

СОДЕРЖАНИЕ

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

- Казаков А. А., Орыщенко А. С., Фомина О. В., Житенев А. И., Вихарева Т. В. Управление природой  $\delta$ -феррита в азотсодержащих хромоникельмарганцевых сталях..... 7
- Грызунов В. И., Емельянова Т. В., Приймак Е. Ю. Расчет кинетики формирования диффузионных слоев при борировании сталей на основе модельных представлений ..... 22
- Костин Н. А., Трусова Е. В. Использование нитроцементованной стали ШХ15 в качестве материала для штамповых инструментов..... 31
- Иванова Л. А., Бенеманская Г. В., Травин В. В. Концентрационное перераспределение легирующих элементов в псевдо- $\alpha$ -сплаве титана при упругопластической деформации образца ..... 38
- Кондратьев С. Ю., Святышева Е. В., Петров С. Н. Особенности строения дисперсных частиц карбида ниобия в структуре жаропрочных сплавов на основе Fe–25Cr–35Ni ..... 51
- Бакрадзе М. М., Овсепян С.В., Буякина А.А., Ломберг Б. С. Разработка композиции жаропрочного никелевого сплава с рабочей температурой до 800°C для дисков газотурбинных двигателей ..... 64
- Петрушин Н. В., Елютин Е. С. Влияние легирования на температуру плавления интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al..... 75
- Сергеева А. М., Ловизин Н. С., Соснин А. А. Структура и механические свойства плоских заготовок из сплава АД1, полученных в условиях непрерывного литья, совмещенного с деформацией в твердожидком состоянии ..... 84
- Сенникова Л. Ф., Давиденко А. А., Ткаченко В. М., Метлов Л. С. Влияние больших пластических деформаций на структуру и свойства меди М06 ..... 92
- Кусманов С. А., Касаткина М. Н., Дьяков И. Г., Силкин С. А., Белкин П. Н. Повышение износостойкости малоуглеродистой стали анодным электролитно-плазменным азотированием..... 99

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Доронин М. В., Грешняков Г. В. Надвижные магнитные экраны специальной конструкции, собранные из листов аморфных магнитомягких сплавов ..... 108
- Ешмететьева Е. Н., Беляков А. Н., Быстров Р. Ю., Васильев А. Ф., Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Особенности формирования покрытий системы Ti–Ru–O методом вакуумного магнетронного напыления на постоянном токе..... 115
- Красиков А. В. Влияние концентрации гипофосфита натрия в пирофосфатном электролите на состав и свойства электроосажденных покрытий Ni–P ..... 123
- Асланян И. Р. Влияние внешних и внутренних факторов на износ никель-фосфорных покрытий..... 130

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Вавилова М. И., Соколов И. И., Ахмадиева К. Р., Ямщикова Г. А. Полимерные композиционные материалы с низкой пористостью, получаемые по технологии пропитки пленочным связующим ..... 140

Мостовой А. С., Леденев А. Н. Модификация эпоксидных полимеров гексагональным нитридом бора ..... 147

Федотов М. Ю., Шиенок А. М., Мухаметов Р. Р., Гуляев И. Н. Исследование границы раздела полимерных матриц с оптическими световодами в информкомпозиатах ..... 155

## **СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

Якушин Б. Ф. К вопросу о повышении эффективности дуговой сварки под флюсом ..... 169

## **КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ**

Кудрявцев А. С., Охапкин К. А., Суворов С. А. Влияние элементов внедрения на питтинговую и межкристаллитную коррозию аустенитной хромоникелевой стали ..... 177

## **КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

Приймак Е. Ю., Фот А. П., Степанчукова А. В. Анализ аварийных повреждений геологоразведочных бурильных труб при эксплуатации ..... 187

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

УДК 669.15'26'24'786–194:678.789

### **УПРАВЛЕНИЕ ПРИРОДОЙ $\delta$ -ФЕРРИТА В АЗОТСОДЕРЖАЩИХ ХРОМОНИКЕЛЬМАРГАНЦЕВЫХ СТАЛЯХ**

А. А. КАЗАКОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. С. ОРЫЩЕНКО<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
О. В. ФОМИНА<sup>2</sup>, канд. техн. наук, А. И. ЖИТЕНЕВ<sup>1</sup>, Т. В. ВИХАРЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

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

Статья поступила 15.02.2016

С помощью термодинамического моделирования изучено поведение  $\delta$ -феррита при кристаллизации, затвердевании и последующем охлаждении твердой азотсодержащей коррозионно-стойкой стали различного состава. Полученные результаты подтверждены экспериментально и могут быть использованы для обоснования выбора состава стали, а также технологии ее получения на всех этапах, включая горячую пластическую обработку и сварку, при проведении которых  $\delta$ -феррит при контролируемом его содержании может оказаться полезным. Эти результаты могут применяться также для выбора температурных режимов аустенитизации с целью наиболее полного растворения  $\delta$ -феррита в готовом металле.

*Ключевые слова:* азотсодержащая коррозионно-стойкая сталь,  $\delta$ -феррит, кристаллизация, аустенитизация, термодинамическое моделирование.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Банных О. А., Блинов В. М., Костина М. В. Исследование эволюции структуры азотистой коррозионно-стойкой аустенитной стали 06X21AG10N7MФБ при термомеханическом воздействии // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1 (45). – С. 9–20.

2. Блинов Е. В., Хадыев М. С. Исследование структуры и механических свойств коррозионно-стойких азотистых сталей 04X22AG15N8M2Ф и 05X19AG10N7M2ФБ после горячей деформации // Металлы. – 2012. – № 2. – С. 93–99.

3. Коджаспиров Г. Е., Сулягин Р. В., Карьялайнен Л. П. Влияние температурно-деформационных условий на упрочнение и разупрочнение азотистых коррозионно-стойких сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 11 (605). – С. 22–26.

4. Блинов В. М., Пойменов И. Л., Куликова О. И., Карелин Ф. Р., Шурыгина И. А., Глебов В. В., Каленихин Ю. Н. Влияние горячей деформации на структуру и механические свойства азотистых

немагнитных сталей // Структура и физико-механические свойства немагнитных сталей. – М.: Наука, 1986. – С. 30–33.

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

6. Сагарадзе В. В., Уваров А. И., Печеркина Н. Л., Калинин Г. Ю., Мушникова С. Ю. Влияние упрочняющей обработки на структуру и механические свойства закаленной азотсодержащей аустенитной стали 04X20H6Г11M2АФ // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 10 (640). – С. 33–38.

7. Калинин Г. Ю., Малышевский В. А., Мушникова С. Ю., Ямпольский В. Д. Влияние режима горячей пластической деформации на механические свойства и структуру высокопрочных коррозионно-стойких аустенитных сталей, легированных азотом // Вопросы материаловедения. – 2002. – № 2 (30). – С. 5–11.

8. Калинин Г. Ю., Малышевский В. А., Мушникова С. Ю., Петров С. Н., Ямпольский В. Д. Влияние степени горячей пластической деформации на микроструктуру и механические свойства аустенитной высокопрочной коррозионно-стойкой стали 05X19H5Г12АМ2БФ // Вопросы материаловедения. – 2003. – № 4 (36). – С. 5–11.

9. Schaffler A. I. Constitution diagram for stainless steel weld metal // Metal Progress. – 1949. – № 56. – P. 680–680B.

10. Delong W. T., Ostorm G. A., Szumachowski E. R. Measurement and calculation of ferrite in stainless steel weld metal // Welding Journal. – 1956. – № 35 (11). – P. 521–528.

11. Hull F. C. Delta Ferrite and Martensite Formation in Stainless Steels // Welding Journal. – 1973. – V. 52 (5), May, Res. Suppl. – P. 193–203.

12. Linnert G. E. Type 347 Stainless Steel Piping and Tubing // Welding Research Council Bulletin Series. – 1958. – N 43. – P. 3–103.

13. Липпольд Д., Котески Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 467 с.

14. Olson D. L. Flux composition dependence of microstructure and toughness of submerged arc HSLA weldments // Welding Journal. – 1985. – N 64. – P. 281.

15. Speidel M. High Nitrogen Steels // Proceedings of the 10th International Conference on HNS 2009. – P. 121.

16. Uggowitzer P. J., Magdowski R., Speidel M. O. Nickel Free High Nitrogen Austenitic Steels // ISIJ International. – 1996. – V. 36, N 7. – P. 901–908.

17. Allan G. Castability solidification mode and residual ferrite distribution in highly alloyed stainless steels // Technical Steel Research: European Commission, 1997. – P. 85.

18. Petrovič D. S., Klančnik G., Pirnat M., Medved J. Differential scanning calorimetry study of solidification sequence of austenitic stainless steel // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, July 2011. – V. 105, Is. 1. – P. 251–257.

19. Brooks J. A., Thompson A. W. Microstructural development and solidification cracking susceptibility of austenitic stainless steel welds // Int. Mater. Rev. – 1991. – V. 36, N 16. – P. 16–44.

20. Siegel U., Spies H. J., Eckstein H. J. Effect of solidification conditions on the solidification sequence of austenitic chromiumnickel stainless steels // Steel Res. – 1986. – V. 57. – P. 25–32.

21. Казаков А. А., Шахматов А. В., Колпишон Э. Ю. Литая структура и наследственность высокохромистой стали с азотом // Тяжелое машиностроение. – 2015. – № 1–2. – С. 19–24.

22. Martorano M. A., Tavares C. F., Padilha A. F. Predicting Delta Ferrite Content in Stainless Steel Castings // ISIJ International. – 2012. – V. 52, N 6. – P. 1054–1065.

23. Fukumoto S., Iwasaki Y., Motomura H., Fukuda Y. Dissolution Behavior of  $\delta$  Ferrite in Continuously Cast Slabs of SUS304 during Heat Treatment // ISIJ International. – 2012. – V. 52, N 1. – P. 74–79.

