

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

- Сыч О. В., Коротовская С. В., Хлусова Е. И., Новоскольцев Н. С. Разработка термомодеформационных режимов прокатки низколегированной «АВС»-стали с квазигомогенной ферритно-бейнитной структурой..... 7
- Миллюц В. Г., Цуканов В. В., Левагин Е. Ю. Технология производства и исследование качества сверхтолстых листов высокопрочной конструкционной стали АБ2Р, изготовленных из крупных кузнечных слитков 21
- Алеутдинова М. И. О самоорганизации поверхностного слоя конструкционной стали при сухом скольжении по закаленной стали под воздействием электрического тока..... 29
- Аргинбаева Э. Г., Базылева О. А., Евгенов А. Г., Прагер С. М. Исследование интерметаллидного никелевого сплава для изготовления деталей методами равноосного литья и аддитивных технологий..... 38
- Оленин М. И., Каштанов А. Д., Романов О. Н., Махорин В. В. Влияние гомогенизирующего отжига на снижение содержания δ-феррита в высокопрочной высокохромистой стали мартенситного класса марки 07X15H5Д4Б, полученной методом селективного лазерного сплавления..... 47
- Толорайя В. Н., Остроухова Г. А. Получение монокристалльных затравок [001] из сплавов системы Ni–W методом направленной кристаллизации..... 55

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Гошкодеря М. Е., Бобкова Т. И., Старицын М. В. Исследование процесса синтеза и свойств полученных металломатричных композиционных порошков системы Ti / TiB₂..... 66
- Бобкова Т. И., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Макаров А. М., Фармаковский Б. В. Защитные покрытия из сплава системы никель – хром – молибден с широким диапазоном рабочих температур 74
- Бобкова Т.И., Дмитрюк А.И., Неженский Е.А., Лукьянова Н.А. Исследование структуры и свойств функциональных покрытий композиционных порошков системы алюминий – нитрид кремния, дополнительно армированных фазой типа сиалон. 80
- Бобкова Т. И., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Самоделкин Е. А. Фармаковский Б. В. Коррозионно-стойкое защитное покрытие системы Zr – Nb – Sn, полученное с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления 90
- Яковлева Н. В., Фармаковский Б. В., Быстров Р. Ю., Юрков М. А. Разработка технологий микроплазменного напыления функциональных покрытий системы никель – алюминий для создания каталитически активных композиций 97
- Геращенко Е. Ю., Геращенко Д. А., Беляков А. Н. Исследование покрытий, полученных на никель-алюминиевой бронзе при помощи лазерной обработки с использованием порошков никеля 105
- Щегольков А. В., Липкин М. С., Щегольков А. В., Корбова Е. В., Липкина Т. В., Липкин В. М. Исследование механизма формирования электрохромных пленок WO₃ на поверхности Sn, Ti и ITO-электродов в процессе катодного электроосаждения 113
- Малецкий А. В., Константинова Т. Е., Беличко Д. Р., Волкова Г. К., Бурховецкий В. В. Вклад гибридной компоненты в структуру и свойства керамики на основе метастабильных фаз Al₂O₃. 127
- Китаев Н. И., Якимович Ю. В., Шигаев М. Ю., Пичхидзе С. Я. Термодиффузионное хромирование конструкционной углеродистой стали 20 токами высокой частоты 137

ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Лаптев А. Б., Нестеров А. С., Варданян А. М., Николаев Е. В. Разработка механизма старения ПЭТФ в условиях воздействия тепла, влаги и ультрафиолетового излучения..... 146

Ботвин Г. В., Старостин Н. П. Сварка полипропиленовых труб нагретым инструментом в раструб при отрицательных температурах окружающего воздуха..... 161

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Вагапов Р. К. Исследование наводороживания и коррозии стального оборудования и трубопроводов на объектах добычи H₂S-содержащего углеводородного сырья. 170

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ

Косарина Е. И., Смирнов А. В., Суворов П. В., Демидов А. А. Цифровые эталонные изображения при оценке качества отливок из алюминиевых и магниевых сплавов. 182

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов 195

УДК 669.14.018.41:669.15–194.2:621.771.23:539.4

РАЗРАБОТКА ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ «АРС»-СТАЛИ С КВАЗИОДНОРОДНОЙ ФЕРРИТНО-БЕЙНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

О. В. СЫЧ, канд. техн. наук, С. В. КОРОТОВСКАЯ, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук, Н. С. НОВОКОЛЬЦЕВ

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

Поступила в редакцию 30.03.2021

После доработки 4.05.2021

Принята к публикации 5.05.2021

Исследованы кинетика роста аустенитного зерна при нагреве и особенности процессов динамической и статической рекристаллизации, протекающих при различных температурно-деформационных режимах пластической деформации. Изучены фазовые превращения при непрерывном охлаждении горячедеформированного аустенита в низколегированной «Арс»-стали с пределом текучести не менее 420 МПа. Проведенные исследования позволили определить термомеханические параметры, обеспечивающие формирование мелкодисперсной однородной ферритно-бейнитной структуры, на основании которых разработаны технологические рекомендации для промышленного производства и изготовлен листовой прокат. Представлены структура и свойства листового проката из судостроительной «Арс»-стали категории прочности 420 МПа.

Ключевые слова: низкоуглеродистая низколегированная судостроительная «Арс»-сталь, термомеханическая обработка, вакуумное травление, размер аустенитного зерна, Gleeble 3800, динамическая рекристаллизация, статическая рекристаллизация, фазовые превращения, листовой прокат, структура, свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-07-20

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. 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 испытании на растяжение и ударный изгиб // Металлург. – 2010. – № 12. – С. 33–39.

3. Настич С. Ю. Особенности ферритно-бейнитной структуры и сопротивление вязким разрушениям высокопрочных трубных сталей // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 7. – С. 19–25.

4. Урцев В. Н., Корнилов В. Л., Шмаков А. В., Краснов М. Л., Стеканов П. А., Платов С. И., Мокшин Е. Д., Урцев Н. В., Счастливец В. М., Разумов И. К., Горностырев Ю. Н. Формирование струк-

турного состояния высокопрочной низколегированной стали при горячей прокатке и контролируемом охлаждении // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120. – № 12. – С. 1335–1344.

5. 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.

6. Настич С. Ю. Влияние морфологии бейнитной составляющей микроструктуры низколегированной стали X70 на хладостойкость проката больших толщин // Металлург. – 2012. – № 3. – С. 62–69.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Настич С. Ю., Матросов М. Ю. Структурообразование высокопрочных трубных сталей при термомеханической обработке // Металлург. – 2015. – № 9 – С. 46–54.

11. НД № 2-020101-124. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII: Материалы. – СПб.: Российский морской регистр судоходства. – 2020. – 273 с.

12. Гусев М. А., Ильин А. В., Ларионов А. В. Сертификация судостроительных материалов для судов, эксплуатирующихся в условиях Арктики // Судостроение. – 2014. – № 5 (816). – С. 39–43.

13. Филин В. Ю. Контроль качества сталей для крупногабаритных сварных конструкций Арктического шельфа. Применение российских и зарубежных требований // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 2 (98). – С. 136–153.

14. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Часть 1. Принципы легирования и требования к структуре листового проката // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3 (95). – С. 22–47.

15. Сыч О. В., Хлусова Е. И. Взаимосвязь параметров структуры с характеристиками работоспособности судостроительных сталей различного легирования // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 4 (104). – С. 17–31.

16. 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.

17. 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.

18. García de Andrés C., Bartolomé M. J., Capdevila C., San Martín D., Caballero F. G., López V. Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels // Materials Characterization. – 2001. – N 46 – P. 389–398.

19. Зисман А. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. Построение и использование карт структурных изменений при горячей деформации аустенита низкоуглеродистой стали 09ХН2МДФ для оптимизации промышленных технологий // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 1 (73). – С. 37–48.

20. Medina S. F., Hernandez C. A. General expression of the Zener–Holloman parameter as a function of the chemical composition of low alloy and microalloyed steels // Acta Material. – 1996. – V. 44. – № 1. – P. 137–148.

21. Fernandez A. I., Uranga P., Lopez B., Rodrigues-Ibabe J. M. Dynamic recrystallization behavior covering a wide austenite grain size range in Nb and Nb–Ti microalloyed steels // Materials Science and Engineering. – 2003. – № 361. – P. 367–376.

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА СВЕРХТОЛСТЫХ ЛИСТОВ
ВЫСОКОПРОЧНОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ АБ2Р, ИЗГОТОВЛЕННЫХ
ИЗ КРУПНЫХ КУЗНЕЧНЫХ СЛИТКОВ**

В. Г. МИЛЮЦ, В. В. ЦУКАНОВ, д-р техн. наук, Е. Ю. ЛЕВАГИН

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

Поступила в редакцию 12.04.2021

После доработки 19.05.2021

Принята к публикации 20.05.2021

Опробована технология изготовления и выполнено исследование качества сверхтолстых листов высокопрочной конструкционной хладостойкой стали АБ2Р, изготовленных из крупных кузнечных слитков, разливаемых сифонным способом с применением современных разливочных и теплоизолирующих смесей при защите металла аргоном. Применение разработанной технологии разливки крупных кузнечных слитков совместно с использованием внепечного рафинирования и модифицирования металла алюминием и кальцием обеспечивает высокий уровень качества сверхтолстого проката.

Ключевые слова: крупный кузнечный слиток, сифонная разливка, модифицирование, сверхтолстый прокат, качество, механические свойства, ударная вязкость, неметаллические включения

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-21-28

ЛИТЕРАТУРА

1. Владимиров Н. Ф., Луценко А. Н., Дурьнин В. А., Батов Ю. М., Малахов Н. В., Милейковский Ф. В., Милюц В. Г. От электрошлакового переплава к внепечному рафинированию // По пути созидания: Сб. тр. Т. 2. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. – С. 58–69.

2. Малахов Н. В., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И., Казаков А. А. Структурная неоднородность и методы ее снижения для повышения качества конструкционных сталей // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3(59). – С. 52–64.

3. Милюц В. Г., Малахов Н. В., Владимиров Н. Ф., Батов Ю. М. Влияние алюминия и кальция на пластичность толстолистовой судостроительной стали в Z-направлении // Металлург. – 2011. – № 2. – С. 58–60.

4. Милюц В. Г., Цуканов В. В., Казаков А. А., Мотовилина Г. Д., Афанасьев С. Ю. Совершенствование технологии разливки крупных кузнечных слитков высокопрочной судостроительной стали // Черные металлы. – 2011. – № 1. – С. 9–13.

5. Милюц В. Г., Владимиров Н. Ф., Батов Ю. М. Развитие технологии производства слитков высокопрочной корпусной стали для изготовления толстых листов. Ч. 1 // Электрометаллургия. – 2014. – № 9. – С. 16–22.

6. Милюц В. Г., Владимиров Н. Ф., Батов Ю. М. Развитие технологии производства слитков высокопрочной корпусной стали для изготовления толстых листов. Ч. 2 // Электрометаллургия. – 2014. – № 11. – С. 6–12.

УДК 621.891

**О САМООРГАНИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НАКЛЕПАННОЙ СТАЛИ Ст3 ПРИ СУХОМ
СКОЛЬЖЕНИИ ПО ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 45 ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА**

М. И. АЛЕУТДИНОВА^{1,2}, канд. техн. наук

¹ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения» СО РАН,
634055, Томск, Академический пр., 2/4, E-mail: aleut@ispms.ru

²Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, 636036, г. Северск,
Коммунистический пр., 65

Поступила в редакцию 19.04.2021

После доработки 25.05.2021

Принята к публикации 25.05.2021

С помощью методов оптической и конфокальной лазерной микроскопии показано, что сухое скольжение наклепанной стали Ст3 по закаленной стали 45 под воздействием электрического тока плотностью более 250 A/cm^2 сопровождается образованием композиционных трибослоев, содержащих $\alpha\text{-Fe}$, $\gamma\text{-Fe}$ и FeO . Установлено, что самоорганизация трибосистемы в условиях сухого скольжения под воздействием электрического тока может быть представлена в виде иерархии структурных состояний поверхностных слоев контактирующих материалов.

