конструкции, малоцикловое нагружение, усталостная прочность, методика расчета

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-184-208

ЛИТЕРАТУРА

1. RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures. – Det Norske Veritas, 2015. – April. – 129 pp.
2. BS 7910: 2015. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
3. Hobbacher A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. – IIW-Doc. XIII-2151r1-07/XV-1254r1-07, May, 2007.
4. ГОСТ 34 233.6–17. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках. – М.: Стандартиформ, 2018.
5. ПНАЭ Г-7–002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
6. Ильин А. В., Леонов В. П., Маннинен Т. П. Влияние геометрии сварных соединений на концентрацию упругих напряжений // Вопросы судостроения. Серия Сварка. – 1981. – Вып. 32. – С. 16–24.

7. Ильин А. В., Леонов В. П., Семенова В. Т. Особенности использования деформационного критерия разрушения при оценке долговечности сварных соединений // Вопросы судостроения Серия Сварка. – 1983. – Вып. 36. – С. 47–58.
8. Ильин А. В., Карзов Г. П., Леонов В. П. Определение коэффициентов снижения циклической прочности элементов конструкций с концентраторами в области ограниченной долговечности // Проблемы прочности. – 1992. – № 11. – С. 3–12.
9. Карзов Г. П., Леонов В. П., Марголин Б. З. Расчетное определение полей остаточных сварочных напряжений в конструкциях оболочечного типа. Сообщение 1 // Автоматическая сварка. – 1992. – № 3. – С. 3–9; Сообщение 2 // Автоматическая сварка. – 1992. – № 4. – С. 7–13.
10. Ильин А. В., Леонов В. П., Мизецкий А. В. Метод численного моделирования начальной стадии циклического повреждения сварных соединений. Построение S–N кривых // Вопросы материаловедения. – 1996. – Вып. 2(5). – С. 62–76.
11. Васильев А. К., Ильин А. В., Карзов Г. П., Леонов В. П. Конструктивно-технологическая прочность сварных соединений из высокопрочных сталей // Вопросы материаловедения. – 1999. – № 3(20). – С. 307–326.
12. Ильин А. В., Садкин К. Е. Определение конструктивной и технологической концентрации напряжений в сварных узлах при оценках усталостной прочности оболочечных конструкций // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 2 (70). – С. 161–176.
13. Материалы для судостроения и морской техники: Справочник. Т. 1 / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2009. – С. 609–676.
14. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section XI. Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components.
15. Fatigue and Fracture. ASTM Handbook. – 1996. – V. 19. – 2592 pp.
16. Ильин А. В., Садкин К. Е., Лаврентьев А. А. Исследование циклической трещиностойкости высокопрочных сталей для оценки ресурса конструкций глубоководной техники // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 3(83). – С. 197–208.
17. McEvily A. J. An analysis of the growth of small fatigue cracks // Mater. Sci. and Eng. – 1991. – P. 127–133.
18. Kitagawa H., Takahashi S. Applicability of fracture mechanics to very small cracks or cracks in the early stage // Proc. of the 2nd Int. Conf. on Mech. Behaviour of Materials. ASM. – 1976. – P. 627–631.
19. Steimbregger C., Gubelj N., Enzinger N., Ernst W., Chapetti M. Influence of static strength on the fatigue resistance of welds // MATEC Web of Conferences 2018. – V. 165. – P. 13010. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201816513010>.
20. Леонов В. П., Маннинен Т. П., Мизецкий А. В. Особенности локальных остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях сталей, претерпевающих структурные превращения в зоне термического влияния // Вопросы материаловедения. – 2004. – № 4 (40). – С. 61–81.
21. Nykanen T., Bjork T. A new proposal for assessment of the fatigue strength of steel butt-welded joints improved by peening (HFMI) under constant amplitude tensile loading // Fatigue & Fract. of Eng. Mat. & Structure. – 2016. – V. 39. – P. 566–582.
22. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Пер.с. англ. – М.: Мир, 1977. – 301 с.

УДК [669.15-194.55+669.15-194.56]:534.222.2:539.375

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ РАЗНЫХ СТРУКТУРНЫХ КЛАССОВ ПРИ ОДНОКРАТНОМ И МНОГОКРАТНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

О. В. ГЛИБЕНКО, Т. В. ВИХАРЕВА, канд. техн. наук, А. В. ИЛЬИН, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 26.05.2021

После доработки 11.06.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Исследована предельная деформационная способность нержавеющей высоколегированной азотсодержащей стали аустенитного класса и низколегированной хромоникельмолибденовой стали до момента разрушения при однократном и многократном взрывном нагружении на воздухе. Представлены данные по изменению механических свойств и структуры этих сталей в результате динамического деформирования до предельного и до задаваемого уровня деформации.