24. Shen L. J., Ma Y. L., Xing S. Q. The Morphology and Content of  $\delta$  Ferrite in Non-Equilibrium Solidified 0Cr18Ni9 Austenitic Stainless Steel // Advanced Materials Research. – 2012. – V. 535–537. – P. 666–669.

25. Fu J. W., Yang Y. S., Guo J. J., Tong W. H. Effect of cooling rate on solidification microstructures in AISI 304 stainless steel // *Materials Science and Technology*. – 2008. – V. 24, N 8. – DOI 10.1179/174328408X295962
26. Saied M. Experimental and numerical modeling of the dissolution of delta ferrite in the Fe–Cr–Ni system: application to the austenitic stainless steels // *Materials*. – University Grenoble Alpes, 2016. NNT: 2016GREA1016.
27. Ljungstrom L. G. The Influence of Trace Elements on the Hot Ductility of Austenitic 17Cr13NiMo-Steel // *Scand. J. Metall.* – 1977. – V. 6, N 176.
28. Demk H. *Deformation under Hot Working Conditions*. – London: The Iron and Steel Institute, 1968. – P. 135.
29. Pickering, F. B., *Physical Metallurgy and the Design of Steels*. – London, Applied Science Publishers, 1978.
30. Kane R. H. *The Hot Deformation of Austenite*. – New York: Pergamon Press, 1977. – P. 457–498.
31. Brooks J. A., Thompson A. W., Williams J. C. A fundamental study of the beneficial effects of  $\delta$ -ferrite in reducing weld cracking // *Weld. J.* – 1984. – N 63. – P. 71s–83s.
32. Brooks J. A. Weldability of high N, high-Mn austenitic stainless steel // *Weld. J.* – 1975. – N 54. – P. 189–195.
33. Priceputu I. L., Moisa B., Chiran A., Nicolescu G., Bacinschi Z. Delta Ferrite Influence in AISI 321 Stainless Steel Welded Tubes // *The Scientific Bulletin of VALAHIA University: Materials and Mechanics*. – 2011. – N 6 (year 9). – P. 87–96.
34. Kujanpaa V. P., David S. A., White C. L. Hot Ductility and Weldability of Free Machining Austenitic Stainless Steel // *Welding Research Supplement*. – 1986. – August.
35. Lundin C. D., Lee C. H. and Menon R. Hot Ductility and Weldability of Free Machining Austenitic Stainless Steel // *Welding Research Supplement*. – 1988. – June. – P. 119s–130s.

УДК 621.785.5:669.14

#### **РАСЧЕТ КИНЕТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФFUЗИОННЫХ СЛОЕВ ПРИ БОРИРОВАНИИ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ**

В. И. ГРЫЗУНОВ<sup>1</sup>, д-р хим. наук, Т. В. ЕМЕЛЬЯНОВА<sup>2</sup>, Е. Ю. ПРИЙМАК<sup>1</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Орский гуманитарно-технологический институт (филиал ОГУ)», 462403, Орск, Оренбургская обл., пр. Мира, 15а

<sup>2</sup>АО «МК ОРМЕТО-ЮУМЗ», 462403, Орск, Оренбургская обл., ул. Мира, 12,  
E-mail: tatyana.emelyanova.90@mail.ru

Статья поступила 6.10.2016

Исследована кинетика формирования диффузионного слоя при борировании стали. Установлено, что толщина боридного слоя при всех исследованных температурах зависит от диффузионной подвижности атомов бора, углерода и легирующих элементов.

Ключевые слова: диффузия, борирование, температура, сталь, углерод, кинетика, адсорбция, протяженность.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ворошнин Л. Г., Ляхович Л. С. Борирование стали. – М.: Металлургия, 1978. – 201 с.
2. Мустафин Г. А., Мустафина Т. В., Околович Г. А. Реологические свойства и микроструктура закаленной борированной стали 20Л // *Ползуновский альманах*. – 2012. – № 1. – С. 232–234.
3. Гурьев А. М., Грешилов А. Д., Лыгденов Б. Д. Диффузионное борирование – перспективное направление в поверхностном упрочнении изделий из стали и сплавов // *Ползуновский альманах*. – 2010. – № 1. – С. 80 – 88.
4. Иванова Т. Г. Изучение диффузии бора в углеродистых и легированных сталях // Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Барнаул, 2015. – 19 с.
5. Маннинг Дж. Кинетика диффузии атомов в кристаллах. – М.: Мир, 1971. – 277 с.

6. Ле Клер А. Д. Теоретическое описание диффузии в металлах с объемно-центрированной кубической решеткой // Диффузия в металлах с объемно-центрированной решеткой: Сб. статей. – М.: Металлургия, 1969. – С. 11–34.
7. Гурьев А. М., Козлов Э. В., Игнатенко Л. Н., Попова Н. А. Физические основы термоциклического борирования. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. – 2000. – 216 с.
8. Физическая химия / К. С. Краснов, Н. К. Воробьев, И. Н. Годнев и др. – М.: Высшая школа, 1995. – 320 с.
9. Бугаков В. З. Диффузия в металлах. – Л.; М.: ГИТТЛ, 1949. – 212 с.
10. Андриевский Р. А., Уманский Я. С. Фазы внедрения. – М.: Наука, 1977. – 240 с.
11. Гуров К. П., Карташкин Б. А., Угасте Ю. Э. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах. – М.: Наука, 1981. – 352 с.
12. Kidson G. V. Some aspects of the growth of diffusion layers in binary systems // J. of Nuclear Materials. – 1961. – N 3 (1). – P. 21–29.
13. Shuck F. O., Toor H. L. Diffusion in the three component liquid methyl-alcohol-n-propyl alcohol-isobutyl alcohol // J. Phys. Chem. – 1963. – V. 67. – P. 540–545.
14. Грызунов В. И. Метод расчета коэффициентов взаимной диффузии в тройных металлических системах // ФММ. – 1981. – Т. 52, вып. 5. – С. 1117–1120.

УДК 621.785.533:669.14.018.25–155.20

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИТРОЦЕМЕНТОВАННОЙ СТАЛИ ШХ15 В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ШТАМПОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ**

Н. А. КОСТИН, канд. техн. наук, Е. В. ТРУСОВА, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», 305000, Курск, ул. Радищева, 33,  
E-mail: info@kursksu.ru

Статья поступила 27.10.2016

Рассмотрены особенности нитроцементации стали ШХ15 в азотисто-углеродной пасте для использования ее в качестве материала для штамповых инструментов. Приведены результаты испытаний нитроцементованных инструментов из стали ШХ15, и показана микроструктура цементованных слоев. Проанализированы изменения концентрации углерода по глубине диффузионных слоев исследованных образцов.

*Ключевые слова:* сталь ШХ15, нитроцементация, азотисто-углеродная паста, штамповый инструмент, изменение структуры и свойств.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Арзамасов В. Б., Волчков А. Н., Головин В. А. Материаловедение и технология конструктивных материалов. – М.: Академия, 2011. – 448 с.
2. Костин Н. А., Трусова Е. В. Нитроцементация сталей 40X13 и 40X5MФС для повышения стойкости режущего инструмента // Сб. матер. 16-й междунардн. науч.-техн. конф. «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика», Санкт-Петербург, 2014. Ч. 2. – С. 90–93.
3. Костин Н. А., Трусова Е. В. Исследование насыщающей способности азотирующей пасты при низких и высоких температурах нитроцементации штамповой стали // Ученые записки: электронный журнал Курского государственного университета. – 2013. – № 1. – С. 80–86.
4. Трусова Е. В., Костин Н. А. Износостойкость нитроцементованных наплавов штамповых сталей // Машиностроение и инженерное образование. – 2011. – № 3. – С. 2–7.
5. Патент РФ № 2501884 С 2 от 20.12.2013; Заявка № 2011149311/02. Способ нитроцементации деталей из штамповых сталей / Костин Н. А., Колмыков В. И., Трусова Е. В., Колмыков Д. В. // Бюл. № 35.
6. Хрущев М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. – М., 1970. – С. 59–61.

7. Костин Н. А., Трусова Е. В., Колмыков В. И. Износостойкость нитроцементованных наплавов штамповых сталей при различных температурных режимах // Ученые записки: электронный журнал Курского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 36–41.

## КОНЦЕНТРАЦИОННОЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПСЕВДО- $\alpha$ -СПЛАВЕ ТИТАНА ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦА

Л. А. ИВАНОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Г. В. БЕНЕМАНСКАЯ<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук,  
В. В. ТРАВИН<sup>3</sup>, канд. техн. наук

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

<sup>2</sup> ФГБУН «ФТИ им. А. Ф. Иоффе» РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26,  
E-mail: post@mail.ioffe.ru

<sup>3</sup> ОАО «Калужский турбинный завод», 248010, Калуга, Московская ул., 241

Статья поступила 25.11.2016

Исследовано перераспределение атомов легирующих элементов (Al, V, Mo) в структуре псевдо- $\alpha$ -сплава титана при поэтапном растяжении образца вплоть до разрушения. Используются методы растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа локальных участков структуры и поверхности излома разорванного образца. Установлено изменение химического и фазового составов сплава по сравнению с исходным состоянием, стимулированное деформационным воздействием. Сформированное при больших пластических деформациях структурно-фазовое состояние материала является метастабильным, зафиксированным системой деформационных дефектов кристаллической решетки.