Ключевые слова: самоорганизация поверхностных слоев, структурная иерархия трибослоев, скользящий электроконтакт, поверхность скольжения, фазовый состав трибослоя, механизм изнашивания

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-29-37

ЛИТЕРАТУРА

1. Kragelsky I. V., Dobychin M. N., Kambalov V. S. Friction and Wear Calculation Methods. – New York: Pergamon Press, 1982. – 464 p.
2. Bowden F. P., Tabor D. Friction: An Introduction to Tribology. – New York: Anchor. – 1973. – 178 p.
3. Yin F., Mao H., Hua L., Gu Zh. Back propagation neural network based calculation model for predicting wear of fine-blanking die during its whole lifetime // Computational Materials Science. – 2012. – V. 59. – P. 140–151.
4. Archard J. F., Hirst W. The wear of metals under unlubricated conditions // Proc. R. Soc. Ser. A. – 1956. – V. 236. – P. 397–410.
5. Archard J. F. Elastic deformation and the wear law of friction Proc. // R. Soc. Ser. A. – 1957. – V. 243. – P. 190–205.
6. Frischmuth K., Langemann D. Numerical calculation of wear in mechanical systems // Mathematics and Computers in Simulation. – 2011. – V. 81. – P. 2688–2701.
7. Wang S. Q., Wei M. X., Zhao Y. T. Effects of the tribo-oxide and matrix on dry sliding wear characteristics and mechanisms of a cast steel // Wear. – 2010. – V. 269. – P. 424–434.
8. So H., Yu D. S., Chuang C.Y. Formation and wear mechanism of tribo-oxides and the regime of oxidational wear of steel // Wear. – 2002. – V. 253. – P. 1004–1015.
9. Yasara I., Canakcib A., Arslanb F. The effect of brush spring pressure on the wear behaviour of copper–graphite brushes with electrical current // Tribology International. – 2007. – V. 40. – P. 1381–1386.
10. Goto H., Amamoto Y. Improvement of wear resistance for carbon steel under unlubricated sliding and variable loading conditions // Wear. – 2011. – V. 270. – P. 725–736.
11. Han Z., Zhang Y.S., Lu K. Friction and wear behaviors of nanostructured metals // J. Mater. Sci. Technol. – 2008. – V. 24 – P. 483–497.
12. Hughes D. A., Dawson D. B., Korellis J. S., Weingarten L.I. Near surface microstructure developing under large sliding loads // J. Mater. Eng. Perform. – 1994 – V.3. – P. 459–475.
13. Kato H., Sasase M., Suiya N. Friction-induced ultra-fine and nanocrystalline structures on metal surfaces in dry sliding // Tribol. Int. – 2010. – V. 43. – P. 925–928.
14. Singh J. B., Wen J.-G., Bellon P. Nanoscale characterization of the transfer layer formed during dry sliding of Cu–15 wt.% Ni–8 wt.% Sn bronze alloy // Acta Materialia. – 2008. – V. 56. – P. 3053–3064.
15. Banerji A., Lukitsch M. J., McClory B., White D. R., Alpas A. T. Effect of iron oxides on sliding friction of thermally sprayed 1010 steel coated cylinder bores // Wear. – 2017. – V. 376–377. – P. 858–868.
16. Rainforth W. M., R. Stevens & J. Nutting. Deformation structures induced by sliding contact // Philosophical Magazine A. – 1992. – V. 66(4) – P. 621–641. DOI: 10.1080/01418619208201580: <http://dx.doi.org/10.1080/01418619208201580>.

17. Алеутдинова М. И., Фадин В. В., Миронов Ю. П. Характер контактного взаимодействия при сухом скольжении вольфрама по стали под воздействием электрического тока высокой плотности // Вопросы материаловедения. – 2019 – № 1 (95). – С. 101–109.
18. Aleutdinova M. I., Fadin V. V. The role of FeO in creating of multi-level structure of the surface layer of metallic materials in the dry slip zone under electric current of high density // AIP Conference Proceedings. – 2019 – V. 2167. – P. 020012, <https://doi.org/10.1063/1.5131879>
19. Gustavsson F., Jacobson S. Diverse mechanisms of friction induced self-organisation into a low-friction material – An overview of WS₂ tribofilm formation // Tribology International. – 2016. – V. 101. – P. 340–347.
20. Cai W., Bellon P. Microstructural self-organization triggered by twin boundaries during dry sliding wear // Acta Materialia. – 2012. – V. 60. – P. 6673–6684.
21. Kubota Y., Nagasaka S., Miyauchi T., Yamashita C., Kakishima H. Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current // Wear. – 2013. – V. 302 – P. 1492–1498.
22. Aleutdinova M. I., Fadin V. V. Wear Behavior of Metals in Dry Sliding against Molybdenum with Current Collection // Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – V. 11(6). – P. 1378–1382. DOI: 10.1134/S2075113320060027.
23. Dervos C. T., Vassiliou P., Novacovic J. Electroless Ni–B plating for electrical contact applications // Revista de Metalurgia. – 2005. – V. 41 – P. 232–238.
24. Ma X. C., He G. Q., He D. H., C. S. Chen, Z. F. Hu. Sliding wear behavior of copper–graphite composite material for use in maglev transportation system // Wear. – 2008. – V. 265. – P. 1087–1092.
25. Altunpak Yahua. Wear behaviour of aged Cu–Be alloy under electrical sliding // Scientific research and essays. – 2010. – V. 5(19). – P. 2997–3002.
26. Kwok C. T., Wang P. K., Man H. C., Cheng F. T. Sliding wear and corrosion resistance of copper-based overhead catenary for traction systems // IJR International Journal of Railway. – 2010. – V. 3 (1). – P. 19–27.
27. Demirel M., Muratoglu M. The friction and wear behavior of Cu–Ni₃Al composites by dry sliding // Materials and technology. – 2011. – V. 45 (5). – P. 400–406.

УДК 669.245.017.165:621.762.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ РАВНООСНОГО ЛИТЬЯ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Э. Г. АРГИНБАЕВА, канд. техн. наук, О. А. БАЗЫЛЕВА, канд. техн. наук,
А. Г. ЕВГЕНОВ, канд. техн. наук, С. М. ПРАГЕР

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

Поступила в редакцию 19.04.2021

После доработки 30.04.2021

Принята к публикации 30.04.2021

Представлены результаты исследований композиции интерметаллидного никелевого сплава на базе литейного монокристаллического ренийсодержащего сплава марки ВКНА-25 для изготовления деталей методами аддитивных технологий. Показано, что при повышенном содержании углерода и карбидообразующих элементов, а также при соблюдении условий сбалансированности химического и фазового составов можно обеспечить оптимальное сочетание значений кратковременной и длительной прочности.

Ключевые слова: интерметаллид никеля, аддитивные технологии, монокристалл, прочность, карбид, термическая обработка, эксперимент

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-38-46

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. – 2017. – № 1. – С. 2–6.
2. Каблов Е. Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. – 2015. – № 2 (11). – С. 52–55.
3. Суфияров В. Ш., Попович А. А., Борисов Е. В., Полозов И. А. Селективное лазерное плавление жаропрочного никелевого сплава // *Цветные металлы*. – 2015. – № 1 (865). – С. 79–84.
4. Yadroitsev I., Smurov I. Selective laser technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape // *Physics Procedia*. – 2010. – V. 5. – P. 551–560.
5. Евгенов А. Г., Горбовец М. А., Прагер С. М. Структура и механические свойства жаропрочных сплавов ВЖ159 и ЭП648, полученных методом селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. – 2016. – № S1 (43). – С. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15. <https://3d-daily.ru/technology/additive-manufacturing-materials.html>
6. Базылева О. А., Оспенникова О. Г., Аргинбаева Э. Г., Летникова Е. Ю., Шестаков А. В. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № S. – С. 104–115. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115.
7. Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Шестаков А. В., Колядов Е. В. Структурные параметры и механические свойства интерметаллидного сплава на основе никеля, полученного методом направленной кристаллизации // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №12. ст.01 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 19.06.2019 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-1-1
8. Бунтушкин В. П., Буркина В. И., Тимофеева О. Б., Юшакова Ф. В. Состав, структура и свойства монокристаллического сплава ВКНА-25 // *Авиационные материалы и технологии*. – 2008. – № 1. – С. 10–14.
9. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Петрушин. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе γ' -фазы для лопаток ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.
10. Высокоэффективные технологии и современное оборудование для производства шихтовых заготовок из литейных жаропрочных сплавов / В. В. Сидоров и др. // *Металлург*. – 2012. – № 5. – С. 26–30.
11. Карачевцев Ф. Н., Загвоздкина Т. Н., Орлов Г. В. Разработка и исследование метрологических характеристик экспресс-методики анализа жаропрочных никелевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №11. ст.09 URL: <http://www.viam-works.ru> (Дата обращения 15.06.2019 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-9-9
12. Морозова Г. И. Сбалансированное легирование жаропрочных никелевых сплавов // *Металлы*. – 1993. – № 1. – С. 38–41.
13. Базылева О. А., Поварова К. Б., Казанская Н. К., Дроздов А. А. Литейные сплавы на основе Ni_3Al и способ их выплавки // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2010. – № 1. – С. 29–35.
14. Базылева О. А., Каблов Е. Н., Фомин А. А., Прокофьев В. П. Литейный высокотемпературный жаростойкий сплав // *Материаловедение*. 2005. № 2. С. 27–31.
15. Каблов Е. Н., Бунтушкин В. П., Морозова Г. И., Базылева О. А. Основные принципы легирования интерметаллида Ni_3Al при создании высокотемпературных сплавов // *Материаловедение*. – 1998. – № 7. – С. 13–15.
16. Морозова Г. И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов // *МиТОМ*. – 2012. – № 12. – С. 52–58.
17. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

**ВЛИЯНИЕ ГОМОГЕНИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА НА СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ δ -ФЕРРИТА
В ВЫСОКОПРОЧНОЙ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА
МАРКИ 07X15H5Д4Б, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

М. И. ОЛЕНИН, д-р техн.наук, А. Д. КАШТАНОВ, д-р техн.наук, О. Н. РОМАНОВ, канд. техн.наук,
В. В. МАХОРИН

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

Поступила в редакцию 24.05.2021

После доработки 1.06.2021

Принята к публикации 4.06.2021

Проведено комплексное исследование влияния температурно-временных параметров гомогенизирующего отжига и связанных с ним структурных изменений на содержание δ -феррита в высокопрочной высокохромистой стали мартенситного класса марки 07X15H5Д4Б, полученной методом селективного лазерного сплавления. Показано, что гомогенизирующий отжиг при температуре 1150°C с выдержкой 8 ч позволяет снизить содержание δ -феррита, устранить ячеистую структуру, а также повысить прочностные свойства исследуемой стали.