Ключевые слова: предельная деформация, динамическое нагружение, структура и механические свойства низколегированных и высоколегированных сталей

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-209-228

ЛИТЕРАТУРА

1. Эпштейн Г. Н. Строение металлов, деформированных взрывом. Изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1988. – 280 с.
2. Ващенко А. П., Леонов В. П., Токарев В. М., Эглит А. С. Влияние высокоскоростного деформирования и температуры на характеристики прочности и пластичности хромоникельмолибденовой стали // Проблемы прочности. – 1991. – № 9 (267). – С. 17–19
3. Влияние скорости нагружения на механические свойства сталей разного уровня прочности / А. П. Ващенко и др. // Проблемы прочности. – 1989. – №10 [244]. – С.43–48
4. Конева Н. А. Физика прочности металлов и сплавов // Соросовский образовательный журнал. Физика. – 1997. – № 7. – С. 95–102.
5. Прочность материалов и конструкций / Трощенко В. Т. и др. – Киев: Академперіодика, 2005. – 1088 с.
6. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. М. А. Мейерса, Л. Е. Мура. – М.: Металлургия, 1984. – 512 с.
7. Давыденков Н. Н. Избранные труды. Т.1: Динамическая прочность и хрупкость металлов. – Киев: Наук. Думка, 1981. – 704 с.
8. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.
9. Батьков Ю. В., Глушак Б. Л., Новиков С. А. Сопротивление материалов пластической деформации при высокоскоростном деформировании в ударных волнах. (Обзор). – М.: ЦНИИатоминформ, 1990. – 97 с.
10. Эпштейн Г. Н., Кайбышев О. А. Высокоскоростная деформация и структура металлов. – М.: Металлургия, 1971. – 198 с.
11. Крупин А. В., Соловьев В. Я., Шефтель Н. И., Кобелев А. Г. Деформация металлов взрывом. – М.: Металлургия, 1975. – 416 с.
12. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 221 с.
13. Крупин А. В., Соловьев В. Я., Попов Г. С., Кръстев М. Р. Обработка металлов взрывом. – М.: Металлургия, 1991. – 496 с.
14. Структура и механические свойства аустенитной хромомарганцевой стали после нагружения ударными волнами / И. Н. Гаврильев, А. А. Дерibas, В. И. Зельдович и др. // ФММ. – 1988. – Т. 65, вып. 4. – С. 801–808.
15. Терещенко Н. А., Зельдович В. И., Уваров А. И., Фролова Н. Ю. Влияние давления при ударно-волновом нагружении на развитие прерывистого распада в аустенитной азотсодержащей стали при последующем нагреве // ФММ. – 2006. – № 6. – С. 618–625.
16. Вихарева Т. В., Глибенко О. В., Фомина О. В., Ильин А. В. Исследование изменения структуры и механических свойств высокопрочной азотсодержащей аустенитной стали после ди-

намического нагружения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2017. – № 4. – С. 56–65.

17. Макклинток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. – М.: Мир, 1970.

18. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.

УДК 669.15'786–194.2:629.561.5

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛЕДОВОГО ПОЯСА МОРСКОЙ ТЕХНИКИ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕЙСЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

А. А. ДЕЕВ, Г. Ю. КАЛИНИН, д-р техн. наук, К. Е. САДКИН, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 4.06.2021

После доработки 19.07.2021

Принята к публикации 28.07.2021

Показана возможность использования высокопрочной азотсодержащей коррозионно-стойкой стали марки 04X20H6Г11M2АФБ для строительства ответственных элементов и узлов морской техники, эксплуатирующейся при низких температурах, в том числе в Арктическом регионе. Рассмотрены преимущества азотсодержащей стали перед традиционно применяемыми в судостроении плакированной сталью АБ2 + 08Х18Н10Т и свариваемой сталью категории F500W. По результатам испытаний гомогенного листового проката из азотсодержащей стали установлено, что уровень физико-механических свойств ее превосходит аналогичные параметры традиционно применяемых в судостроении сталей АБ2 + 08Х18Н10Т в широком диапазоне температур, в том числе до –90°С.