*Ключевые слова:* псевдо- $\alpha$ -сплав титана, легирующие элементы, деформация растяжением, структурно-фазовое состояние.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Л. А., Травин В. В., Бенеманская Г. В., Макаренко И. В., Петров В. Н. Эволюция структуры титанового сплава при упругопластическом нагружении образца // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 1. – С. 11–21.
2. Фарбер В. Н. Вклад диффузионных процессов в структурообразование при интенсивной пластической деформации // МиТОМ. – 2002. – № 8. – С. 3–9.
3. Скотникова М. А., Ушков С. С. Разработка научного принципа выбора окончательной термической обработки двухфазных горячедеформированных полуфабрикатов из сплавов титана // Прогрессивные материалы и технологии. – 1999. – № 3. – С. 91–98.
4. Скотникова М. А. Структурно-концентрационная неоднородность твердых растворов // Синергетика, структура и свойства материалов, самоорганизующиеся технологии // Сб. трудов института металлургии им. А. А. Байкова. – М., 1996. – С. 203–204.
5. Сагарадзе В. В. Диффузионные превращения в сталях при холодной деформации // МиТОМ. 2008. – № 9. – С. 19–27.
6. Колосков В. Н., Дерягин А. И., Вильданова А. Д., Гапонцев В. А. Концентрационные и структурные превращения в аустенитных хромоникелевых сплавах на основе железа при ИПД // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 5. – С. 97–105.
7. Уманский Я. С., Скаков Ю. А. Физика металлов. Атомное строение металлов и сплавов. – М.: Атомиздат, 1978. – 352 с.
8. Бокштейн С. З. Диффузия и структура металлов. – М.: Металлургия, 1973. – 205 с.
9. Тейтель Е. И., Метлов Л. С., Гундарев Д. В. О природе индуцируемых интенсивными пластическими деформациями структурных и фазовых превращениях в твердых телах // ФММ. – 2012. – № 12. – С. 1230–1237.
10. Иванов Ю. Ф., Корнет Е. В., Громов В. Е. Структурно-фазовые превращения в закаленной конструкционной стали, деформированной одноосным сжатием // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 1. – С. 8–13.
11. Васильев Л. С., Корзинков А. В. Неравновесные кооперативные явления и процессы при интенсивной пластической деформации металлов и сплавов. Ч. 1. Деформационно-индуцированные структурные превращения // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 3. – С. 2–11.
12. Гапонцев В. А. Колосков В. М. Индуцированная диффузия–ведущий механизм формирования активированных сплавов // МиТОМ. – 2007. – № 11. – С. 3–15.

13. Рыбин В. В. Структурно-кинетические аспекты физики развитой пластической деформации // Известия вузов. Физика. – 1991. – № 3. – С. 7–21.

14. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшкин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. – 520 с.

УДК 669.018:44

### ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ КАРБИДА НИОБИЯ В СТРУКТУРЕ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Fe–25Cr–35Ni

С. Ю. КОНДРАТЬЕВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Е. В. СВЯТЫШЕВА<sup>2</sup>, С. Н. ПЕТРОВ<sup>2</sup>, канд. хим. наук

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

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

Статья поступила 22.11.2016

Изучено строение упрочняющих частиц карбида ниобия в литом жаропрочном сплаве на основе системы Fe–Cr–Ni–C, модифицированном Nb и Ti. Используются методы оптической и электронной сканирующей и просвечивающей микроскопии. Установлено, что частицы карбида ниобия в структуре литого сплава являются многофазными поликристаллическими кластерами, неоднородными по химическому составу и кристаллическому строению. Обсуждаются возможные причины сложного строения частиц карбида ниобия.

*Ключевые слова:* литые жаропрочные жаростойкие сплавы, микроструктура, фазовый состав, карбидные фазы, электронная микроскопия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B. Materials for Reformer Furnace Tubes. History of Evolution // Archives Of Foundry Engineering. – 2011. – V. 11 (Special Issue 2). – P. 47–52.

2. Bonaccorsi L., Guglielmino E., Pino E., Servetto C., Sili A. Damage analysis in Fe–Cr–Ni centrifugally cast alloy tubes for reforming furnaces // Eng. Fail. Anal. – 2014. – N 36. – P. 65–74.

3. Ilman M. N., Kusmono Kusmono. Analysis of material degradation and life assessment of 25Cr–38Ni–Mo–Ti wrought alloy steel (HPM) for cracking tubes in an ethylene plant // Eng. Fail. Anal. – 2014. – N 42. – P. 100–108.

4. Tawancy H. M., Ul-Hamid A., Mohammed A.I., Abbas N.M. Effect of materials selection and design on the performance of an engineering product – An example from petrochemical industry // Materials & Design. – 2007. – V. 28. – Is. 2. – P. 686–703. (DOI 10.1016/j.matdes.2005.07.003).

5. Kaya A. A., Krauklis P., Young D. J. Microstructure of HK40 alloy after high-temperature service in oxidizing/carburizing environment: I. Oxidation phenomena and propagation of a crack // Mater. Char. – 2002. – N 49/1. – P. 11–21.

6. Kaya A. A. Microstructure of HK40 alloy after high-temperature service in oxidizing/carburizing environment: II. Carburization and carbide transformations // Mater. Char. – 2002. – N 49/1. – P. 23–34.

7. De Almeida L. H., Ribeiro A. F., Le May I. Microstructural characterization of modified 25Cr–35Ni centrifugally cast steel furnace tubes // Materials Characterization. – 2003. – V. 49. – N 3. – P. 219–229.

8. Kenik E. A., Maziasz P. J., Swindeman R. W., Cervenka J., May D. Structure and phase stability in cast modified-HP austenite after long-term ageing // Scripta materialia. – 2003. – V. 49. – N 2. – P. 117–122.

9. Рудской А. И., Орыщенко А. С., Кондратьев С. Ю., Анастасиади Г. П., Фукс М. Д., Петров С. Н. Особенности структуры и длительная прочность литого жаропрочного сплава 45X26H33C2B2 // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 4 (694) . – С. 42–47.

10. Рудской А. И., Анастасиади Г. П., Кондратьев С. Ю., Орыщенко А. С., Фукс М. Д. Влияние фактора числа электронных вакансий на кинетику образования, роста и растворения фаз при длительных высокотемпературных выдержках жаропрочного сплава 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb // Физика металлов и металловедение. – 2014. – Т. 115, № 1. – С. 3–13.



11. Sustaita-Torres I. A., Haro-Rodrigues S., Guerrero-Mata M. P., De La Garza M., Valdes E., Deschaux-Beaume F., Colas R. Aging of cast 35Cr–45Ni heat resistant alloy // *Materials Chemistry and Physics*. – 2012. – V. 133. – P. 1018–1023.
12. Monobe L. S., Schön C. G. Microstructural and fractographic investigation of a centrifugally cast 20Cr32Ni+Nb alloy tube in the as cast and aged states // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2013. – V. 2. – N. 2. – P. 195–201.
13. Wang W. Z., Xuan F. Z., Wang Z. D., Liu C. J. Effect of overheating temperature on the microstructure and creep behavior of HP40Nb alloy // *Materials and Design*. – 2011. – V. 32. – P. 4010–4016.
14. Borjali S., Allahkaram S.R., Khosravi H. Effects of working temperature and carbon diffusion on the microstructure of high pressure heat-resistant stainless steel tubes used in pyrolysis furnaces during service condition // *Materials and Design*. – 2012. – V. 34. – P. 65–73.
15. Рудской А. И., Орыщенко А. С., Кондратьев С. Ю., Анастасиади Г. П., Фукс М. Д. Механизм и кинетика фазовых превращений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при длительных высокотемпературных выдержках. Часть 1 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2014. – № 1 (703). – С. 3–8.
16. Рудской А. И., Кондратьев С. Ю., Анастасиади Г. П., Орыщенко А. С., Фукс М. Д. Механизм и кинетика фазовых превращений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при длительных высокотемпературных выдержках. Часть 2 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2014. – № 3 (705). – С. 12–19.
17. Рудской А. И., Кондратьев С. Ю., Анастасиади Г. П., Орыщенко А. С., Фукс М. Д., Петров С. Н. Трансформация структуры жаропрочного сплава 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb при длительной высокотемпературной выдержке // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2013. – № 10 (700). – С. 7–14.
18. Piekarski B. Effect of Nb and Ti additions on microstructure and identification of precipitates in stabilized Ni–Cr cast austenitic steels // *Materials Characterization*. – 2001. – V. 47. – P. 181–186.
19. De Almeida Soares G. D., De Almeida L.H., Da Silveira T. L., Le May I. Niobium additions in HP heat-resistant cast stainless steels // *Materials Characterization*. – 1992. – V. 29, Is. 3. – P. 387–396.
20. Buchanan K. G., Kral M. V. Crystallography and morphology of niobium carbide in as-cast HP-niobium reformer tubes // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2012. – V. 43A, Is. 6. – P. 1760–1769. (DOI 10.1007/s11661-011-1025-0).
21. Buchanan K. G., Kral M. V., Bishop C. M. Crystallography and morphology of MC carbides in niobium-titanium modified as-cast HP alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2014. – V. 45A, Is. 8. – P. 3373–3385. (DOI 10.1007/s11661-014-2285-2).
22. Nunes F. C., De Almeida L. H., Dille J., Delplancke J.-L., Le May I. Microstructural changes caused by yttrium addition to NbTi-modified centrifugally cast HP-type stainless steels // *Materials Characterization*. – 2007. – V. 58. – P. 132–142.
23. Кондратьев С. Ю., Пташник А. В., Анастасиади Г. П., Петров С. Н. Анализ превращений карбидных фаз в сплаве 25Cr35Ni методом количественной электронной микроскопии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2015. – № 7 (721). – С. 36–43.
24. Jingbo Y., Yimin G., Fang Y., Caiying Y., Zhaozhong Y., Dawei Y., Shengqiang M. Effect of tungsten on the microstructure evolution and mechanical properties of yttrium modified HP40Nb alloy // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2011 – N 529. – P. 361–369.
25. Sourmail T. Precipitates in creep resistant austenitic stainless steels // *Mater. Sci. Technol*. – 2001. – N 17/1. – P. 1–14.
26. Рыбин В. В., Рубцов А. С., Нестерова Е. В. Метод одиночных рефлексов (OP) и его применение для электронномикроскопического анализа дисперсных фаз // *Заводская лаборатория*. – 1982. – № 5. – С. 16–21.
27. Родионова И. Г., Зайцев А. И., Шапошников Н. Г., Чиркина И. Н., Покровский А. М., Немтинов А. А., Мишнев П. А., Кузнецов В. В. Влияние химического состава и параметров производства на формирование наноструктурной составляющей и комплекса свойств высокопрочных низколегированных конструкционных сталей // *Металлург*. – 2010. – № 6. – С. 33–39.