Ключевые слова: высокохромистая сталь мартенситного класса, селективное лазерное сплавление, гомогенизирующий отжиг, содержание δ -феррита

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-47-54

ЛИТЕРАТУРА

1. Бескоровайный Н. М., Калинин Б. А., Платонов П. А., Чернов И. И. Конструкционные материалы ядерных реакторов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 704 с.
2. Азбукин В. Г., Горынин В. И., Павлов В. Н. Перспективные коррозионно-стойкие материалы для оборудования и трубопроводов АЭС. – СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 1997. – 118с.
3. Осипенко О. Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии: Юбилейный научн.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»)*. – М.: ВИАМ, 2012. – С. 19–35.
4. Патент РФ № 2388833. Способ термической обработки высокопрочной коррозионно-стойкой стали мартенситного класса / Оленин М. И., Бережко Б. И., Горынин В. И., Павлов В. Н., Быковский Н. Г., Осипова И. С. Опубликовано 10.05.2010. Бюл. № 13.
5. Оленин М.И., Павлов В.Н., Быковский Н.Г., Башаева Е.Н., Гусельникова Т.М. Влияние гомогенизации на хладостойкость высокопрочных коррозионно-стойких сталей // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 2(58). – С. 33–37.
6. Мельникова М. А., Колчанов Д. С. Селективное лазерное плавление: применение и особенности формирования трехмерных конструктивных технологических элементов // *Фотоника*. – 2017. – № 2 (62). – С. 42–49.
7. Гуляев А.П. *Металловедение: Учебник для вузов*. – М.: Альянс, 2012. – 644 с.
8. Горынин В.И., Оленин М.И. Пути повышения хладостойкости сталей и сварных соединений. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 342 с.
9. Голиков И. Н., Масленков С. Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. – М.: Металлургия, 1977. – 227 с.
10. Чернявская С. Г., Красникова С. И., Суламенко А. В. Изменение дельта-феррита в стали 1X16H4Б при гомогенизации // *МИТОМ*. – 1972. – № 9. – С. 66–67.
11. Анастасиади Г. П., Сильников М. В. Неоднородность и работоспособность стали. – СПб.: Полигон, 2002. – 624 с.
12. Липпольд Д., Котеки Д. *Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей / Пер. с англ. / Под ред. Н. А. Соснина, А. М. Левченко*. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 467 с.

13. Конструкционные материалы: Справочник / Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше и др. / Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.

14. Марочник сталей и сплавов. Изд. 2-е / Зубченко А. С., Колосков М. М., Каширский Ю. В. и др. / Под общей ред. А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

УДК 621.746.6:669.24'27

ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЬНЫХ ЗАТРАВОК [001] ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ni–W МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

В. Н. ТОЛОРАЙЯ, Г. А. ОСТРОУХОВА

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
(ФГУП «ВИАМ») 105005, Москва, ул. Радио, д. 17. E-mail: viam.lab1@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2021

После доработки 8.06.2021

Принята к публикации 11.06.2021

Задача получения затравок из сплавов системы Ni–W возникла в связи с разработкой технологии литья монокристалльных турбинных лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) из высокожаропрочных сплавов. В этой технологии используется затравочный способ получения монокристалльных отливок с кристаллографической ориентацией [001] с применением затравок из сплавов системы Ni–W с температурой плавления на 120–140°C выше, чем сплав отливки. Применение таких затравок во многом упрощает проведение процесса литья турбинных лопаток с монокристаллической структурой, повышает его надежность как в проходных печах типа ПМП-2, так и в высокограддиентных печах типа УВНК-9А. Представлены результаты исследования влияния температурно-скоростных параметров направленной кристаллизации, а именно температурного градиента G_z на структуру полученных монокристалльных заготовок затравок, а также влияния вольфрама и углерода на структуру монокристалльных заготовок затравок, выданы рекомендации по оптимизации технологического процесса монокристалльного литья затравок Ni–W, дана корректировка состава сплава для затравок.

Ключевые слова: затравка, затравочная заготовка, монокристалльная структура, кристаллографическая ориентация, ростовой градиент G_z , разориентация, полосчатость

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-55-65

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрушин Н. В., Оспенникова О. Г., Светлов И. Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № S. – С. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.

2. Каблов Е. Н., Толорайя В. Н., Демонис И. М., Орехов Н. Г. Направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. – 2007. – № 2. – С. 60–70.

3. А. с. № 839153 СССР. № 2870437/22-02. Способ изготовления отливок из жаропрочных сплавов с направленной и монокристалльной структурой: Заявл. 16.01.80; Опубл. 27.07.2000

4. Пат. 1822375 РФ № 4878967/02. Способ получения затравок для литья монокристалльных изделий из никелевых жаропрочных сплавов; Заявл. 31.10.90; Опубл. 15.06.93. Бюл. № 22

5. Толорайя В. Н., Каблов Е. Н., Демонис И. М. Технология получения монокристаллических отливок турбинных лопаток ГТД заданной кристаллографической ориентации из ренийсодержащих жаропрочных сплавов // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина. – М.: Наука, 2006. – С. 206–219.

6. Толорайя В. Н., Некрасов С. Н., Остроухова Г. А. Сравнительный анализ структуры и свойств отливок из жаропрочных сплавов, полученных на установках типа УВНК и ПМП // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2018. – № 5–6 (31). – С. 3–20.

7. Толорайя В. Н., Каблов Е. Н., Чабина Е. Б. Влияние режимов роста на структуру и ликвационную неоднородность монокристаллов никелевого жаропрочного сплава ЖС36 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № S5. – С. 203–224.

8. Каблов Е. Н., Толорайя В. Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 105–116.

9. Кузьмина Н. А., Лифшиц В. А., Потрахов Е. Н., Потрахов Н. Н. Сравнительный контроль структуры монокристаллических отливок никелевых жаропрочных сплавов рентгеновскими дифракционными методами «качания» и Лауэ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2019. – № 9. – Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 12.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-15-25.

10. Кузьмина Н. А., Пьянкова Л. А. Контроль кристаллографической ориентации монокристаллических отливок никелевых жаропрочных сплавов методом рентгеновской дифрактометрии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2019. – № 12. – Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 12.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.

11. Назаркин Р. М., Колодочкина В. Г., Оспенникова О. Г., Орлов М. Р. Изменения микроструктуры монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов в процессе длительной эксплуатации турбинных лопаток // *Авиационные материалы и технологии*. – 2016. – № 4 (45). – С. 9–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-9-17.

12. Толорайя В. Н., Каблов Е. Н., Демонис И. М., Орехов Н. Г. Современные технологии получения отливок лопаток двигателей ГТД и ГТУ методами направленной кристаллизации // *75 лет. Авиационные материалы*. – М.: ВИАМ, 2007. – С. 44–58.

13. Чалмерс Б. Процессы роста и выращивание монокристаллов. – М.: Иностранная литература, 1963. – С. 314–315.

14. Каблов Е. Н., Толорайя В. Н., Остроухова Г. А., Алешин И. Н. Исследование ростовых дефектов типа полосчатость в монокристалльных отливках из безуглеродистых жаропрочных сплавов // *Двигатель*. – 2010. – № 6 (72). – С. 14–16.

15. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б., Толорайя В. Н., Гаврилин О. С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.

16. Толорайя В. Н., Каблов Е. Н., Орехов Н. Г., Чубарова Е. Н. Методы получения монокристаллов жаропрочных сплавов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2005. – № 55. – С. 172–189.

17. Толорайя В. Н., Каблов Е. Н., Орехов Н. Г., Остроухова Г. А. Структура и ростовые дефекты монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2005. – № 55. – С. 190–202.

УДК 621.762.2:621.763:621.793.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА И СВОЙСТВ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ Ti/TiB₂.

М. Е. ГОШКОДЕРЯ, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, М. В. СТАРИЦЫН

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

Поступила в редакцию 2.04.2021

После доработки 7.04.2021

Принята к публикации 8.04.2021

Предложен метод получения композиционных порошков системы Ti/TiB₂, изучены свойства полученных композиционных порошков, а также проведена серия экспериментов по их микроплазменному напылению. Исследованы свойства напыляемых покрытий, на основании чего установлено оптимальное соотношение матричного и армирующего компонентов с целью существенного повышения твердости напыляемых покрытий.

Ключевые слова: порошковые композиционные материалы, механосинтез, композиционный порошок, металломатричный порошок, система Ti/TiB₂, микроплазменный метод напыления

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-66-73

ЛИТЕРАТУРА

1. Лепаква О. К. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез диборидов титана в системах Ti–B и Ti–B–Fe // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск: Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 2000. – 26 с.
2. Гальченко Н. К., Самарцев В. П., Колесникова К. А., Белюк С. И., Гальченко В. Г. Принципы формирования защитных покрытий на основе диборида титана на поверхности металлических катодов при плазменном напылении // Вестник ТГУ. – 2013. – Т. 18, вып. 4. – С. 1815–1816.
3. Медко В. С.; Радкевич М. М.; Третьяков В. П. Технология конструкционных материалов. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого), 2019. – 218 с.
4. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. – М.: Машиностроение, 1996. – С. 499–500.
5. Прибытков Г. А., Коржова В. В., Криницын М. Г., Фирсина И. А., Коростелева Е. Н. Твердость и абразивная износостойкость электронно-лучевых покрытий, наплавленных композиционными порошками «моноборид титана – титановая связка» // Международная конференция «Химия нефти и газа. Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», 2018. – С. 360–361.
6. Иванов С. Г., Гурьев М. А., Логинова М. В., Деев В. Б., Гурьев А. М. Борирование титана ОТ4 из порошковых насыщающих сред // Металловедение и термическая обработка. – 2016. – С. 59–65.
7. Патент RU 2398655. Способ получения металлического состава из титана, содержащего диспергированные в нем частицы бориды титана / Вудфилд Э. Ф., Отт Э. А., Шамблен К. Э., Гильютти М. Ф., Юта Д. А., Тернер А. Г. Оpubл. 10.09.2010.
8. Патент RU 2388082. Микрокомпозиционный конструкционный материал и конструктивный элемент газотурбинного двигателя / Вудфилд Э. Ф., Отт Э. А., Шамблен К. Э. Оpubл. 27.04.2010.
9. Патент RU 2711699. Способ получения композиционного материала Ti / TiB / Озеров М. С., Соколовский В. С., Климова М. В., Степанов Н. Д., Жеребцов С. В. Оpubл. 21.01.2020.
10. Большаков В. И., Харченко В. И., Вашкевич Ф. Ф., Спильник А. Я., Журавель В. И., Загородный А. Б., Любушкин В. И., Замковой В. Е., Милосердов А. Б., Евтерев Ю. Н. Сравнительные исследования износостойких материалов для плазменного напыления // Металлознание и термична обробка (Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, г. Запорожье). – 2010. – С. 10–22.
11. Зубарев Ю. М., Ревин Н. Н. Методы термической обработки и упрочнения металлов. повышение работоспособности деталей машин и инструментов. Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. – 128 с.
12. Калита В. И., Комлев Д. И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой. – М.: Лидер М, 2008. – 388 с.

УДК 621.793.7:669.24'26'28

ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ НИКЕЛЬ – ХРОМ – МОЛИБДЕН С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР

Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, А. М. МАКАРОВ,
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 16.03.2021

После доработки 29.03.2021

Принята к публикации 31.03.2021

Приведены результаты экспериментальных исследований сплавов системы Ni–Cr–Mo–Be–Re–Zr–Hf–Nb для создания на их основе функциональных износостойких покрытий методом мик-

роплазменного напыления. Покрытие эффективно работает в широком диапазоне положительных (до 1100°C) и отрицательных (до минус 196°C) температур.

Ключевые слова: износостойкость, защитное покрытие, конструкционные материалы, композитные материалы, рабочие температуры

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-74-79

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Бондаренко Ю. А., Колодяжный М. Ю., Сурова В. А., Нарский А. Р. Перспективы создания высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц и естественных композитов // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 4(104). – С. 64–78.

2. Геращенко Д. А., Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Кузнецов П. А., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. Функциональные защитные покрытия из сплава на основе никеля // Вопросы материаловедения – 2018. – № 1(93). – С. 110–114.