Ключевые слова: азотсодержащая сталь, коррозионная стойкость, трещиностойкость, ледовый пояс

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-229-237

ЛИТЕРАТУРА

1. Цой Л. Г., Легостаев Ю. Л., Кузьмин Ю. Л. Ледокол XXI века или ржавый утюг? // Морской флот. – 2014. – № 4. – С. 42–52.

2. Соколов О. Г., Малышевский В. А., Легостаев Ю. Л., Грищенко Л. В. Высокопрочные плакированные стали, стойкие к коррозионно-эрозионному износу // Прогрессивные материалы и технологии. –1993. – № 1. – С. 12–13.

3. Легостаев Ю. Л., Мотовилина Г. Д., Семичева Т. Г. Особенности структуры высокопрочной плакированной стали // Вопросы материаловедения. – 1998. – № 2(15). – С. 5–11.

4. Влияние азота на энергию дефекта упаковки аустенитной стали // Структура и физико-механические свойства немагнитных сталей / М. А. Бернштейн, И. М. Баречкова и др. – М.: Наука, 1986. – С. 123–125.

5. Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю., Нестерова Е. В., Фомина О. В., Харьков А. А. Исследования структуры и свойств высокопрочной коррозионно-стойкой азотистой стали 04X20H6Г11M2АФБ // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1. – С. 45–54.

6. Харьков О. А., Мушникова С. Ю., Парменова О. Н. Оценка коррозионной стойкости азотсодержащей стали в условиях абразивного воздействия // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 2. – С. 156–163.

7. Качурин Л. Г., Андросенко В. Я., Логинов В. Б., Ованесьян К. К., Псаломщиков В. Ф., Харьков А. А. Физико-химические процессы при механическом взаимодействии металла со льдом // Технология судостроения. – № 3. –1990. – С. 22–24.

ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНОЙ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

А. С. ОРЫЩЕНКО, чл.-корр. РАН, В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, В. И. МИХАЙЛОВ, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 2.06.2021

После доработки 25.08.2021

Принята к публикации 26.08.2021

Приведены результаты работ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» по созданию корпусных титановых сплавов для глубоководной морской техники. Рассмотрены проблемы, связанные с разработкой титановых сплавов с пределом текучести более 1000 МПа.

Ключевые слова: титановые сплавы, глубоководная морская техника, термическая обработка, сварка

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-238-246

ЛИТЕРАТУРА

1. Шунков В. Н. Подводные лодки – Минск РБ: ООО «Попурри», 2004. – 608 с.
2. Ушков С. С., Кудрявцев А. С., Карасев Э. А. Становление и развитие производства титановых полуфабрикатов для судостроения // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1(45). – С. 68–76.
3. Михайлов В. И., Сахаров И. Ю. Сварка конструкций из титановых сплавов больших толщин (проблемы технологии) // Титан. – 2006. – № 2. – С. 50–52.
4. Крылов В. В. 60 лет на службе в «Малахите». – СПб.: Изд-во АО СГМБМ «Малахит». – 2015. – 286 с.
5. Ушков С. С., Николаев Г. И., Михайлов В. И., Матвеев Г. В., Хесин Ю. Д. Конструкционные материалы для глубоководных аппаратов // Судостроение. – 2004. – № 5. – С. 111–114.
6. Дмитриев А. Н. Проектирование подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1978. – 238 с.
7. Горынин И. В., Леонов В. П., Михайлов В. И. Морские титановые сплавы // Судостроение. – 2009. – № 5. – С. 22–24.
8. Кудрявцев А. С., Сорокин В. П., Чудаков Е. В. Повышение механических свойств титановых сплавов, предназначенных для изделий морской техники за счет формирования регламентированного структурного состояния // Вопросы материаловедения. – 1999. – № 3 (20). – С. 178–198.
9. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Леонов В. П., Кудрявцев А. С., Чудаков Е. В. Морские титановые сплавы: создание, освоение, перспективы // Титан. – 2014. – № 3 (45). – С. 4–11.
10. Чечулин Б. Б., Хесин Ю. Д. Циклическая и коррозионная прочность титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1987. – 207 с.
11. Кудрявцев А. С., Паноцкий Д. А. Исследование характеристик вязкости разрушения высокопрочных свариваемых псевдо- α -титановых сплавов применительно к изделиям морской техники // Титан. – 2010. – № 2(28). – С. 9–15.
12. Кудрявцев А. С., Паноцкий Д. А. Влияние термической обработки для снятия остаточных сварочных напряжений на характеристики работоспособности основного металла титанового сплава 5В // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3(59). – С. 344–350.
13. Разумихин Е. М., Писаренко Г. К., Кланцов Р. М. «Русь» – подводный аппарат второго поколения // Морской вестник. – 2004. – Специальный выпуск № 1(2). – С. 58–60.
14. Моисеев В. Н. Основные направления развития титановых сплавов для современного машиностроения // МиТОМ. – 1997. – № 7. – С. 30–34.
15. Братухин Ю. А., Новожилов Г. В., Мишин В. И., Куликов Ф. Р. Применение сплавов титана в конструкциях магистральных пассажирских и тяжелых транспортных самолетов // Титан. – 1996. – № 1 (9). – С. 52–59.