28. Mao Z., Chen W., Seidman D.N., Wolverton C. First-principles study of the nucleation and stability of ordered precipitates in ternary Al–Sc–Li alloys // *Acta Materialia*. – 2011. – V. 59, Is. 8. – P. 3012–3023.
29. Monachon C., Krug M. E., Seidman D. N., Dunand D. C. Chemistry and structure of core/double-shell nanoscale precipitates in Al–6.5Li–0.07Sc–0.02Yb (at.%) // *Acta Materialia*. – 2011. – V. 59, Is. 9. – P. 3398–3409.
30. Formenti A., Eliasson A., Mitchell A., Fredriksson H. Solidification sequence and carbide precipitation in Ni-base superalloys IN718, IN625 AND IN939 // *High Temperature Materials and Processes*, 2005, V. 24, Is. 4. – P. 239–258 (DOI 10.1515/HTMP.2005.24.4.239).
31. Nunes F. C., Dille J., Delplancke J.-L., De Almeida L. H. Yttrium addition to heat-resistant cast stainless steel // *Scripta Mater.* – 2006. – V. 54, Is. 9. – P. 1553–1556.
32. Konno T. J., Miura E., Tanaka A., Hanada Sh. A TEM study on the semicoherent precipitates in a Nb–19%Mo alloy // *Acta Materialia*. – 2005. – V. 53, Is. 6. – P. 1783–1789.
33. Billingham J., Bell P. S., Lewis M. H. Vacancy short-range order in substoichiometric transition metal carbides and nitrides with the NaCl structure. I. Electron diffraction studies of short-range ordered compounds // *Acta Crystallographica Section A*. – 1972. – V. A28, N 6. – P. 602–606 (DOI 10.1107/S0567739472001524).
34. Landesman J. P., Christensen A. N., De Novion C. H., Lorenzelli N., Convert P. Order-disorder transition and structure of the ordered vacancy compound Nb<sub>6</sub>C<sub>5</sub>: powder neutron diffraction studies // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. – 1985. – V. 18, N. 4. – P. 809–824.
35. Kesri R., Hamar-Thibault S. Structures ordonnees a longue distance dans les carbures mc dans les fonts // *Acta Metallurgica*. – 1988. – V. 36, Is. 1. – P. 149–166.
36. Gusev A. I., Rempel A. A. Order-disorder phase transition channel in niobium carbide // *Physica Status Solidi (a)*. – 1986. – V. 93, Is. 1. – P. 71–80.
37. *Steel Castings Handbook. Supplement 9. High Alloy Data Sheets. Heat Series*. – Ohio: Steel Founder's Society of America, 2004. – 60 p.
38. Ibanez R. A. P., De Almeida Soares G. D., De Almeida L. H., Le May I. Effects of Si content on the microstructure of modified-HP austenitic steels // *Mater. Charact.* – 1993. – V. 30. – P. 243–249.
39. Caballero F. G., Imizcoz P., Lopez V., Alvarez L.F., Garcia de Andres C. Use of titanium and zirconium in centrifugally cast heat resistant steel // *Materials Science and Technology*. – 2007. – V. 23, Is. 5. – P. 528–534.
40. Brizes W. F., Cadoff L. H., Tobin J. M. Carbon diffusion in the carbides of niobium // *Journal of Nuclear Materials*. – 1966. – V. 20, Is. 1. – P. 57–67.
41. Talis A., Kraposhin V. Finite noncrystallographic groups, 11-vertex triangulated clusters, and polymorphic transformations in metals // *Acta Cryst.* – 2014. – A70. – P. 616–625.
42. Kondratiev S. Yu., Kraposhin V. S., Anastasiadi G. P., Talis A. L. Experimental observation and crystallographic description of M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> carbide transformation in Fe–Cr–Ni–C HP type alloy // *Acta Materialia*. – 2015. – N 100. – P. 275–281.
43. Крапошин В. С., Талис А. Л., Демина Е. Д., Зайцев А. И. Кристаллогеометрический механизм срастания шпинели и сульфида марганца в комплексное неметаллическое включение // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2015. – № 7 (721). – С. 4–12.

УДК 669.245.018.44

**РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИИ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА С РАБОЧЕЙ  
ТЕМПЕРАТУРОЙ ДО 800°С ДЛЯ ДИСКОВ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

М. М. БАКРАДЗЕ, канд. техн. наук, С. В. ОВСЕПЯН, канд. техн. наук, А. А. БУЯКИНА,  
Б. С. ЛОМБЕРГ, д-р техн. наук

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

Статья поступила 5.12.2016

Представлены результаты разработки композиции нового жаропрочного никелевого сплава с температурой эксплуатации до 800°C для дисков газотурбинных двигателей. Проведены исследования структуры, механических свойств и фазовых превращений шести экспериментальных составов. При выборе сплава использовали физико-химическое моделирование, в качестве эквивалента состава применяли параметры, рассчитанные по системе уравнений неполяризованных ионных радиусов. Лучший уровень прочности, пластичности, ударной вязкости и жаропрочности при 750°C показал экспериментальный состав системы Ni–Co–Cr–W–Mo–Ta–Al–Ti–Nb с содержанием алюминия, титана и ниобия, равным в сумме 10 мас. %, и 4 мас. % тантала.

*Ключевые слова:* жаропрочный никелевый сплав, состав, легирование, структура, упрочняющая  $\gamma'$ -фаза, механические свойства, термическая обработка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1. – С. 3–33.
2. Оспенникова О. Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // 80 лет. *Авиационные материалы и технологии: Юбил. науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии») / Под общ. ред. акад. РАН, проф. Е. Н. Каблова*. – М.: ВИАМ, 2012. – С. 19–36.
3. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // *Крылья Родины*. – 2012. – № 3–4. – С. 34–38.
4. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // *Автоматическая сварка*. – 2013. – № 10. – С. 23–32.
5. Пат. 6468368 US. Высокопрочный жаропрочный никелевый сплав, изготавливаемый методами гранульной металлургии Alloy 10. Заявл. 20.03.2000; Опубл. 22.10.2002.
6. Пат. 6730264 US. Сплав на основе никеля Allvac 718 Plus. Заявл. 13.05.2002; Опубл. 04.05.2004.
7. Пат. 6521175 US. Сплав торговой марки Rene104. Заявл. 09.02.1998; Опубл. 18.02.2003.
8. Пат. 6974508 US. Диск турбины из жаропрочного никелевого сплава LSHR. Заявл. 29.10.2002; Опубл. 13.12.2005.
9. Пат. 1195446 EP. Никелевый жаропрочный сплав для газотурбинных дисков, валов и крыльчаток. Заявл. 04.10.2000; Опубл. 10.04.2002.
10. Пат. 8992699 B2 US. Суперсплав на основе никеля и компоненты, сформированные из него. Заявл. 29.05.2009; Опубл. 31.03.2015.
11. Пат. 20110203707 US. Сплав на основе никеля, состав и методы его получения. Заявл. 29.05.2009; Опубл. 25.08.2011.
12. Пат. 8147749 US. Композиция суперсплава и способ его производства. Заявл. 30.03.2005; Опубл. 03.04.2012.
13. Пат. 2010008790 US. Химические композиции суперсплавов, изделия из них и способы их производства. Заявл. 30.03.2005; Опубл. 14.01.2010.
14. Пат. WO 2016053489 A2. Жаропрочные сплавы, улучшенные добавкой циркония. Заявл. 17.08.2015; Опубл. 7.04.2016.
15. Пат. 2280091 РФ. Жаропрочный деформируемый сплав на основе никеля и изделие, выполненное из этого сплава. Заявл. 21.12.2004; Опубл. 20.07.2006.
16. Пат. 2365657 РФ. Жаропрочный деформируемый сплав на основе никеля и изделие, выполненное из этого сплава. Заявл. 21.02.2008; Опубл. 27.08.2009.
17. Пат. 2371495 РФ. Жаропрочный порошковый никелевый сплав. Заявл. 20.06.2008; Опубл. 27.10.2009.
18. Пат. 2368683 РФ. Порошковый жаропрочный никелевый сплав. Заявл. 05.03.2008; Опубл. 27.10.2009.