3. Фармаковский Б. В. Изготовление тонких металлических нитей из хрупких высокопрочных материалов // Изв. Академии наук СССР. Металлы. – 1977. – № 2. – С. 239–245.

4. Потапов А. А. Атомно-молекулярная сборка на основе химической связи: природа и механизм формирования // Нанотехника. – 2010. – № 2. – С. 14–27.

5. ДИМЕТ. Применение технологии и оборудование // Интернет-ресурс. Режим доступа <http://www.dimet-r.narod.ru>. Дата обращения 18.04.2021.

6. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Под ред. Ж. И. Алферова и др. – СПб.: Изд-во И. П. Пермяков С.А., 2015. – 543 с.

7. Головин Ю. И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение, 2007. – 162 с.

УДК 621.762.222:621.763: 621.793.7

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ – НИТРИД КРЕМНИЯ, ДОПОЛНИТЕЛЬНО АРМИРОВАННЫХ ФАЗОЙ ТИПА СИАЛОН

Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, А. И. ДМИТРИЮК, Е. А. НЕЖЕНСКИЙ, Н. А. ЛУКЬЯНОВА

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

Поступила в редакцию 5.03.2021

После доработки 31.03.2021

Принята к публикации 1.04.2021

Работа посвящена изучению процесса синтеза композиционного порошка системы алюминий – нитрид кремния с целью выявления механизма образования гранул и распределения в них упорочняющей фазы типа сиалон (SiAlON). Исследованы свойства порошкового композита, полученного с применением различных режимов механосинтеза. Приводятся результаты определения твердости, химического состава и распределения элементов в получаемом покрытии.

Ключевые слова: композиционные материалы, наноструктурированные порошки, композиционные покрытия, алюминиевые покрытия.

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-80-89

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцева Т. В., Озерец Н. Н., Левина А. В., Ишина Е. А. Цветные металлы и сплавы: Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2019. – 176 с.

2. Кузьмин Ю.Л., Орыщенко А.С. Коррозия и электрохимическая защита морских судов. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2017. – 288 с.

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

4. Кошелев В.Н. Особенности технологии нанесения пиролитических алюминиевых покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. – 2009. – № 2. – С. 10–14.
5. Рогов В. А., Соловьев В. В., Копылов В. В. Новые материалы в машиностроении: Учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 324 с.
6. Алферов Ж. И., Белый О. В., Двас Г. В., Иванова Е. А. Перспективные направления развития науки в Петербурге. – СПб.: Изд-во: ИП Пермяков С.А., 2015. – С. 137–163.
7. Бобкова Т. И. Микроплазменное напыление износостойких покрытий, армированных наноразмерными частицами // *Труды конференции молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»*, 20–22 июня 2012, Санкт-Петербург, 2013. – С. 45–49.
8. Материалы конференции «Применение композиционных материалов в судостроении» – необходимо создание центра компетенций в Санкт-Петербурге 25.04.2016. [Электронный ресурс] URL: https://plastinfo.ru/information/news/29454_12.04.2016/. Дата обращения 29.06. 2021.
9. Зборщик А. М. Новые материалы в металлургии: Конспект лекций. – Донецк: ГВУЗ «Дон-НТУ», 2008. – 253 с.
10. Kim K. A., Lysenkov A. S., Titov D. D. Rheological properties of Si_3N_4 and Si_3N_4 with sintering additive $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ powders // *IOP conf. Series: Material Science and Engineering May*, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/848/1/012032
11. Заявка на патент РФ в ФИПС № 2018130610, Способ получения градиентного композиционного покрытия и композиционного порошка на основе алюминия с нитридом кремния для его напыления / Бобкова Т. И., Фармаковский Б. В., Соколова Н. А., 23.08.2018.
12. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабров В. А., Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск: Удмуртия, 2014. – 480 с.
13. Ловшенко Ф. Г., Ловшенко Г. Ф., Федосенко А. С. Структура, фазовый состав и свойства газотермических покрытий из механически легированных терморреагирующих композиционных порошков системы никель – алюминий – оксид никеля // *Вестник Белорусско-Российского университета*. – 2015. – № 3(48). – С. 33–44.
14. Бобкова Т. И., Фармаковский Б. В., Богданов С. П. Создание композиционных наноструктурированных поверхностно-армированных порошковых материалов на основе систем Ti/WC и Ti/TiCN для напыления покрытий повышенной твердости // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 3 (83). – С. 80–90.
15. Гарькина И. А., Данилов А. М., Сорокин Д. С. Синтез композиционных материалов с позиции классической теории оптимального управления // *Технические науки. Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 9. – С. 1411–1416.
16. Гарькина И. А., Данилов А. М., Домке Э. Р., Королев Е. В. Синтез композиционных материалов как сложных систем // *Вестник МАДИ (ГТУ)*. – 2009. – № 4 (19). – С. 48–55.
17. Бобкова Т. И., Фармаковский Б. В., Соколова Н. А. Наноструктурированные порошки на основе алюминия, армированные нитридом кремния, для напыления многофункциональных покрытий с повышенной твердостью // *Вопросы материаловедения*. – 2018. – № 1 (97). – С. 65–73.
18. Куприянов И. Л., Геллер М. А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. – Минск: Наука і тэхніка, 1990. – 176 с.

УДК 621.793.7:669.296'293'6

КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЕ ЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ СИСТЕМЫ Zr-Nb-Sn, ПОЛУЧЕННОЕ С ПОМОЩЬЮ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, Е. А. САМОДЕЛКИН,
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 16.03.2021

После доработки 29.03.2021

Принята к публикации 31.03.2021

Приведены результаты экспериментальных исследований по созданию оптимального состава сплава системы Zr–Nb–Sn для получения коррозионно-стойких покрытий с использованием технологии сверхзвукового холодного газодинамического напыления. Даны практические рекомендации по использованию разработанного покрытия в изделиях прецизионного машиностроения.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, выплавка сплава, сверхзвуковое холодное газодинамическое напыление, микротвердость, прецизионное машиностроение

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-90-96

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Отв. ред. Ж. И. Алферов, О. В. Белый, Г. В. Двас, Е. А. Иванова. – СПб.: Изд-во И.П. Пермяков С.А., 2015. – 543 с.
2. Потапов А. А. Атомно-молекулярная сборка на основе химической связи: природа и механизм формирования // Нанотехника. – 2010. – № 2 – С. 14–27.
3. Эрлих Г. В. Малые объемы – большие идеи. Широкий взгляд на нанотехнологии / Под ред. Л. Н. Патрикеева. – М.: Бином. Лаборатория знаний. – 2017. – 254 с.
4. Андреева В. В., Глухова А. И., Каменская Е. А., Селезнев Л. И., Мальцев В. М. Сплавы редких металлов // Труды Института металлургии АН СССР. – М.: Металлургиздат, 1968. – С. 156–168.
5. Геращенко Д. А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом холодного газодинамического напыления на основе армированных порошков системы Al–Zn + Al₂O₃ // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2015.
6. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. – С. 128–129.
7. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю. Исследование адгезионной прочности композиционных армированных покрытий системы металл – неметалл, полученных методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(78) – С. 103–117.
8. Межгосударственный стандарт ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости (с изменением №1).
9. Дамаскин Б. Б., Петрий О. А., Цирлина Г. А. Электрохимия. – М.: Химия, КолосС, 2006. – 672 с.
10. Лукошкин Ю. Я., Гамбург Ю. Д. Физико-химические основы электрохимии. – Долгопрудный: Интеллект, 2013. – 446 с.
11. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Перспективные исследования и разработки Научного нанотехнологического центра ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в области новых наноматериалов // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(78) – С. 118–128.

УДК 621.793.7:66.097.3

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ НИКЕЛЬ – АЛЮМИНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Н. В. ЯКОВЛЕВА¹, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ¹, канд. техн. наук, Р. Ю. БЫСТРОВ¹,
М. А. ЮРКОВ², канд. техн. наук

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

² ОАО «Вириал», 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27, литер Р, пом. 1-Н

Поступила в редакцию 19.04.2021

После доработки 17.05.2021

Принята к публикации 25.05.2021

Приведены результаты комплексных исследований по разработке инновационной технологии микроплазменного напыления каталитически активных систем на основе интерметаллидных ком-

позиций никель – алюминий. Изготовлена и испытана партия высокочастотных химических источников тока на основе этих композиций, имеющих уровень массовой энергии до 250 Вт ч/кг.

Ключевые слова: микроплазменное напыление, катализатор, синтез-газ, водород, ленточный носитель, химический источник тока

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-97-104

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Отв. ред. Ж. И. Алферов и др. – СПб.: Изд-во И. П. Пермяков С. А., 2015. – 543 с.
2. Шолкин С. Е., Юрков М. А. Исследование процесса микроплазменного нанесения наноструктурированных покрытий системы «металл – интерметаллид» и «металл – неметалл» // Новые материалы и технологии в авиационной и ракетно-космической технике. – Королев: ИПК Машприбор, 2008. – С. 52–61.
3. Шолкин С. Е., Юрков М. А. Научно-технологический модуль нанотехнологического комплекса ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» для получения нанопорошков и наноструктурированных функциональных покрытий и оперативного контроля структуры и свойств // Сб. докладов 1-й Всероссийской научной конференции «Методы исследования состава и структуры функциональных материалов». – Новосибирск: Изд-во Института катализа им. Г. К. Борескова, 2009. – С. 159–163.
4. Патент РФ 2047354. Способ изготовления катализатора / С. И. Большаков, Л. И. Журавлева и др., 1992.
5. Патент РФ 2123881. Каталитический нейтрализатор отработавших газов двигателей внутреннего сгорания / Б. Н. Перевозчиков, В. А. Мелехин, 1998.
6. Патент РФ 2126716. Каталитическая система для окислительного аммонолиза алкилпиридинов / Б. В. Суворов, Л. А. Степанова, Н. А. Белова, 1999.
7. Патент РФ 2136365. Способ изготовления катализатора окисления оксида углерода выхлопных газов / В. П. Морозов, З. Ф. Хайдаров, 1999.
8. Юрков М. А. Микроплазменное напыление объемно-пористых покрытий для катализаторов паровой конверсии углеводородного сырья в водородсодержащее топливо и водоактивируемых химических источников тока // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2011.
9. Балабанов В. И. Нанотехнологии. Наука будущего. – М.: Эксмо, 2009. – 247 с.
10. Фармаковский Б. В., Улин И. В. Функциональные материалы и покрытия – пути и надежды // По пути созидания. Т. 2 / Под ред. академика РАН И. В. Горынина. – СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. – С. 149–164.
11. Физико-химические процессы наноразмерных объектов // Жабрив В. А. и др. – СПб.: Элмор, 2012. – 327 с.
12. Важнова А. И., Марукович А. И., Сморгы О. Л. Композиционные гранулы для получения высокопористых материалов на основе титана // Сб. докл. 11-го Международного симпозиума, Минск, 10–12 апреля 2019 г. – С.101–108.
13. Горынин И. В. Размышления с оптимизмом. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. – 526 с.
14. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Перспективные исследования и разработки научного нанотехнологического центра ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в области новых наноматериалов // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(78). – С. 118–128.

УДК 621.762.222:621.763:621.793.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА НИКЕЛЬ-АЛЮМИНИЕВОЙ БРОНЗЕ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКОВ НИКЕЛЯ

Е. Ю. ГЕРАЩЕНКОВА, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, канд. техн. наук, А. Н. БЕЛЯКОВ

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

Поступила в редакцию 24.05.2021

После доработки 8.06.2021

Принята к публикации 11.06.2021

Представлены результаты комплексного исследования режимов лазерной обработки при формировании покрытия на никель-алюминиевой бронзе с использованием порошков никеля. Покрытие было получено в два этапа. На первом этапе было нанесено прекурсорное покрытие порошкового материала методом холодного напыления, на втором произведена его поверхностная обработка лазером. Показано изменение состава и свойств покрытия в зависимости от режимов обработки и толщины прекурсорного покрытия, а также режимов лазерной обработки.