16. Патент РФ № 2169204 Сплав на основе титана и способ термической обработки крупногабаритных полуфабрикатов из этого сплава / Тетюхин В. В., Захаров Ю. И., Левин И. В. Опубл. 20.06.2001.

17. Сварные соединения титановых сплавов / В. Н. Моисеев, Ф. Р. Куликов, Ю. Г. Каримов и др. – М. Металлургия, 1979. – 248 с.

18. Леонов В. П., Михайлов В. И., Сахаров И. Ю., Кузнецов С. В. Исследование свариваемости титанового псевдо-β-сплава VST5553 // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 4(100). – С 124–131.

УДК 669.018.44:539.434:621.774.1

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА ЦЕНТРОБЕЖНО-ЛИТЫХ ТРУБ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК ПИРОЛИЗА В ИССЛЕДОВАНИЯХ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ЦНИИ КМ «ПРОМЕТЕЙ»

А.С. ОРЫЩЕНКО, чл. корр. РАН, И. П. ПОПОВА, канд. техн. наук, Ю. А. УТКИН,
С. Н. ПЕТРОВ, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 10.06.2021

После доработки 19.07.2021

Принята к публикации 29.07.2021

На основе экспертных исследований металла отработанных центробежно-литых труб после эксплуатации в составе реакционных змеевиков печей пиролиза разработаны жаростойкие жаропрочные сплавы и технологии изготовления из них штатных изделий. Исследованы служебные характеристики разработанного сплава марки 45X32H43СБ и его сварных соединений при температурах 1100 и 1150°С. Показано, что разработанный сплав обладает структурной стабильностью и способностью сопротивляться высокотемпературной ползучести при рабочих температурах до 1150°С. Разработана методика оценки ресурса трубных элементов с учетом особенностей эксплуатации реакционных змеевиков, в том числе при наличии трещиноподобного дефекта в материале трубы. Выявлены причины значительного формоизменения и повреждения реакционных труб, приводящих к преждевременному выходу из строя змеевика. Выявлен наиболее значимый эксплуатационный фактор повреждения реакционных труб установок пиролиза.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, длительная прочность, центробежно-литые трубы, сварные соединения, интерметаллиды

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-247-262

ЛИТЕРАТУРА

1. Орыщенко А. С. Конструкционные материалы для радиантных змеевиков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 5. – С. 44–47.

2. Вовченко Н. В., Уткин Ю. А., Петров С. Н., Пташник А. В., Попова И. П. Исследование характеристик жаропрочности модельных сплавов в зависимости от объемного содержания интерметаллидной фазы (Nb₆Ni₁₆Si₇) // Сб. трудов конференции «Неделя металлов в Москве», 8–11 ноября 2016 г. – М.: ВНИИМЕТМАШ, 2017. – С. 305–315.

3. Орыщенко А. С., Бланк Е. Д., Водовозов А. Н., Вовченко Н. В. Электронно-лучевая сварка центробежно-литых труб из жаростойких жаропрочных сплавов для радиантных змеевиков печей пиролиза установок получения этилена и других продуктов переработки углеводородного сырья // Материалы 2-й Санкт-Петербургской научно-технической конференции «Технологии и оборудование ЭЛС-2011», Санкт-Петербург, 23–26 мая 2011. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С.49–59.

4. Colwell R. L., Hoffman J. J. Weld cracking in modified heat resistant casting, a microstructural investigation // Proceedings of the NACE international annual conference corrosion, 1998. – P. 423.

5. Kubota Heat Resistant alloys: Alloy Data Sheet KHR45A. – Chuo-ku, Tokyo, 2003.

6. Centralloy® ET 45 Micro. Material data sheet: Schmidt + Clemens Group GmbH + Co. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/10921567/centralloyr-et-45-micro-schmidt-clemens> (reference date 06/07/2020)

7. Методика расчета на прочность элементов печей, работающих под давлением РТМ 26-02-67–84. Срок введения с 1.01.84.