19. Пат. 2294393 РФ. Жаропрочный порошковый сплав на основе никеля. Заявл. 03.11.2005; Оpubл. 27.10.2009.
20. Пат. 2348726 РФ. Жаропрочный порошковый сплав на основе никеля. Заявл. 27.08.2007; Оpubл. 10.08.2009.
21. Пат. 2257420 РФ. Жаропрочный порошковый сплав на основе никеля. Заявл. 26.07.2004; Оpubл. 27.07.2005.
22. Пат. 2410457 РФ. Жаропрочный порошковый сплав на основе никеля. Заявл. 23.10.2009; Оpubл. 27.01.2011.
23. Пат. 2299919 РФ. Порошковый жаропрочный никелевый сплав. Заявл. 02.03.2006; Оpubл. 27.05.2007.
24. ГОСТ 5632–2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Введ. 01.01.2015 взамен ГОСТ 5632–72 – М.: Стандартиформ, 2015. – 52 с.
25. ГОСТ Р 52802–2007. Сплавы никелевые жаропрочные гранулируемые. Марки. Введ. впервые 25.12.2007. – М.: Стандартиформ, 2015. – 32 с.
26. Ломберг Б. С., Овсеян С. В., Бакрадзе М. М. Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) // Материаловедение: Науч.-техн. журн. – М.: Наука и Технологии, 2010. – № 7. – С. 24–28.
27. Пат. EP 1840232 A1. Сплав на основе никеля для дисков турбины или компрессора, изготовленный методом порошковой металлургии. Заявл. 31.03.2006; Оpubл. 03.10.2007.
28. Пат. 6,132,527 US. Никелевый сплав для компонентов газотурбинного двигателя: Заявл. 08.12.1998; Оpubл. 17.10.2000.
29. Пат. 2894234A1 EP. Композиция жаропрочного никелевого сплава. Заявл. 18.12.2014; Оpubл. 15.07.2015.
30. Пат. 3042973A1 EP. Жаропрочный никелевый сплав. Заявл. 10.12.2015; Оpubл. 13.07.2016.
31. Пат. 8961646B2 US. Никелевый сплав. Заявл. 09.11.2011; Оpubл. 24.02.2015.
32. Пат. 2301845 РФ. Способ получения изделия из жаропрочного никелевого сплава. Заявл. 27.12.2005; Оpubл. 27.06.2007.
33. Пат. 2340702 РФ. Способ получения изделия из жаропрочного никелевого сплава. Заявл. 21.03.2007; Оpubл. 10.12.2008.
34. Пат. 2371512 РФ. Способ получения изделия из жаропрочного никелевого сплава. Заявл. 26.02.2008; Оpubл. 27.10.2009.
35. Пат. 6932877 US. Квазиизотермическая ковка суперсплава на основе никеля. Заявл. 31.10.2002; Оpubл. 23.08.2005.
36. Пат. 6908519 US. Изотермическая штамповка жаропрочных никелевых сплавов на воздухе. Заявл. 19.07.2002; Оpubл. 21.06.2005.
37. Приходько Э. В. Физико-химическое моделирование процессов формирования структуры и свойств жаропрочных сталей и сплавов // Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе. – М.: Наука, 1984. – С. 4–11.
38. Овсеян С. В. Метод оптимизации состава жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. – 2002. – Вып. 3. – С. 3–8.
39. Овсеян С. В., Ломберг Б. С., Бабурина Е. В. Расчет жаропрочности сложнолегированных никелевых сплавов с помощью уравнений системы неполяризованных ионных радиусов // Материаловедение и термическая обработка металлов: – 1995. – № 6.
40. Буякина А. А., Летников М. Н., Бакрадзе М. М., Шугаев С. А. Влияние термомеханической и термической обработки на структуру и свойства сплава ВЖ177 // Труды ВИАМ – 2016. – № 10. – С. 29–36.

## ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПЛАВЛЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $Ni_3Al$

Н. В. ПЕТРУШИН, д-р техн. наук, Е. С. ЕЛЮТИН

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

Статья поступила 16.12.2016

Исследована температура плавления интерметаллидов на основе  $Ni_3Al$  ( $\gamma'$ -фаза), в котором часть алюминия (до 5 ат. %) заменялась третьим элементом из ряда Ti, Ta, W, Mo, Nb и Re, а также комплексом этих элементов; добавка хрома замещала никель. Экспериментальные исследования проводили на поликристаллических образцах после высокотемпературной гомогенизации с последующим охлаждением со скоростью  $\sim 2^\circ C/мин$ . Температуру плавления (солидус) интерметаллидных сплавов определяли методом дифференциального термического анализа. Установлено, что добавки рения (0,4 ат. %) и вольфрама (1,3 ат. %) в  $Ni_3Al$  повышают температуру его плавления до 1386 и  $1380^\circ C$  соответственно (для  $Ni_3Al$   $T_{пл.} = 1372^\circ C$ ). Введение в  $Ni_3Al$  третьих компонентов, ат. %: 1,6 Mo; 2,3 Ta, 4,5 Ti, 4,9 Cr и 4,9 Nb приводит к понижению температуры его плавления соответственно до 1371, 1368, 1360, 1355 и  $1338^\circ C$ . Легирование элементами Ti, Ta, W, Mo, Cr, Nb и Re в комплексе приводит к снижению температуры плавления  $\gamma'$ -фазы.

**Ключевые слова:** жаропрочные интерметаллидные сплавы, интерметаллид  $Ni_3Al$ , легирование  $\gamma'$ -фазы, температура плавления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Бунтушкин В. П., Базылева О. А. Конструкционные жаропрочные материалы на основе соединения  $Ni_3Al$  для деталей горячего тракта ГТД // Технология легких сплавов. – 2007. – № 2. – С. 75–80.
2. Поварова К. Б., Бунтушкин В. П., Казанская Н. К., Дроздов А. А., Базылева О. А. Особо легкие жаропрочные наноструктурированные сплавы на основе  $Ni_3Al$  для авиационного двигателестроения и энергетического машиностроения // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 2 (54). – С. 85–93.
3. Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Туренко Е. Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 57–60.
4. Аргинбаева Э. Г., Базылева О. А., Колодочкина В. Г., Хвацкий К. К. Влияние кристаллографической ориентации на структуру и физико-механические свойства интерметаллидного сплава на основе  $Ni_3Al$  // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 2. – С. 3–7.
5. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Петрушин Н. В. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе  $\gamma'$ -фазы для лопаток ГТД // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1 (34). – С. 34–40. – DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.
6. Бокштейн С. З., Бронфин М. Б., Другова И. А. Давление пара и термодинамические свойства  $\gamma'$ -фаза системы никель – алюминий // Химия металлических сплавов. – М.: Наука, 1973. – С. 188–195.
7. Бронфин М. Б., Другова И. А. О влиянии легирования на процессы сублимации и диффузии в  $\gamma'$ -фазе никелевых сплавов // Конструкционные и жаропрочные материалы для новой техники. – М.: Наука, 1978. – С. 138–146.
8. Бокштейн С. З., Ганчо И. Т., Чабина Е. Б., Школьников Д. Ю. Влияние легирования на параметры самодиффузии никеля в интерметаллиде  $Ni_3Al$  // Металлы. – 1994. – № 1. – С. 130–133.
9. Kovalev A. I., Bronfin M. B., Loshchinin Yu. V., Vertogradsky V. A. Heat capacity of the  $Ni_3Al$  intermetallic and its change upon alloying with of the refractory transition metals // High Temperature – High Pressure. – 1976. – V. 8. – P. 581–584.
10. Morinaga M., Yukawa N., Adachi H. Alloying effect of the electronic structure of  $Ni_3Al$  ( $\gamma'$ ) // J. of the Physical Society of Japan. – 1984. – V. 53, N 2. – P. 653–663.
11. Портной К. И., Богданов В. И., Фукс Д. Л. Расчет взаимодействия и стабильности фаз. Гл. IV. – М.: Металлургия, 1981. – С. 214.

12. Кишкин С. Т., Портной К. И., Логунов А. В., Богданов В. И., Кулешова Е. А., Рубан А. В. Теоретические методы исследования межатомного взаимодействия и их применение для разработки конструкционных материалов // Вопросы авиационной науки и техники. Авиационные материалы. Методы исследования конструкционных материалов. – М.: ВИАМ, 1987. – С. 123.
13. Петрушин Н. В., Чабина Е. Б., Назаркин Р. М. Конструирование жаропрочных интерметаллидных сплавов на основе  $\gamma$ -фазы с высокой температурой плавления. Часть 2 // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 3 (681). – С. 20–23.
14. Оспенникова О. Г., Петрушин Н. В., Тренингов И. А., Тимофеева О. Б. Фазовые и структурные превращения в жаропрочном интерметаллидном сплаве на основе никеля // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 3 (83). – С. 69–79.
15. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1. – С. 3–33. – DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
16. Хансен М., Андерко К. Структура двойных сплавов. – М.: Металлургиздат, 1962. – 1488 с.
17. Experimental analysis of the Ni–Al phase diagram / F. J. Bremer, M. Beyss, E. Karthaus e. a. // J. Crystal Growth. – 1988. – V. 87. – P. 185–192.
18. Phase diagram studies on the Al–Ni system / K. Hilpert, D. Kobertz, V. Venugopal e. a. // Z. Naturforschung. – 1987. – B. 42a. – S. 1327–1332.
19. Verhoeven J. D., Lee J. H., Laabs F. C., Jones L. L. The phase equilibria of  $Ni_3Al$  evaluated by directional solidification and diffusion couple experiment // J. Phase Equilibrium. – 1991. – V. 12, N 1. – P. 15–23.
20. Удовский А. Л., Олдаковский И. В., Молдавский В. Г. О ревизии диаграммы состояния системы никель – алюминий // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 317, № 1. – С. 161–165.
21. Петрушин Н. В., Бронфин М. Б., Чабина Е. Б., Дьячкова Л. А. Фазовые превращения и структура направленно закристаллизованных интерметаллидных сплавов Ni–Al–Re // Металлы. – 1994. – № 4. – С. 85–93.
22. Акшенцев Ю. Н., Степанова Н. Н., Сазонова В. А., Родионов Д. П. Ростовая структура монокристаллов  $Ni_3Al$ , легированных третьим элементом // Физика металлов и металловедение. – 1997. – Т. 84, вып. 3. – С. 130–137.
23. Герасимов В. В., Петрушин Н. В., Висик Е. М. Усовершенствование состава и разработка технологии литья монокристаллических лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2015. – № 3. – Ст.01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-1-1
24. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Елютин Е. С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2011. – № SP2. – С. 38–52.