Ключевые слова: никель-алюминиевая бронза, прекурсорное покрытие, лазерная обработка, порошковый материал

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-105-112

ЛИТЕРАТУРА

1. Leyens C., Beyer E. Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition // Laser Surface Engineering, Woodhead Publishing. – Cambridge: Elsevier, 2015. – P. 181–192.
2. Nowotny S., Berger L–M., Spatzier J. Coatings by Laser Cladding // Comprehensive Hard Materials, Woodhead Publishing. – Cambridge: Elsevier, 2014. – P. 507–525.
3. Chandler K. Non-ferrous metals and alloys
4. Геращенко Д.А., Васильев А.Ф., Фармаковский Б.В., Машек А.Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 1 (77). – С. 87–96.
5. Oryshchenko A.S., Gerashchenkov D.A. Aluminum matrix functional coatings with high microhardness on the basis of Al–Sn + Al₂O₃ composite powders fabricated by cold gas dynamic spraying // Inorganic Materials: Applied Research. – 2016. – № 7 (6). – P. 863–867.
6. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Alkimov A., Fomin V. Cold Spray Technology / Elsevier, 2007.
7. Nath A.K., Sarkar S. Laser Transformation Hardening of Steel // Advances in Laser Materials Processing (Second Edition). – 2018. – P. 257–298.
8. Shipway P.H., Hussain T., Preston S.P., Davis C. Process parameter optimisation of laser clad iron based alloy: Predictive models of deposition efficiency, porosity and dilution // Surface and Coatings Technology. – 2008. – P. 198–207.
9. Gerashchenkov D.A., Farmakovskii B.V., Bobkova T.I., Klimov V.N. Features of the Formation of Wear-Resistant Coatings from Powders Prepared by a Micrometallurgical Process of High-Speed Melt Quenching // Metallurgist. – 2017. – V. 60. – № 9/10. – P. 1103–1112.
10. Tang C., Cheng F., Man H. Effect of laser surface melting on the corrosion and cavitation erosion behaviors of a manganese–nickel–aluminum bronze // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – V. 373. – № 1–2. – P. 195–203.
11. Kwok C.T., Cheng F.T., Man H.C. Laser-fabricated Fe–Ni–Co–Cr–B austenitic alloy on steels. Part II. Corrosion behavior and corrosion–erosion synergism // Surface and Coatings Technology. – 2001. – № 145 (1–3). – P. 206–214.

УДК 621.793.1:539.23

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ ПЛЕНОК WO₃ НА ПОВЕРХНОСТИ Sn, Ti И ИТО-ЭЛЕКТРОДОВ В ПРОЦЕССЕ КАТОДНОГО ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ

А.В. ЩЕГОЛЬКОВ¹, М.С. ЛИПКИН², д-р техн. наук, А.В. ЩЕГОЛЬКОВ¹, канд. техн. наук,
Е.В. КОРБОВА², Т.В. ЛИПКИНА², канд. техн. наук, В.М. ЛИПКИН², канд. техн. наук

¹ Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, 392000, ул. Советская, 106. E-mail: alexxx5000@mail.ru

² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 346400, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Поступила в редакцию 21.04.2021

После доработки 10.06.2021

Принята к публикации 17.06.2021

Исследован механизм электрохимического формирования пленок WO_3 на поверхности титанового, оловянного и ИТО-электрода при различных режимах, включающих в себя время осаждения $\tau = 2000\text{--}8000$ с, электрохимический потенциал осаждения на катоде в диапазоне от $-0,4$ до -1 В. Представлена методика синтеза пероксивольфрамовой кислоты и метод катодного электроосаждения. Проведенные исследования с оловом и титаном расширяют область применения пленок WO_3 для технологий создания химических источников тока и топливных элементов.

Ключевые слова: пероксивольфрамовая кислота, электрохимическое осаждение, хроноамперометрия, циклическая вольтамперометрия

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-113-126

ЛИТЕРАТУРА

1. Lampert C. M. Large-area smart glass and integrated photovoltaics // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2003. – V. 76. – P. 489–499.
2. Monk P.M.S., Mortimer R.J., Rosseinsky D.R. *Electrochromism and electrochromic devices*. – New York: Cambridge University Press, 2007. – 483 p.
3. Granqvist C. G. *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials*. – Amsterdam: Elsevier Science, 1995. – 633 p.
4. Pehlivan B., Qu H., Wen R., Granqvist C. G., Arvizu M. A., Niklasson G. A. Electrochromic materials and devices for energy efficiency and human comfort in buildings: A critical review // *Electrochimica Acta*. – 2018. – V. 259. – P. 1170–1182.
5. Wu W., Wang M., Ma J., Cao Y., Deng Y., *Electrochromic Metal Oxides: Recent Progress and Prospect* // *Adv. Electron. Mater.* – 2018. – V. 4. – P. 1800185 (1–19).
6. Shiyanovskaya I., Hepel M., Tewksbury E. Electrochromism in electrodeposited nanocrystalline WO_3 films I. Electrochemical and optical properties // *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*. – 2000. – V. 3. – P. 241–247.
7. Meulenkaamp E.A. Mechanism of WO_3 Electrodeposition from Peroxy-Tungstate Solution // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1997. – V. 144. – N 5. – P. 1664–1671.
8. Somani P.R., Radhakrishnan S. Electrochromic materials and devices: present and future // *Materials Chemistry and Physics*. – 2002. – V. 77. – P. 117–133.
9. Hanaor D.A.H., Triani G., Sorrell C. C. Morphology and photocatalytic activity of highly oriented mixed phase titanium dioxide thin films // *Surf Coat Technol.* – 2011. – V. 205. – P. 3658–3664.
10. Nakaruk A., Ragazzon D., Sorrell C.C. Anatase rutile transformation through high-temperature annealing of titania films produced by ultrasonic spray pyrolysis // *Thin Solid Films*. – 2010. – V. 518. – P. 3735–3742.
11. Фоминский В. Ф. Григорьев С. Н., Романов П. И., Зуев В. В., Григорьев В. В. Свойства тонких пленок оксида вольфрама, формируемых методами ионно-плазменного и лазерного осаждения для детектора водорода на основе структуры $MOSiC$ // *Физика и техника полупроводников*. – 2012. – Т. 46, вып. 3. – С. 416–424.
12. Vijayakumar E., Yong-Han Y., Quy Vu H. V., Lee Y.-H., Kang S.-H., Ahn K.-S., Lee S.W. Development of Tungsten Trioxide Using Pulse and Continuous Electrodeposition and Its Properties in Electrochromic Devices // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2009. – V. 166 (4). – P. 86–92.
13. Kwong W. L., Qui H., Nakaruk A., Koshy P., Sorrell C.C. Photoelectrochemical Properties of WO_3 Thin Films Prepared by Electrodeposition // *Energy Procedia*. – 2013. – V. 34. – P. 617–626.
14. Zhi M., Huang W., Shi Q., Wang M., Wang Q. Sol-gel fabrication WO_3/RGO nanocomposite film with enhanced electrochromic performance // *RSC Adv.* – 2016. – V. 6. – P. 67488–67494.
15. Ng Ch., Ye Ch., Ng Y.H., Amal R. Flower-shaped tungsten oxide with inorganic fullerene-like structure: synthesis and characterization // *Crystal Growth and Design*. – 2010. – V. 10. – P. 3794–3801.
16. Pauporte T. A Simplified Method for WO_3 Electrodeposition // *Journal of the Electrochemical Society*. – 2002. – V. 149 (11). – P. 539–545.

17. Arakaki J., Reyes R., Horn M., Estrada W. Electrochromism in NiO_x and WO_x obtained by spray pyrolysis // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 1995. – V. 37. – P. 33–41.
18. Lemire C., Lollman D. B. B., Mohammad A. A., Gilet E., Aguir K. Reactive R.F. magnetron sputtering deposition of WO₃ thin films // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2002. V. 84 (1). – P. 43–48. doi.org/10.1016/S0925-4005(02)00009-6.
19. Kwong W.L., Savvides N., Sorrell C.C. Electrodeposited nanostructured WO₃ thin films for photoelectrochemical applications // *Electrochim. Acta*. – 2012. – V. 75. – P. 371–380.
20. Baeck S.H., Jaramillo T., Stucky G.D., McFarland E.W. Controlled electrodeposition of nanoparticulate tungsten oxide // *NanoLett*. – 2002. – V. 2(8). – P. 831–834.
21. Soliman H.M.A., Kashyout A.B., El Nouby M.S., Aboeshly AM. Preparation and characterizations of tungsten oxide electrochromic nanomaterials // *J Mater Sci-Mater Electron*. – 2010. – V. 21(12). – P. 313–321.
22. Yang B., Li H.J., Blackford M., Luca V. Novel low density mesoporous WO₃ films prepared by electrodeposition // *Curr. Appl. Phys*. – 2006. – V. 6. – P. 436–439.
23. Щегольков А. В., Щегольков А. В. Электрохромные наноструктурные пленки WO₃, приготовленные электрохимическим осаждением: получение и свойства // *Перспективные материалы*. – 2020. – № 1. – С. 54–63.
24. Gellings P. J., Bouwmeester H. J. M. The CRC handbook of solid state electrochemistry. – CRC Press, 1997. – P. 618.
25. Bockris J.O'M., Reddy A.K.N., Gamba-Aldeco M. Modern electrochemistry. V. 2A: Fundamentals of Electrodeics. – Kluwer academic publishers. – 2002. – P. 817.
26. Neghmouche N., Khelef A., Lanez T. Investigation of diffusion of ferrocene and ferricenium in aqueous and organic medium using voltammetry techniques // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Science*. – 2010. – V. 1, N 1. – P. 76–82.

УДК 666.3–187:661.862'022

ВКЛАД ГИБРИДНОЙ КОМПОНЕНТЫ В СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ФАЗ Al₂O₃

А. В. МАЛЕЦКИЙ, Т. Е. КОНСТАНТИНОВА, д-р физ.-мат. наук, Д. Р. БЕЛИЧКО, Г. К. ВОЛКОВА,
В. В. БУРХОВЕЦКИЙ

*Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, 83114 Донецк,
ул. Розы Люксембург, 72, E-mail: sashamalecki097@gmail.com*

Поступила в редакцию 26.04.2021

После доработки 3.05.2021

Принята к публикации 20.05.2021

Представлены результаты исследования влияния легирования оксидом иттрия на керамику состава $(\gamma + \theta)Al_2O_3 + nY_2O_3$ ($n = 0, 1, 2, 3$ мас. %), спеченную при 1550°C в течение 2 ч из порошков указанного состава при температурах 500, 800, 1000°C. Методом рентгеноструктурного анализа установлено образование в керамике алюмоиттриевого граната Y₃Al₅O₁₂ (YAG) и метастабильной фазы того же состава с тетрагональным типом решетки в порошках при температуре выше 1200°C. Установлено влияние YAG на физико-механические характеристики керамики. Максимальный уровень физико-механических свойств наблюдался в керамике состава $\alpha-Al_2O_3 + 0$ мас.% Y₂O₃, полученной из порошка, отожженного при 800°C. Обнаружен эффект так называемой «взаимной защиты от кристаллизации», заключающийся во взаимном торможении кристаллизационных процессов в порошках системы Al₂O₃–Y₂O₃.

Ключевые слова: оксид алюминия, оксид иттрия, фазовый состав, структура, алюмоиттриевый гранат, физико-механические характеристики

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-127-136

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотов К. А., Захаров А. И., Белова И. А. Подготовка шихты для изготовления муллитовых огнеупоров // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2013. – Т. 27, №5. – С. 40–43.