8. API 530 STD Calculation of Heater-Tube Thickness in Petroleum Refineries, American Petroleum Institute, Washington D.C., 2003. – 127 p

9. Орыщенко А. С., Уткин Ю. А., Попова И. П., Петров С. Н., Цеменко А. В. Исследование характеристик жаропрочности металла центробежно-литых труб, изготовленных из сплава 45Х32Н43СБ, и их сварных соединений при температурах до 1150 °С. Часть 1. Жаропрочность труб при температурах до 1100°С // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 2 (102). – С. 1–13.

10. Орыщенко А. С., Уткин Ю. А., Петров С. Н., Пташник А. В. Исследования макрокристаллического строения центробежно-литых труб и количественный анализ дисперсных фаз в межграничном пространстве сплавов базовой композиции 50Х32Н43 при рабочих температурах // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2 (78). – С. 73–84.

11. Попова И. П. Исследование сопротивления разрушению сплава базовой композиции 45Х25Н35С2Б и разработка методов оценки работоспособности реакционных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 2014.

12. Попова И. П., Орыщенко А. С. Анализ возможных причин преждевременного выхода из строя реакционных труб установок пиролиза, изготовленных из сплава базовой композиции 45Х25Н35С2Б // Сб. докладов IX Российской конференции «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность», 3–7 октября 2016 г. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2017. – С. 166–173.

УДК 669.71'721:621.791.14:629.5

СОЗДАНИЕ НОВЫХ СВАРНЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЛЕГЧЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА СКОРОСТНЫХ СУДОВ НОВОГО ТИПА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЗАПОЛЯРЬЯ

Е. А. АЛИФИРЕНКО¹, Н. Н. БАРАХТИНА¹, Е. В. МАЛОВ²

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

²ООО «Рыбинская верфь», 152978, Ярославская область, Рыбинский р-н, пос. Судоверфь, ул. Судостроительная, 1А

Поступила в редакцию 29.06.2021

После доработки 30.06.2021

Принята к публикации 29.07.2021

Разработан новый материал повышенной прочности – тонкостенные сварные панели из алюминиево-магниевого сплава марки 1565ч, применение которого в сочетании с внедрением современных достижений в области прочности и аэрогидродинамики позволило создать многофункциональное экономичное судно на воздушной подушке сегового типа «Хаска 10» с уникальными возможностями и эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: алюминиево-магниевый сплав, крупногабаритные тонкостенные сварные панели, скоростное судно на воздушной подушке

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-107-3-263-273

ЛИТЕРАТУРА

1. Крыжевич Г. Б., Кноринг С. Д., Шапошников В. М.. Перспективы применения сварных алюминиевых конструкций в морском транспорте // Судостроение. – 2005. – №3. – С. 72–75.
2. Алифиренко Е. А., Шишенин Е. А. Перспективы снижения веса корпусных и надстроечных конструкций при использовании сварных крупногабаритных облегченных панелей, полученных методом сварки трением с перемешиванием // Труды Крыловского государственного научного центра: Специальный выпуск. – 2019. – № 1. – С. 49–52.
3. Алифиренко Е. А., Орыщенко А. С., Осокин Е. П. Перспективы применения сварных облегченных панелей // Морской флот. – 2016. – № 4. – С. 24–26.
4. Патент на полезную модель №156976. Установка сварки трением с перемешиванием крупногабаритных конструкций / Алифиренко Е. А., Бакшаев В. А., Васильев П. А., Додон Р. В., Орыщенко А. С., Осокин Е. П., Пименов А. В., Оpubл. 20.11.2015.
5. Пат. № 2431692. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава (сплав 15654) / Дриц А. М., Орыщенко А. С., Григорян В. А., Осокин Е. П., Барахтина Н. Н., Соседков С. М., Арцруни А. А., Хромов А. П., Цургозен Л. А., Оpubл. 20.10.2011.
6. Барахтина Н. Н., Дриц А. М., Орыщенко А. С., Осокин Е. П., Соседков С. М. Алюминиево-магниевоый сплав 15654 для криогенного применения // Цветные металлы. – 2012. – № 11. – С. 84–89.
7. Патент РФ № 2677559. Алифиренко Е. А., Барахтина Н. Н., Борисов А. В., Котолайнен А. В., Орыщенко А. С. Способ сварки трением с перемешиванием алюминиевых заготовок переменной толщины, Оpubл. 17.01.2019.
8. Правила классификации и постройки морских судов. Часть Х111: «Материалы». – Российский морской регистр судоходства, 2018.