УДК 669.715:621.74.047

### **СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛОСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА АД1, ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ, СОВМЕЩЕННОГО С ДЕФОРМАЦИЕЙ В ТВЕРДОЖИДКОМ СОСТОЯНИИ**

А. М. СЕРГЕЕВА<sup>1,2</sup>, канд. физ.-мат. наук, Н. С. ЛОВИЗИН<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук,  
А. А. СОСНИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> ФГБУН «Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН»,  
681005, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, д. 1. E-mail: [mail@imim.ru](mailto:mail@imim.ru)

<sup>2</sup> ООО «Институт научно-технических инноваций» (участник проекта Сколково),  
681014, Комсомольск-на-Амуре, ул. Калинина, 24. E-mail: [info@inti.su](mailto:info@inti.su)

Статья поступила 17.11.2016

Известно, что кристаллизация расплавов под воздействием внешних факторов приводит к улучшению механических характеристик готовых металлоизделий. Получение длинномерных заго-

товок с высоким уровнем механических свойств за короткий производственный цикл – важная научно-техническая задача. Представлены результаты исследований свойств изделий из алюминиевого сплава АД1, полученные способом непрерывного горизонтального литья совмещенного с деформацией в твердожидком состоянии. Приведена схема устройства, реализующего такой процесс совмещения, рассмотрена его работа. Дано описание технологии получения плоских заготовок, подготовки образцов для исследования механических характеристик и микроструктуры заготовок. Как показали исследования, полученные металлоизделия имеют мелкозернистую структуру с плотным направленным расположением дислокаций. Границы зерен являются неровными, широкими, состоящими из сплетения дислокационных петель и сеток. Такая внутренняя структура металлоизделий формируется сразу в процессе кристаллизации и обеспечивает повышение механических характеристик заготовок. В исследованных заготовках отсутствуют внутренние дефекты (поры, рыхлоты). Показана возможность получения длинномерных металлоизделий с мелкозернистой структурой, отсутствием внутренних дефектов и улучшенными механическими свойствами за короткий производственный цикл со снижением силового воздействия на расплав более чем на 50%.

*Ключевые слова:* алюминиевые сплавы, микроструктура, непрерывное литье, механические свойства, кристаллизация, совмещение технологических процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science // Acta Mater. – 2013. – V. 61. – P. 782–817.
2. Сергеева А. М., Ловизин Н. С., Соснин А. А., Одинокое В. И. Исследование структуры и механических свойств металлоизделий из сплава АД0, полученных с помощью новой технологии непрерывного литья // Перспективные материалы. – 2016. – № 4. – С. 13–18.
3. ГОСТ 4784–97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – Введ. 2000.07.01. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 10 с.
4. Патент РФ № 2073586. Устройство для непрерывного литья и деформации металла / Одинокое В. И. Опубл. 20.02.1997. Заявка № 93052086/02.
5. ГОСТ Р 8.585–2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования: – Введ. 2001.11.21. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 84 с.
6. Бровман М. Я. Совмещенные процессы непрерывного литья и прокатки. – Саарбрюккен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 626 с.
7. Габидуллин Р. М., Ливанов В. А., Шипилов В. С. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 168 с.
8. Германн Э. Непрерывное литье: Справочник / Пер. с нем. / Под ред. В. И. Добаткина, В. С. Рутеса, Э. Р. Шора. – М.: Металлургиздат, 1961. – 814 с.
9. Земсков И. В., Крутилин А. Н. Вертикальное непрерывное литье заготовок. – Минск: БНТУ, 2015. – 207 с.
10. Калинин Б. А., Алымов М. И., Елманов Г. Н., Калашников А. Н., Нечаев В. В., Полянский А. А., Чернов И. И., Штромбах Я. И., Шульга А. В. Физическое материаловедение. Т. 5: Материалы с заданными свойствами. – М.: МИФИ, 2008. – 672 с.
11. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 1986-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2008. – 24 с.
12. ГОСТ 21073.0–75. Металлы цветные. Определение величины зерна. Общие требования. – Введ. 1976-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 9 с.
13. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 1999. – 414 с.
14. Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение. Справочник. – Под общ. ред. И. Н. Фридляндера. – Киев: КОМИНТЕХ, 2005. – 365 с.
15. Батышев А. И. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1990. – 144 с.
16. Аптекарь И. Л., Каменецкая Д. С. О влиянии давления на зарождение центров новой фазы // ФММ. – 1962. – Т. 14, вып. 2. – С. 316–319.

## ВЛИЯНИЕ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕДИ М06

Л. Ф. СЕННИКОВА, канд. техн. наук, А. А. ДАВИДЕНКО, канд. техн. наук,  
В. М. ТКАЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук, Л. С. МЕТЛОВ, д-р физ.-мат. наук  
Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, 83114, Донецк, Украина,  
ул. Розы Люксембург, 72, E-mail: sennikova\_lf@ukr.net

Статья поступила 19.05.2016, в окончательной редакции – 25 января 2017

Представлены результаты исследования зеренной структуры и деформационной пористости меди М06, сформировавшейся в процессе сдвиговой деформации при использовании метода угловой гидроэкструзии. Показана эволюция зеренной и дефектной структуры (микропоры) в процессе немонотонной деформации. Исследовано влияние угловой гидроэкструзии на механические свойства меди на основании полученных экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* микроструктура, угловая гидроэкструзия, твердость, деформационная пористость, интенсивная пластическая деформация, динамическая рекристаллизация.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Электронно-микроскопическое исследование границ зерен в ультрамелкозернистом никеле, полученном интенсивной пластической деформацией / А. Н. Тюменцев, Ю. П. Пинжин, А. Д. Коротаев и др. // ФММ. – 1998. – Т. 86, вып.6. – С. 110–120.
2. Эволюция дефектной структуры в сплаве Ni<sub>3</sub>Al в ходе пластической деформации кручением под давлением / А. Н. Тюменцев, М. В. Третьяк, Ю. П. Пинжин и др. // ФММ. – 2000. – Т. 90, № 5. – С. 44–54.
3. Тюменцев А. Н., Дитенберг И. А., Пинжин Ю. П., Коротаев А. Д., Валиев Р. З. Особенности микроструктуры и механизмы формирования субмикроструктурной меди, полученной методами интенсивной пластической деформации // ФММ. – 2003. – Т. 96, № 4. – С. 33–43.
4. Субмикроструктурная структура меди после больших пластических деформаций / Н. И. Матросов, Л. Ф. Сенникова, Е. А. Павловская и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2003. – Т. 25, № 10. – С. 1321–1328.
5. Хомская И. В., Шорохов Е. В., Зельдович В. И., Хейфец А. Е., Фролова Н. Ю., Насонов П. А., Ушаков А. А., Жгилев И. Н. Исследование структуры и механических свойств субмикроструктурной и нанокристаллической меди, полученной высокоскоростным прессованием // ФММ. – 2011. – Т. 111, № 6. – С. 639–650.
6. Черемской П. Г., Слезов В. В., Бетехтин В. И. Поры в твердом теле. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 375 с.
7. Баранов Ю. В., Сахвадзе Г. Ж., Столяров В. В. Импульсные технологии обработки наноструктурных материалов с целью залечивания дефектов // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 10 (38).
8. Spuskanyuk V., Spuskanyuk A., Varyukhin V. Development of the equal-channel angular hydroextrusion // J. Mater. Process. Technol. – 2008. – V. 203. – P. 305–309.
9. Spuskanyuk V., Davydenko O., Berezina A., Gangalo O., Sennikova L., Tikhonovsky M., Spiridonov D. Effect of combining the equal-channel angular hydroextrusion, direct hydroextrusion and drawing on properties of copper wire // J. Mater. Process. Technol. – 2010. – V. 210. – P. 1709–1715.
10. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
11. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 566 с.
12. Сенникова Л. Ф., Давиденко А. А., Бурховецкий В. В., Закорецкая Т. А. Деформационная пористость прутков меди М06 после интенсивной пластической деформации // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 1 (85). – С. 22–28.



13. Александров И. В. Развитие и применение методов рентгеноструктурного анализа для исследования структуры и свойств наноструктурных материалов // Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Уфа, 1997. – 350 с.

14. Метлов Л. С., Варюхин В. Н. Моделирование законов упрочнения при ИПД объемных твердых тел методами неравновесной эволюционной термодинамики. // ФТВД. – 2012. – Т. 22, № 2. – С. 7–21.

15. Metlov L. S. Nonequilibrium dynamics of a two-defect system under severe load // Phys. Rev. E. – 2014. – V. 90. – P. 122–124.

16. Метлов Л. С., Давиденко А. А. Анализ кривых упрочнения, полученных в процессе ИПД // Вестник ТГУ. – 2013. – Т. 18, вып. 4. – С. 1964–1965.

УДК 669.14.018.295:621.785.53: 539.538

### **ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ АНОДНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ АЗОТИРОВАНИЕМ**

С. А. КУСМАНОВ, канд. техн. наук, М. Н. КАСАТКИНА, И. Г. ДЬЯКОВ, канд. техн. наук,  
С. А. СИЛКИН, канд. техн. наук, П. Н. БЕЛКИН, д-р техн. наук

ФГБОУ ВО «Костромской государственной университет имени Н. А. Некрасова»,  
156961, Кострома, ул. 1-го Мая, 14, E-mail: sakusmanov@yandex.ru

Статья поступила 8.08.2016

С помощью рентгеноструктурного и электронно-микроскопического анализов показано, что анодное азотирование малоуглеродистой стали способствует образованию оксидного и нитридно-мартенситного слоев с повышением микротвердости до 960 HV. Предложены электролит (10% хлорида аммония и 15% карбамида) и режим обработки (750°C, 5 мин), позволяющие снизить коэффициент сухого трения стали 20 от 0,143 до 0,95 и уменьшить ее массовый износ по сравнению с контрольным образцом в 4,5 раза. Испытания проводились с контртелом из закаленной стали ШХ15 при нормальной нагрузке 55 Н и скорости скольжения 0,24 м/с.

*Ключевые слова:* электролитно-плазменное азотирование, малоуглеродистая сталь, карбамид, износ.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Doney S. J. Plasma electrolysis for surface engineering // Surface and Coatings Technology. – 1999. – V. 122. – P. 73–93.

2. Суминов И. В., Белкин П. Н., Эпельфельд А. В., Людин В. Б., Крит Б. Л., Борисов А. М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Т. 1. – М.: Техносфера, 2011. – 464 с.

3. Andrei V., Vlaicu Gh., Fulger M., Ducu C., Diaconu C., Oncioiu Gh., Andrei E., Bahrim M., Gheboianu A. // Chemical and Structural Modifications Induced in Structural Materials by Electrochemical Processes, Romanian Reports in Physics. – 2009. – V. 61, N 1. – P. 95–104.