© 2021

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.cris-m-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

2. Леун Е. В., Леун В. И., Савенков В. А., Курлов В. Н., Никель А. В. Вопросы построения телескопических приборов активного контроля размеров изделий с корундовыми наконечниками // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6, №2. – С. 29–37.
3. Леун Е. В., Леун В. И., Шаханов А. Е. Метрологический анализ лазерных приборов активного контроля размеров изделий с использованием корундовых наконечников // ОНВ. – 2018. – Т. 2. – С. 98–103.
4. Симонова Г. В., Максимов В. Г. Конструктивные решения системы коллимации многоволнового излучения ND: YAG лазера // Интерэкспо гео-сибирь. – 2013. – Т. 5, № 3. – С. 63–67.
5. Wahsh M. M. S., Khattab R. M., Awaad M. Thermo-mechanical properties of mullite/zirconia reinforced alumina ceramic composites // Materials & Design. – 2012. – Т. 41. – Р. 31–36.
6. Abyzov A. Оксид алюминия и алюмооксидная керамика (обзор). Ч. 2: Зарубежные производители алюмооксидной керамики. технологии и исследования в области алюмооксидной керамики // Стекло и керамика. – 2018. – Т. 8. – С. 13–22.
7. Керамика из высокоогнеупорных окислов / В. С. Бакунов, В. Л. Балкевич, А. С. Власов и др. / Под ред. Д. Н. Полубояринова, Р. Я. Попильского. – М.: Металлургия, 1997.
8. Кнунянц И. Л. Химическая энциклопедия. Т. 1. – М.: Советская энциклопедия, 1988.
9. Бакунов В. С., Лукин Е. С. Особенности технологии высокоплотной технической керамики. Спекание оксидной керамики // Стекло и керамика. – 2008. – Т. 12, № 7. – С. 19–23.
10. Макаров Н. А. Использование добавок, образующих жидкую фазу при обжиге, в технологии корундовой керамики // Стекло и керамика. – 2003. – № 10. – С. 31–34.
11. Нейман А. Я., Ткаченко Е. В., Квичко Л. А., Коток Л. А. Условия и макромеханизм твердофазного синтеза алюминатов иттрия // Журнал неорганической химии. – 1980. – Т. 25, № 9. – С. 2340–2345.
12. Глушкова В. Б., Кржижановская В. А., Егорова О. Н., Удалов Ю. П., Качалова В. П. Взаимодействие оксидов иттрия и алюминия // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1983. – Т. 19, № 1. – С. 95–99.
13. Забелин Д. А., Чайникова А. С., Качаев А. А., Осин И. В., Гращенко Д. В. Синтез, структура и свойства керамики на основе оксинитрида алюминия (ALON), полученной методом искрового плазменного спекания // Труды ВИАМ. – 2019. – Т. 6 (78). – С. 13–19.
14. Li X., Luo J., Zhou Y. Spark plasma sintering behavior of AlON ceramics doped with different concentrations of Y_2O_3 // Journal of the European Ceramic Society. – 2015. – V. 35, N 7. – P. 2027–2032.
15. Малецкий А. В., Константинова Т. Е., Беличко Д. Р., Волкова Г. К., Бурховецкий В. В., Брюханова И. И., Головань Г. Н. Влияние легирования диоксидом циркония, стабилизированным иттрием, на структуру и свойства керамики на основе θ -оксида алюминия // ФТВД. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 63–74.
16. Danilenko I., Prokhorenko S., Konstantinova T., Ahkozov L., Burkhovetski V., Glazunova V. Effect of small amount of alumina on structure, wear and mechanical properties of 3Y-TZP ceramics // World Journal of Engineering. – 2014. – Т. 11. – P. 9–16.
17. Петров А. Н., Остроушко А. А. Фазовые превращения, сопровождающие синтез феррованадиевых гранатов // Журнал неорганической химии. – 1985. – Т. 30, № 10. – С. 2638–2641.
18. Михайлов Г. Г., Макровец Л. А. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий с оксидными системами. Диаграммы состояния оксидных систем с Y_2O_3 // Вестник ЮУрГУ. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 5–10.
19. Морозова Л. П., Лукин Е. С., Ефимовская Т. В., Смоля А. В., Получение керамики из алюмоиттриевого граната // Стекло и керамика. – 1978. – Т. 8, № 3. – С. 28–31.

20. Стрекаловский В. Н., Полежаев Ю. М., Пальгуйев С. Ф. Оксиды с примесной разупорядоченностью: состав, структура, фазовые превращения / Под ред. А. Д. Неуймина. – М.: Наука, 1987.

УДК 621.833:621.793.6 : 669.268

ТЕРМОДИФФУЗИОННОЕ ХРОМИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 20 ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Н. И. КИТАЕВ¹, Ю. В. ЯКИМОВИЧ¹, М. Ю. ШИГАЕВ², канд. мед. наук,
С. Я. ПИЧХИДЗЕ¹, д-р техн. наук

¹ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77. E-mail: kitaev-1995@mail.ru

²ООО «S Classclinic», 410031, Саратов ул. Чернышевского, 170/176

Поступила в редакцию 28.04.2021

После доработки 14.05.2021

Принята к публикации 19.05.2021

Для увеличения срока службы зубьев шестерни из стали 20, работающих при высоких ударных нагрузках, их основные поверхности подвергали высокотемпературной диффузионной металлизации – хромированию с применением токов высокой частоты. В результате диффузионной металлизации твердость поверхности повысилась в 5,1–5,4 раз – от HV 156–159 до HV 800–866, а уровень прочности – в 3,3 раза – от 250 до 820 МПа. Оптимальные параметры процесса диффузионной металлизации: сила тока $I = 0,25–0,3$ кА, мощность $P_3 = 8–10$ кВт, время выдержки $\tau = 8–10$ мин. Методом растровой электронной микроскопии установлено, что после диффузионного насыщения хромом поверхность зубьев шестерни имеет однородную структуру с четко выраженными переходными слоями, средняя толщина диффузионного слоя составила 0,06 мм. Энергодисперсионный анализ показал, что после диффузионной металлизации порошком хрома состав основного металла остался постоянным, изменилось лишь качественное соотношение компонентов. Методом рентгенофазового анализа было выявлено наличие α -Fe-фазы с внедрением хрома в поверхностный слой образца.

Ключевые слова: сталь, зубья шестерни, упрочнение, диффузионный слой, поверхность, насыщение хромом

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-137-145

ЛИТЕРАТУРА

1. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. Изд. 3-е. – М.: Машиностроение, 1989. – 98 с.
2. Ройх И. Л., Колтунова Л. Н., Федосов С. Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. – М.: Машиностроение, 1976. – 369 с.
3. Гусейнов А.Г. Повышение работоспособности деталей машин и аппаратуры путем восстановления и упрочнения диффузионной металлизацией // Автореф. ... дис. докт. техн. наук. – М.: АзТУ, МГСУ, 2002. – 40 с.
4. Дубинин Г.Н. Диффузионное хромирование стали // М.: Машиностроение. 1964. – 452 с.
5. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов: учеб. пособие // М.: Металлургия, 1985. — 256 с.
6. Бородин И. Н. Упрочнение деталей композиционными покрытиями. – М.: Машиностроение. 1982. – 141 с.
7. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
8. Нигметзянов Р. И., Сундуков С. К., Фатюхин Д. С. Влияние ультразвуковой обработки на шероховатость поверхности деталей, полученных аддитивными технологиями // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016. – № 1. – С. 47–53.

9. Белашова И. С., Шашков Д. П., Александров В. Д. Дисперсионное упрочнение наночастицами в покрытиях из металлоорганических соединений хрома // Технология металлов. – 2010. – № 2. – С. 22–27.

10. Петрова Л. Г., Демин П. Е., Барабанов С. И., Косачев А. В. Применение диффузионных способов формирования цинковых покрытий для повышения коррозионной стойкости конструкционных сталей // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – № 11. – С. 15–21.

11. Гордина Ю. В., Гордеева Л. Г. Диффузионное насыщение стали из газовой среды при индукционном нагреве токами высокой частоты // Диффузионные покрытия на металлах. – Киев: Наукова думка, 1965. – С. 82–88.

12. Замятин М. М., Балуева Т. А. Исследование высокочастотного нагрева для химико-термической обработки // Металловедение и термическая обработка. – М.: Металлургиздат, 1962. – С. 177–183.

УДК 678.742.2:539.389.3

ПРИНЦИПЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕПЛА, ВЛАГИ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ МЕТОДОМ ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА. ОБЗОР

А. Б. ЛАПТЕВ, д-р техн. наук, А. С. НЕСТЕРОВ, А. М. ВАРДАНЯН,
Е. В. НИКОЛАЕВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 19.01.2021

После доработки 7.03.2021

Принята к публикации 12.03.2021

Работа посвящена принципам воздействия климатических факторов на полиэтилентерефталат (ПЭТФ) с точки зрения изменения структуры и взаимодействия молекул полимера. Разработана кинетическая концепция прочности ПЭТФ, а также факторы, влияющие на прочность. Исследована структура ПЭТФ и влияние на нее влажности, термоокислительной деструкции, УФ-излучения. Рассмотрены вопросы прогнозирования свойств полимеров, долговечности и их компьютерного моделирования. Методами полного факторного эксперимента построена модель изменения свойств ПЭТФ при воздействии температуры, влаги и УФ-излучения. Показано, что в начальный период воздействия происходит адсорбция и диффузия влаги – гидролиз и окисление поверхности, при длительном и постоянном воздействии УФ-излучения происходит сначала разрыв образованных влагой связей, затем разрыв С–С и С–О связей в молекуле ПЭТФ и образование новых межмолекулярных связей. При аморфном состоянии ПЭТФ равновероятен разрыв связей в цепи полимера и образование связей между двумя рядом стоящими цепями полимера, образование более плотно упакованных узлов, образование разрывов между узлами, т. е. деструкция полимера и его старение. Температура оказывает вторичное действие, облегчающее как гидролиз и окисление, так и деструкцию полимера.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, воздействие климатических факторов, температура, УФ-излучение, влажность, старение полимеров, полный факторный эксперимент

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-146-160

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Медведев И. М. Коррозионная активность морской атмосферы. Часть 2. Новые подходы к оценке коррозионной активности прибрежных атмосфер // Коррозия: материалы, защита. – 2016. – № 1. – С. 1–15.

2. Курс М. Г., Николаев Е. В., Абрамов Д. В. Натурные ускоренные испытания металлических и неметаллических материалов: ключевые факторы и специализированные стенды // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 1. – С. 66–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73.