4. Roy A., Tewari R. K., Sharma R. C., Sherhar R. Feasibility study of aqueous electrolyte plasma nitriding // Surface Engineering. – 2007. – V. 23, N 4. – P. 243–246.

5. Kusmanov S. A., Smirnov A. A., Kusmanova Yu. V., Belkin P. N. Anode plasma electrolytic nitrohardening of medium carbon steel // Surface and Coatings Technology. – 2015. – V. 269. – P. 308–313.

6. Патент 3840450 США, НКИ 204-181; МКИ С 23 в 13/00. Способ диффузионного поверхностного насыщения проводящих тел / Иноуэ К.; заявл. 21.10.63, опубл. 08.10.74.

7. Патент 969 Япония, МКИ С23с. Электролитическое азотирование или цементация металлов / Иноуэ К.; заявл. 7.0966, опубл. 13.01.70.

8. Kuzenkov S. E., Saushkin B. P. Borating of steel 45 in electrolyte plasma // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 1996. – N 6. – P. 10–15.

9. Kusmanov S. A., Kusmanova Yu. V., Naumov A. R., Belkin P. N. Formation of diffusion layers by anode plasma electrolytic nitrocarburising of low carbon steel // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2015. – V. 24, N 8. – P. 3187–3193.

10. Jiang Y. F., Geng T., Bao Y. F., Zhu Y. Electrolyte–electrode interface and surface characterization of plasma electrolytic nitrocarburizing // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – V. 216. – P. 232–236.
11. Aliofkhazraei M., Taheri P., Sabour Rouhaghdam A., Dehghanian Ch. Systematic Study of Nanocrystalline Plasma Electrolytic Nitrocarburising of 316L Austenitic Stainless Steel for Corrosion Protection // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2007. – V. 23, N 5. – P. 665–671.
12. Aliev M. Kh., Sabour A., Taheri P. Corrosion Protection Study of Nanocrystalline Plasma-Electrolytic Carbonitriding Process for CP-Ti // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2008. – V. 44, N 6. – P. 618–623.
13. Kusmanov S. A., Kusmanova Yu. V., Naumov A. R., Belkin P. N. Features of Anode Plasma Electrolytic Nitrocarburising of Low Carbon Steel // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – V. 272. – P. 149–157.
14. Мухачева Т. Л., Дьяков И. Г., Белкин П. Н. Особенности двухкомпонентного насыщения конструкционных сталей азотом и углеродом при анодном электролитном нагреве // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 2. – С. 38–45.
15. Kong J. H., Takeda T., Okumiya M., Tsunekawa Y., Yoshida M., Kim S. G. The Study about Surface Modification of Steel by Water Plasma // 13th International Conference on Plasma Surface Engineering. Garmisch-Partenkirchen, 2012. – P. 157–160.
16. Skakov M., Yerygina L., Scheffler M. Impact of Electrolytic-Plasma Nitriding on 34CrNi1Mo Steel Surface Layer Properties // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – V. 698. – P. 439–443.
17. Nie X., Wang L., Yao Z. C., Zhang L., Cheng F. Sliding Wear Behaviour of Electrolytic Plasma Nitrided Cast Iron and Steel // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – V. 200, N 5–6. – P. 1745–1750.
18. Kumruoglu L. C., Ozel A. Plasma electrolytic saturation of 316 L stainless steel in an aqueous electrolyte containing urea and ammonium nitrate // *Materials and Technology*. – 2013. – V. 47. – P. 307–310.
19. Skakov M., Rakhadilov B., Scheffler M., Karipbayeva G., Rakhadilov M. Electrolyte plasma nitriding of high-speed steel // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – V. 379. – P. 161–166.
20. Skakov M., Rakhadilov B., Batyrbekov E., Scheffner M. Change of Structure and Mechanical Properties of R6M5 Steel Surface Layer at Electrolytic-Plasma Nitriding // *Advanced Materials Research*. – 2014. – V. 1040. – P. 753–758.
21. Belkin P., Naumov A., Shadrin S., Dyakov I., Zhiron A., Kusmanov S., Mukhacheva T. Anodic Plasma Electrolytic Saturation of Steels by Carbon and Nitrogen // *Advanced Materials Research*. – 2013. – V. 704. – P. 37–42.
22. Дураджи В. Н., Полотебнова Н. А., Товарков А. К. О регулировании распределения температуры образца при нагреве в электролитной плазме // *Электронная обработка материалов*. – 1981. – № 4. – С. 40–42.
23. Kusmanov S. A., Smirnov A. A., Silkin S. A., Belkin P. N. Modification of low-alloy Steel surface by Plasma Electrolytic nitriding // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2016. – V. 25, N 7. – P. 2576–2582.
24. Кусманов С. А., Дьяков И. Г., Белкин П. Н. Влияние углеродсодержащих компонентов электролита на характеристики электрохимико-термической цементации // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 4 (60). – С. 7–14.
25. Mittemeijer E. J. Fundamentals of Nitriding and Nitrocarburising // *ASM Handbook, V. 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*. URL: [http://www.is.mpg.de/14343245/Mittemeijer\\_ASM\\_Handbook\\_4A\\_2013.pdf](http://www.is.mpg.de/14343245/Mittemeijer_ASM_Handbook_4A_2013.pdf).

УДК 621.318.132

### **НАДВИЖНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ, СОБРАННЫЕ ИЗ ЛИСТОВ АМОРФНЫХ МАГНИТОМЯГКИХ СПЛАВОВ**

М. В. ДОРОНИН<sup>1</sup>, Г. В. ГРЕШНЯКОВ<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> ООО НИИ «Севкабель», 199106, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 40.  
E-mail: mviduka@yandex.ru

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

Статья поступила 8.09.2016

Представлены результаты исследований в области создания принципиально нового кабельного аксессуара, не являющегося элементом конструкции кабеля, – подвижного магнитного экрана специальной конструкции. Для его изготовления использовали магнитный экран МАР-1К, состоящий из лент аморфного магнитомягкого сплава АМАГ-172. С целью выбора конструкции подвижного магнитного экрана была выполнена оптимизация конструктивных параметров с применением математических эволюционных методик. Проводился поиск оптимальных параметров: угол раскрытия зазора и поворот концентратора на оси кабеля.

Приведены: обзор существующих материалов для экранирования, обоснование выбранного материала, а также результаты оптимизации, расчетов и эксперимента. Полученные результаты могут быть использованы в таких областях науки и техники, как материаловедение, электротехника, электроэнергетика, медицинские технологии и др.

*Ключевые слова:* аморфные магнитомягкие сплавы, экранирование магнитного поля, коэффициент экранирования, затухание экрана, генетический алгоритм, экран МАР-1К, ферромагнитные материалы, кабельные линии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Barnes F., Greenenbaum B. Some effects of weak magnetic fields on biological systems: RF fields can change radical concentrations and cancer cell growth rates // [IEEE Power Electronics Magazine](#). – 2016. – V. 3, Is. 1. – P. 60–68.

2. Canova A., Freschi F., Repetto M. Identification of power frequency industrial magnetic field sources for shielding purposes // Industry Applications Conference 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, 2004.

3. Кузнецов П. А. Создание эффективных систем электромагнитной защиты на основе магнитомягких аморфных и нанокристаллических сплавов Co и Fe // Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.01. – ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». – Санкт-Петербург, 2005. – 165 с.

4. Грешняков Г. В., Доронин М. В., Коровкин Н. В. Комбинированные магнитные экраны для силовых кабельных линий // Кабели и провода. – 2015. – № 5. – С. 8–13

5. Реутов Ю. Я. Классические магнитные экраны. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 72 с.

6. Cheng A., Yang S., Cao J. Dynamic genetic algorithms for the dynamic load balanced clustering problem in mobile ad hoc networks // Expert Systems with Applications. – 2013. – V. 40, N 4. – P. 1381–1392.

7. Scully T., Brown K. N. Wireless LAN load balancing with genetic algorithms // Knowledge-Based Systems. – 2009. – V. 22, N. 7. – P. 529–534.

8. Коровкин Н. В., Потенко А. А. Использование генетического алгоритма для решения электротехнических задач // Электричество. – 2002. – № 11.

УДК 621.793.72

#### ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ti–Ru–O МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Е. Н. ЕШМЕТЕТЬЕВА, А. Н. БЕЛЯКОВ, Р. Ю. БЫСТРОВ, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ,  
П. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

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

Статья поступила 25.10.2016

Приведены результаты исследования покрытий системы Ti–Ru–O, полученных методом вакуумного магнетронного напыления на постоянном токе при одновременном осаждении титана и рутения при различных парциальных давлениях кислорода.

*Ключевые слова:* титановые аноды, активное покрытие Ti–Ru–O, вакуумное магнетронное напыление, парциальное давление кислорода, изменение структурного состояния.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Якименко Л. М. Электродные материалы в прикладной электрохимии. – М.: Химия, 1977. – 264 с.
2. Trasatti S. Electrocatalysis: understanding the success of DSA // *Electrochimica Acta*. – 2000. – V. 45. – P. 2377–2385.
3. Разина Н. Ф. Окисные электроды в водных растворах. – Алма-Ата: Наука, 1982. – 160 с.
4. Málek J., Watanabe A., Mitsuhashi T. Sol-Gel Preparation of Rutile Type Solid Solution in  $\text{TiO}_2$ – $\text{RuO}_2$  System // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2000. – V. 60. – P. 699–705.
5. Chen R., Triu V., Natter H., Stöwe K., Maier W. F., Hempelmann R., Bulan A., Kintrup J., Weber R. In situ Supported Nanoscale  $\text{Ru}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2$  on Anatase  $\text{TiO}_2$  with Improved Electroactivity // *Chemistry of Materials*. – 2010. – V. 22. – P. 6215–6217.
6. Colomer M. T., Jurado J. R. Synthesis and thermal evolution  $\text{TiO}_2$ – $\text{RuO}_2$  xerogels // *Journal of Sol-Gel science and Technology*. – 2006. – V. 39. – P. 211–222.
7. Zhitomirsky I. Cathodic electrosynthesis of titanium and ruthenium oxides // *Materials Letters*. – 1998. – V. 33. – P. 305–310.
8. Ешметьева Е. Н., Быстров Р. Ю., Беяков А. Н., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Красиков А. В. Магнетронное напыление функционально-градиентных покрытий системы Ti–Ru–O для систем очистки воды // *Вопросы материаловедения*. – 2014. – № 3(79). – С. 90–96.
9. Пат. RU 2428516. Способ получения наноструктурированного градиентного оксидного покрытия из каталитического материала методом магнетронного напыления. Оpubл. 10.09.2011.
10. Пат. RU 2486995. Способ получения композиционного катода. Оpubл. 10.07.2013 г.
11. Минайчев В. Е. Нанесение пленок в вакууме. – М.: Высшая школа, 1989. – 110 с.
12. Берлин Е. В., Сейдман Л. А. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением. – М.: Техносфера, 2014. – 256 с.