3. Каблов Е. Н. Инновационное развитие ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34) . – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Jambeck J. R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T. R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K. L. Plastic waste inputs from land into the ocean // *Science*. – 2015. – V. 347, Is. 6223. – P. 768–771, <https://science.sciencemag.org/content/347/6223/768>
5. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. 1: Оценка влияния значимых факторов воздействия // *Деформация и разрушение материалов*. – 2019. – № 12. – С. 7–16.
6. Каблов Е. Н., Ерасов В. С., Панин С. В., Курс М. Г., Гладких А. В., Автаев В. В., Сорокина Н. И., Лукьянычев Д. А. Исследование совместного влияния механических нагрузок и климатических факторов на свойства материалов в составе крупногабаритной конструкции экспериментального отсека крыла после 4 лет испытаний // Докл. II междунар. науч.-технич. конф. «Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате». – М.: ФГУП «ВИАМ», 2016. – С.6.
7. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. II. Развитие методов исследования ранних стадий старения // *Деформация и разрушение материалов*. – 2020. – № 1. – С. 15–21.
8. Лаптев А. Б., Николаев Е. В., Куршев Е. В., Горяшник Ю. С. Особенности биодеструкции термопластов на основе полиэфиров в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2019. – №7. Ст.10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91
9. Симионеску К., Опря К.; *Механохимия высокомолекулярных соединений* // Пер. с румынского И. Б. Берсукера и Н. И. Беличука / Под ред. Н. К. Барамбойма. – М.: Мир, 1970. – 357 с.
10. Ангерт Л. Г. Состояние и перспективы исследований в области защиты резин от старения // *Каучук и резина*. – 1974. – № 8. – С. 22–26.
11. Лаптев А. Б., Голубев А. В., Киреев Д. М., Николаев Е. В. К вопросу биодеструкции полимерных материалов в природных средах (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2019. – № 9. Ст.11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.10.2020). DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-9-100-107.
12. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. – 2018. – № 2. С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
13. Журков С. Н., Нарзуллаев Б. Н. Временная зависимость прочности твердых тел // *ЖТФ*. – 1953. – Т. 23, вып.10. – С.1677–1680.
14. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твёрдых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
15. Ярцев В. П. Физико-технические основы работоспособности органических материалов в деталях и конструкциях // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Воронеж, 1998.
16. Ратнер С. Б., Ярцев В. П. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? – М.: Химия, 1992. – 320 с.
17. Журков С. Н., Бронько С. Б., Чмель А. Термофлуктуационная природа лучевой прочности прозрачных диэлектриков // *Физика твердого тела*. – 1980. – Т. 24, вып. 3. – С. 733–739.
18. Тагер А. А. Физико-химия полимеров: Учебн. пособ., Изд. 2-е. – М.: Химия, 1968. – 536 с.
19. Баранов М. В., Шатров А. К. Проблемы прочности: кинетическая концепция прочности, относительность и неопределенность // *Исследования наукограда*. – 2012. – № 2 (2). – С. 3–10.

20. Гуль В. Е. Структура и прочность полимеров: Книга для хим.-техн. спец. вузов. Изд. 3-е. – М.: Химия, 1978. – 328 с.
21. Воробьева Г. Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств: Справочное пособие. Изд. 3-е. – М.: Химия, 1975. – 816 с.
22. Кутьинов В. Ф., Киреев В. А., Старцев О. В., Шевалдин В. Н. Влияние климатического старения на характеристики упругости и прочности полимерных композитных материалов // Ученые записки ЦАГИ. – 2006. – № 4. – С. 54–64.
23. Елизаветин М. А. Повышение надежности машин: Книга для инж.-техн. спец. вузов. Изд. 2-е. – М.: Машиностроение, 1973. – 430 с.
24. Большаков В. А., Алексашин В. М. Повышение остаточной прочности при сжатии после низкоскоростного удара углепластиков, изготавливаемых инфузионным методом формования // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 4. – С. 47–51.
25. Роулэнд С. Вода в полимерах. – М.: Мир, 1984. – 555 с.
26. Чулкова Ю. С. Закономерности равновесной сорбции паров воды и органических растворителей аморфно-кристаллическими полимерами // Автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04. – СПб. гос. ун-т технологии и дизайна, 2010. – 16 с.
27. Сажин Б. С., Дмитриева Л. Б., Сажин В. Б. Сорбционная способность и влияние сорбируемой влаги на структуру полиэтилентерефталата // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. 22, № 4 (84). – С. 116–118.
28. Helseth E. The Influence of Microscale Surface Roughness on Water-Droplet Contact Electrification Langmuir. – 2019. – V. 35, N 25. – P. 8268–827.
29. Mielonen K., Jiang Y., Voyer J., Diem A., Hillman L., Suvanto M., Pakkanen T. A. Sliding friction of hierarchically micro-micro textured polymer surfaces on ice Cold Regions // Science and Technology. – 2019. – V. 163. – P. 8–18.
30. Семенов Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 354 с.
31. Лаптев А. Б., Николаев Е. В., Колпачков Е. Д. Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 3. – С. 80–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88.
32. Основы физики и химии полимеров / Под ред. В. Н. Кулезнева. – М.: Высшая школа, 1977. – 248 с.
33. Нестеров С. В., Бакиров И. Н., Самуилов Я. Д. Термическая и термоокислительная деструкция полиуретанов // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 10–22.
34. Королев В. Л., Пивина Т. С., Поролло А. А., Петухова Т. В., Шереметев А. Б., Ившин В. П. Дифференциация молекулярного строения нитросоединений как основа моделирования процессов их термодеструкции // Успехи химии. – 2009. – V. 78, N 10. – С. 1022–1047.
35. Фойгт И. Стабилизация синтетических полимеров против света и тепла. – Л.: Химия, 1972. – 544 с.
36. Manceau M., Chambon S., Rivaton A., Gardette J.-L., Guillerez S., Lemaître N. Effects of long-term UV-visible light irradiation in the absence of oxygen on P3HT and P3HT // PCBM blend. – 2010. – V. 94, Is. 10. – P. 1572–1577.
37. Исламов Ф. Х. Фото- и фотомеханическая деструкция полимеров с различной локализацией хромофоров в цепи // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Казань: КХТУ, 2009. – 24 с.
38. Xiao L., Zhao Y., Jin B., Zhang Q., Chai Z., Peng R. Synthesis of novel ultraviolet stabilizers based on [60] fullerene and their effects on photo-oxidative degradation of polystyrene // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2019. – V. 28, N 6.

39. Корецкая Л. С., Александрова Т. И., Русов В. П., Ухарцева И. Ю. Метод прогнозирования свойств полимерных материалов в условиях воздействия факторов внешней среды // Потребительская кооперация. – 2011. – № 3 (34) . – С. 69–74.

40. Квачадзе Н. Г., Томашевский Э. Е., Жиженков В. В. Энергетика механического разрушения срединных радикалов // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57, вып. 11. – С. 2186–2189.

41. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука. – 1976. – 279 с.

УДК 621.791.461

СВАРКА ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ТРУБ НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ В РАСТРУБ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА

Г. В. БОТВИН, канд. техн. наук, Н. П. СТАРОСТИН, д-р техн. наук

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20
E-mail: ipog@ipng.ysn.ru*

Поступила в редакцию 26.04.2021

После доработки 13.05.2021

Принята к публикации 20.05.2021

Представлены результаты исследования взаимосвязи надмолекулярной структуры и прочности сварных соединений полипропиленовых труб, выполненных нагретым инструментом в раструб при различных температурах окружающего воздуха, в том числе по предлагаемой технологии при отрицательных температурах.

Ключевые слова: полипропилен, сварка, отрицательные температуры, микроскопические исследования, надмолекулярная структура, испытания на растяжение

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-161-169

ЛИТЕРАТУРА

1. Уиллоби Д. А., Вудсон Р.Д., Суверленд Р. Полимерные трубы и трубопроводы: Справочник / Пер. с англ. / Под ред. В. В. Ковриги. – СПб.: Профессия, 2010. – 485 с. [Plasticpipng. Handbook / D. A. Willoughby, R. D. Woodson, R. Sutherland. – New York, 2002].

2. СП 40-101-96. Проектирование и монтаж трубопроводов из полипропилена «Рандом сополимер»; Введ. 09.04.96. – Официальное издание, Минстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1997. – 14 с.

3. ВСН 47-96. Ведомственные строительные нормы по проектированию и монтажу внутренних систем водоснабжения из полипропиленовых труб «Рандом сополимер» (PPRC); введ. 01.08.96.– М.: Мосоргстрой, 1996. – 14 с.

4. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Утв. 30.06.2012. – Минрегион России, 2012. – С. 4–19.

5. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Моделирование теплового процесса сварки полиэтиленовых труб встык при низких температурах // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 3. – С. 706–713.

6. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Управление тепловым процессом электродуговой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах // Сварка и диагностика. – 2017. – № 5. – С. 21–25.

7. Старостин Н. П., Герасимов А. И., Ботвин Г. В., Данзанова Е. В. Сварка полипропиленовых труб при отрицательных температурах // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 4 (55) . – С. 7–18.

8. Старостин Н. П., Аммосова О. А., Ботвин Г. В. Тепловой процесс сварки полипропиленовых труб в раструб при низких температурах // Сварка и диагностика. – 2015. – № 6. – С. 57–61.

9. Старостин Н. П., Васильева М. А. Оптимальная глубина паза сменной насадки для подогрева полипропиленовых труб в условиях низких температур // Новая наука: состояние и пути развития. – 2016. – № 10–2. – С. 165–167.

10. Кайгородов Г. К., Каргин В. Ю. Влияние скорости охлаждения на полиэтиленового сварного шва на его прочность // Трубопроводы и экология. – 2001. – № 2. – С. 13–14.
11. Иванюков Д. В., Фридман М. Л. Полипропилен. – М: Химия, 1974. – 270 с.
12. Перепёлкин В. П. Полипропилен, его свойства и методы переработки. – Л.: ЛДНТП, 1963. – 256 с.
13. Бартенев Г. М., Зеленев Ю. В., Физика и механика полимеров : Учебное пособие для втузов. – М: Высш. шк., 1983.
14. Каргин В. А., Слонимский Г. Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров. – М.: Химия, 1967. – С. 34–48.
15. Рамбиди Н. Г. Структура полимеров – от молекул до наноансамблей: Учебное пособие. – Долгопрудный: Интеллект, 2009.– С. 224.
16. Пат. 2627170 Российская Федерация МПК G01L 1/00, G01N 3/12. Способ и образец для определения прочности муфтового сварного соединения полимерных труб / А. И. Герасимов, Н. П. Старостин, Г. В. Ботвин, Е. В. Данзанова. – № 2016116073; заявл. 25.04.2016; опубл. 03.08.2017. Бюл. № 22.
17. ГОСТ Р 55142–2012 Испытания сварных соединений листов и труб из термопластов; Введ. 22.11.12. – М.: Стандартинформ, 2016. – 7 с.

УДК 620.193.4:669.15–194.2:669.788

ИССЛЕДОВАНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ И КОРРОЗИИ СТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ НА ОБЪЕКТАХ ДОБЫЧИ H₂S-СОДЕРЖАЩЕГО УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Р. К. ВАГАПОВ, канд. хим. наук

ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ», 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с. п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, вл. 15, стр. 1. E-mail: R_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru

Поступила в редакцию 9.04.2021

После доработки 29.04.2021

Принята к публикации 30.04.2021

Воздействие сероводородного сырья на стальное оборудование и трубопроводы связано не только с процессами коррозии, но и с наводороживанием применяемых углеродистых и низколегированных сталей. Это может приводить к потере ими своих прочностных свойств и последующему разрушению оборудования, эксплуатируемого в условиях повышенных эксплуатационных давлений. Такие проявления, связанные с проникновением водорода в сталь, наиболее опасны с точки зрения надежности работы объектов по добыче углеводородных флюидов. Исследовано воздействие H₂S на конструкционные стали по результатам автоклавных испытаний. Зафиксировано образование блистерингов (вздутий) и трещин на поверхности сталей вследствие воздействия водорода на сталь. Проведено изучение фазового состава продуктов коррозии и их возможного воздействия на процессы коррозии и наводороживания стали.

Ключевые слова: коррозионное разрушение оборудования, скорость коррозии, сероводородная коррозия, наводороживание стали

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-170-181

ЛИТЕРАТУРА

1. Саакян Л. С., Ефремов А. П., Соболева И. А. Защита нефтегазопромыслового оборудования от коррозии. – М.: Недра, 1982. – 227 с.
2. О коррозии трубопроводов / И. И. Велиюлин, Р. А. Кантюков, Н. М. Якупов и др. // Наука и техника в газовой промышленности. – 2015. – № 1 (61) . – С. 45–50.
3. Защита трубопроводов от коррозии / Ф. М. Мустафин, М. В. Кузнецов, Г. Г. Васильев и др. – СПб: ООО «Недра», 2005. – 602 с.

4. Кантюков Р. Р., Запечалов Д. Н., Вагапов Р. К. Оценка опасности внутренней углекислотной коррозии промышленных трубопроводов на газовых и газоконденсатных месторождениях // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 2. – С. 56–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-56-62
5. Вагапов Р. К., Запечалов Д. Н. Коррозионная агрессивность эксплуатационных условий по отношению к стальному оборудованию и трубопроводам на объектах добычи газа, содержащего CO₂ // Металлург. – 2021. – № 1. – С. 46–55.
6. Rozenfeld I. L., Frolova L. V., Brusnikina V. M. Investigation of the corrosion and hydrogen absorption of steel and inhibition of these processes in aqueous media containing hydrogen sulfide // Soviet Scientific Reviews, Section B. Chemistry reviews. Amsterdam: OPA Ltd. – 1987. – V. 8. –P. 115–162.
7. Miyasaka A., Kanamaru T., Ogawa H. Critical stress for stress corrosion cracking of duplex stainless steel in sour environments // Corrosion. – 1996. – V. 52, N 8. – P. 592–599.
8. Вагапов Р. К. Коррозионное разрушение стального оборудования и трубопроводов на объектах газовых месторождений в присутствии агрессивных компонентов // Технология металлов. – 2021. – № 3. – С. 47–54. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-3-47-54
9. ГОСТ 1579–93 Проволока. Метод испытания на перегиб.
10. Эксплуатация скважин Астраханского газоконденсатного месторождения / А. Г. Филиппов, А. К. Токман, А. Г. Потапов и др. – М.: ООО «Газпромэкспо», 2010. – 171 с.
11. Мокшаев А. Н., Сорокин Н. И., Барышев С. Н. Обеспечение надежности и эффективности эксплуатации оборудования опасных производственных объектов Оренбургского НГКМ при сверхпроектном сроке службы // Газовая промышленность. – 2018. – № 3 (765) . – С. 39–41.
12. Шапошников П. А., Беспалова Е. В. Исследование влияния водорода на скорость коррозии стали в сероводородсодержащей среде Астраханского газоконденсатного месторождения // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 8. – С. 28–31.
13. Вагапов Р. К., Кузнецов Ю. И., Фролова Л. В. Возможности использования летучих ингибиторов для защиты от сероводородной коррозии стали в нефтегазовой отрасли // Газовая промышленность. – 2009. – № 4 (630). – С. 68–72.
14. Кузнецов Ю. И., Вагапов Р. К., Гетманский М. Д. Возможности ингибирования коррозии оборудования и трубопроводов в нефтегазовой промышленности // Коррозия: материалы, защита. – 2009. – № 3. – С. 20–25.
15. Реформатская И. И. Влияние структурообразующих факторов на коррозионно-электрохимическое поведение железа и нержавеющей сталей // Рос. хим. ж. – 2008. – Т. LII, № 5. – С. 16–24.
16. Амежнов А. В., Родионова И. Г. Влияние химического и фазового состава неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей в водных средах, характерных для условий эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов // Металлург. – 2019. – № 7. – С. 45–52.
17. Вагапов Р. К., Запечалов Д. Н., Ибатуллин К. А. Оценка коррозионной стойкости материалов в условиях конденсации влаги и наличия диоксида углерода // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 1 (101). – С. 163–175. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-101-1-163-175
18. Вагапов Р. К., Запечалов Д. Н. Практические аспекты использования диагностических методов совместно с другими данными контроля коррозии и имитационными испытаниями при эксплуатации объектов добычи газа в коррозионно-агрессивных условиях // Дефектоскопия. – 2020. – № 7. – С. 61–76. DOI: 10.31857/S0130308220070076
19. Голубцов В. А., Рябчиков И. В., Мизин В. Г. Влияние химически активных элементов на водородное растрескивание стали для труб // Сталь. – 2016. – № 3. – С. 50–53.
20. Родионова И. Г., Бакланова О. Н., Амежнов А. В., Князев А. В., Зайцев А. И., Феоктистова М. В. Влияние неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей для нефтепромысловых трубопроводов // Сталь. – 2017. – № 10. – С. 41–48.
21. Ghosha G., Rostron P., Garg R., Panday A. Hydrogen induced cracking of pipeline and pressure vessel steels: A review // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – V. 199. – P. 609–618. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.06.018>

22. Иванов Е. С., Гузенкова А. С., Иванов С. С. Наводороживание трубной стали при эксплуатации // *Технология металлов*. – 2016. – № 1. – С. 46–48.
23. Иванов Е. С., Бродский М. Л., Рябов Ю. В., Тимонин А. В. Исследование коррозионной стойкости и склонности к коррозионно-механическому разрушению новой трубной стали 08ХМФЧА в сероводородсодержащих средах нефтепромыслов // *Практика противокоррозионной защиты*. – 2009. – №3(53). – С. 8–19
24. Цыганкова Л. Е., Федоров В. А., Фоменков О. А., Плужникова Т. Н., Есина М. Н., Копылова Е. Ю. Ингибирование коррозии стали и диффузии водорода в металл в сероводородно-углекислотных средах // *Практика противокоррозионной защиты*. – 2009. – № 3(53). – С. 66–71.
25. Тетюева Т. В., Рыхлевская М. С., Ефимова Г. А., Алтухова Н. Н. Влияние температуры и ингибирования на процесс сульфидной коррозии и интенсивность наводороживания низколегированных трубных сталей // *Защита от коррозии и охрана окружающей среды*. – 1992. – № 1. – С. 5–12.
26. Silva S. C., Silva A. B., Ponciano Gomes J. A. C. Hydrogen embrittlement of API 5L X65 pipeline steel in CO₂ containing low H₂S concentration environment // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – V. 120. – Article 105081. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105081>
27. Тетюева Т. В., Рыхлевская М. С., Шмелев П. С. Закономерности сульфидной коррозии низколегированных трубных сталей // *Нефтяное хозяйство*. – 1993. – № 6. – С. 32–34.
28. Sun W., Nešić S., Papavinasam S. Kinetics of Corrosion Layer Formation. Part 2: Iron Sulfide and Mixed Iron Sulfide/Carbonate Layers in Carbon Dioxide/Hydrogen Sulfide Corrosion // *Corrosion*. – 2008. – N 7. – P. 586–599. <https://doi.org/10.5006/1.3278494>
29. Effect of interaction between corrosion film and H₂S/CO₂ partial pressure ratio on the hydrogen permeation in X80 pipeline steel / C. Zhou, B. Fang, J. Wang et al // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. – 2020. – V. 55, N 5. – P. 392–399. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2020.1737384>

УДК 620.179.152:[669.715 + 669.721]

ЦИФРОВЫЕ ЭТАЛОННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Е. И. КОСАРИНА, д-р техн. наук, А. В. СМЕРНОВ, П. В. СУВОРОВ, А. А. ДЕМИДОВ

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

Поступила в редакцию 30.03.2021

После доработки 23.04.2021

Принята к публикации 20.05.2021

Эталонные рентгенографические изображения дефектов в отливках и сварных соединениях много лет используют в радиационном рентгеновском контроле. При переходе на цифровые технологии и использовании вместо радиографической пленки плоскопанельных детекторов возникла проблема создания эталонных цифровых изображений. Сравнение цифрового изображения эталонного образца с цифровым изображением объекта контроля можно проводить с использованием такого программного обеспечения, которое полностью или частично позволяет исключить субъективную оценку оператора, дает возможность просмотра сомнительных зон изображения с увеличением и без потери контраста, автоматически показывать размер дефекта, интенсивность распределения его по объему отливки. Все это делает контроль более объективным и производительным. Эталонные изображения, находящиеся в блоке памяти детектора, не претерпевают старения и разрушения, что свойственно рентгеновским снимкам. Отсутствует необходимость их тиражирования.

Ключевые слова: рентгеновский неразрушающий контроль, цифровая радиография, пористость, микрорыхлота

DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-182-194

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. – 2020. – Т. 90, № 4. – С. 331–334
2. Каблов Е. Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. – 2019. – № 7–8. – С. 54–58.
3. Каблов Е. Н., Сагомонова В. А., Сорокин А. Е., Целикин В. В., Гуляев А. И. Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2020. – № 3. – С. 2–9.
4. Чертищев В. Ю., Оспенникова О. Г., Бойчук А. С., Диков И. А., Генералов А. С. Определение размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса // Авиационные материалы и технологии. – 2020. – № 3. – С. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94.
5. Бойчук А. С., Диков И. А., Генералов А. С. Повышение чувствительности и разрешающей способности ультразвукового неразрушающего контроля монолитных образцов из ПКМ с использованием фазированных решеток // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 3. – С. 83–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-83-88
6. ISO 19232:2013. Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 1: Determination of the image quality value using wire-type image quality indicators. Part 2: Determination of the image quality value using step/hole-type image quality indicators.
7. ISO 17636-2: 2013 (E): Non-destructive testing of welds radiographic. Part 2: X- and gamma ray techniques with digital detectors. 49 p.
8. ISO 16371-1: 2011(E): Non-destructive testing. Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates. Part 1: Classification of systems. 25 p.
9. Корнышева И. Н., Волкова Е. Ф., Гончаренко Е. С., Мухина И. Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 212–222.
10. Дуюнова В. А., Молодцов С. В., Леонов А. А., Трапезников А. В. Применение методов компьютерного моделирования при изготовлении сложноконтурной отливки // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – № 11. Ст.01 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 19.10.2020). DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-11-3-11.
11. Косарина Е. И., Турбин Е. М., Уридия З. П., Мухина И. Ю., Крупнина О. А. Методы оценки качества отливок из магниевых сплавов в зарубежных и российских стандартах // Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам. – 2015. – № 12. – С. 8–14.
12. Уридия З. П., Мухина И. Ю., Дуюнова В. А. Контроль качества литья из магниевых сплавов и способы восстановления герметичности отливок // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2014. – № 12. ст.04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.11.2020). DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-12-4-4
13. Косарина Е. И., Уридия З. П., Демидов А. А., Смирнов А. В., Исаева Е. И. Особенности рентгенографического контроля отливок из магниевых сплавов системы магний – РМЗ – цирконий // В мире неразрушающего контроля. – 2019. – № 2, т. 22. – С. 38–40.
14. Коберниченко В. Г. Основы цифровой обработки сигналов. Учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2018. – 150 с.
15. Косарина Е. И., Крупнина О. А., Демидов А. А., Турбин Е. М. Цифровая радиография в неразрушающем контроле авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 562–574. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-562-574
16. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа: Учеб. пособие. Изд. 2-е. – М.: ЛИБРОКОМ, 2012. – 488 с.
17. Косарина Е. И., Степанов А. В. Оценка вероятности обнаружения дефектов изделий посредством моделирования процессов формирования и расшифровки их оптических изображений // Дефектоскопия. – 2017. – № 1. – С. 66–74.
18. Косарина Е. И., Михайлова Н. А., Демидов А. А., Смирнов А. В. Теоретические аспекты при создании электронных эталонных рентгеновских снимков, содержащих количественную ин-

формацию // *Авиационные материалы и технологии*. – 2019. – № 4. – С. 87–94 DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94

19. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*. Изд. 3-е. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.

20. Багаев К. А. *Цифровая радиография, обзор технологий и зарубежных стандартов // Экспозиция. Нефть. Газ.* – 2013. – № 1. – С. 11–13

21. Славин А. В., Генералов А. С., Демидов А. А. *Цифровые технологии в радиационном контроле изделий авиационной техники // В мире неразрушающего контроля*. – 2020. – № 1. – С. 64–69.