УДК 669.24'779:621.359:621.793

### ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГИПОФОСФИТА НАТРИЯ В ПИРОФОСФАТНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ НА СОСТАВ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ ПОКРЫТИЙ Ni–P

А. В. КРАСИКОВ, канд. хим. наук

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, E-mail: npr3@crism.ru

Статья поступила 2.12.2016

Исследован процесс электроосаждения сплавов никель – фосфор из пирофосфатного электролита с различными концентрациями гипофосфита натрия. Установлена взаимосвязь концентрации гипофосфита натрия в электролите и режима осаждения покрытия Ni–P с изменением его структуры и свойств. Определены условия, при которых состав покрытия не зависит от плотности тока.

*Ключевые слова:* покрытия системы Ni–P, изделия сложной геометрической формы, электроосаждение, концентрация гипофосфита, пирофосфатный электролит.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гальванотехника: Справочник / Под ред. А. М. Гинберга, А. Л. Иванова, Л. Л. Кравченко. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.
2. Андрищенко Ф. К., Орехова В. В., Павловская К. К. Пирофосфатные электролиты. – Киев: Техніка, 1965. – 86 с.
3. Орехова В. В., Байрачный Б. И. Теоретические основы гальваностегических процессов. – Киев: Выща школа, 1998. – 208 с.
4. Красиков А. В., Красиков В. Л., Нараев В. Н. Механизм катодного восстановления пирофосфатного комплекса никеля // *Известия СПбГТИ(ТУ)*. – 2012. – № 15 (41). – С. 37–40.
5. Пулин Б. А. Электроосаждение металлов из пирофосфатных электролитов. – Рига: Зинатне, 1975. – 196 с.

6. Александрова Г. С., Варыпаев В. Н. Особенности электроосаждения сплава никель – молибден на сетчатый катод // Ж. прикл. химии. – 1981. – Т. 54, № 8. – С. 1849–1851.
7. Стасов А. А. Электроосаждение никель-молибденовых сплавов из пирофосфатного электролита и исследование их физико-механических свойств // Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Воронеж, 1971. – 16 с.
8. Стасов А. А., Пасечник С. Я. Электроосаждение никель-молибденовых покрытий из пирофосфатного электролита // Изв. вузов. Химия и хим. технол. – 1973. – Т. 16, № 4. – С. 600–603.
9. Cesiulis H., Budreika A. Electroreduction of Ni(II) and Co(II) from Pyrophosphate Solutions // Materials Science. – 2010. – V. 16. N 1. – P. 52–56.
10. Красиков А. В. Электроосаждение сплава никель–вольфрам из пирофосфатного электролита // Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – СПб., 2012.
11. Спицина А. А., Цупак Т. Е. Электроосаждение сплава никель – фосфор из сульфатно-глутаратно-хлоридного электролита // Успехи в химии и химической технологии. – 2012. – Т. 26, № 7(136). – С. 126–129.
12. Долгих О. В., Соцкая Н. В., Кравцова Ю. Г., Слепцова О. В. Каталитическая активность никелевых сплавов в реакции выделения водорода // Вестник ВГУ, сер. Химия, биология, фармация. – 2007. – № 1. – С. 33–38.
13. Xuetao Yuan, Dongbai Sun, Zhiqiang Hua, Lei Wang. Initial electrodeposition behavior of amorphous Ni–P alloys // Advanced Materials Research. – 2011. – V. 154–155. – P. 535–539.
14. Mahalingam T., Raja M., Thanikaikarasan S., Sanjeeviraja C., Velumani S., Hosun Moon, Yong Deak Kim. Electrochemical deposition and characterization of Ni–P alloy thin films // Materials Characterization. – 2007. – N 58. – P. 800–804.
15. Красиков В. Л. Роль промежуточных частиц электрохимического восстановления кобальта в образовании кислородсодержащих примесей // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2015. – № 31(57). – С. 40–46.
16. Fang Zhaoheng. Electrodeposition of amorphous Ni–P alloy coatings // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 1997. – V. 7, N. 3. – P. 148–151.
17. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 3, Кн. 1 / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – 872 с.

УДК 669.24'779:620.194.3:621.891

## **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ НА ИЗНОС НИКЕЛЬ-ФОСФОРНЫХ ПОКРЫТИЙ**

И. Р. АСЛАНЯН, д-р техн. наук

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

Статья поступила 2.12.2016

Рассматривается влияние внешних (условия нагружения и среда) и внутренних (структура покрытий и количество упрочняющих добавок) факторов на трение и износ никель-фосфорных покрытий в условиях непрерывного скольжения, фреттинг-изнашивания и фреттинг-коррозии. Установлено, что в сопоставимых условиях изнашивание покрытий при фреттинге в 1,3–3,5 раза больше, чем при непрерывном скольжении. При этом фреттинг-коррозия происходит в 1,3–1,6 раза более интенсивно, чем фреттинг-изнашивание. Наименьшему изнашиванию подвержено покрытие NiP после термической обработки и без упрочняющих добавок

*Ключевые слова:* покрытие NiP, трение скольжения, фреттинг-изнашивание, фреттинг-коррозия.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1. – С. 3–33.
2. Kablov E. N., Muboyadzhyan S. A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTES // Russian metallurgy (Metally). – 2012. – V. 2012, N 1. – P. 1–7.

3. Каблов Е. Н. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. – 2012. – № 11. – С. 16–21.
4. Каблов Е. Н., Мубояджян С. А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 60–70.
5. Александров Д. А., Мубояджян С. А., Гаямов А. М., Горлов Д. С. Исследование жаростойкости и кинетики изменения элементного состава композиции из титанового сплава ВТ41 с жаростойкими покрытиями // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № 5. – С. 61.
6. Каблов Е. Н., Мубояджян С. А., Будиновский С. А., Луценко А. Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Металлы. – 2007. – № 5. – С. 23–34.
7. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. – 2013. – № 10. – С. 23–32.
8. Каблов Е. Н., Мубояджян С. А., Луценко А. Н. Наноструктурные ионно-плазменные защитные и упрочняющие покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 2 (54). – С. 175–187.
9. Шустер Л. Ш., Криони Н. К., Асланян И. Р., Емаев И. И. Оценка изнашивания покрытий в различных условиях трения // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 2 (122). – С. 10–13.
10. Асланян И. Р., Шустер Л. Ш. Изнашивание электролитических NiP покрытий при трении скольжения // Труды ВИАМ. – 2015. – № 3. – ст.8 (viam-works.ru).
11. Асланян И. Р., Селис Ж. П., Шустер Л. Ш. Влияние добавок карбидов кремния SiC на изнашивание электролитических NiP покрытий // Трение и износ. – 2010. – № 5 (31). – С. 353–361.
12. Асланян И. Р., Шустер Л. Ш. Изнашивание электролитических NiP покрытий при фреттинге // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 3 (36). – С. 38–43.
13. Асланян И. Р., Шустер Л. Ш. Изнашивание электролитических NiP покрытий при фреттинг-коррозии // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 2 (35). – С. 26–31.

УДК 678.067.5

#### **ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С НИЗКОЙ ПОРИСТОСТЬЮ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРОПИТКИ ПЛЕНОЧНЫМ СВЯЗУЮЩИМ**

М. И. ВАВИЛОВА, канд. техн. наук, И. И. СОКОЛОВ, К. Р. АХМАДИЕВА, Г. А. ЯМЩИКОВА

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

Статья поступила 09.11.2016

Рассмотрена технология изготовления полимерных композиционных материалов с использованием пленочного связующего – RFI (Resinfilmifusion). Приведены основные требования к реологическим свойствам пленочного связующего. Исследованы физико-механические свойства стеклопластиков, изготовленных по технологии RFI (плотность, пористость, прочность при сжатии), и проведено их сопоставление со свойствами материалов, полученных с использованием широко применяемых в промышленности методов автоклавного формования и прямого прессования. Показано, что применение технологии RFI позволяет получать материалы с высоким уровнем физико-механических свойств и соблюдением принципов энергоэффективности и экологической безопасности.

*Ключевые слова:* полимерные композиционные материалы, технология пропитки пленочным связующим (RFI), термореактивные эпоксидные связующие, эпоксидбисмалеимидные связующие, реология связующего, стеклянные наполнители.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до

2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

2. Раскутин А. Е., Соколов И. И. Углепластики и стеклопластики нового поколения // *Труды ВИАМ*. – 2013. – № 4. – Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.10.2016).

3. Каблов Е. Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. – 2010. – Т. LIV, № 1. – С. 3–4.

4. Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 520–530.

5. Панина Н. Н., Ким М. А., Гуревич Я. М., Григорьев М. М., Чурсова Л. В., Бабин А. Н. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов // *Клеи. Герметики. Технологии*. – 2013. – № 10. – С. 18–27.

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

7. Чурсова Л. В., Душин М. И., Коган Д. И., Панина Н. Н., Ким М. А., Гуревич Я. М., Платонов А. А. Пленочные связующие для RFI-технологии // *Российский химический журнал*. – 2010. – Т. 54, № 1. – С. 63–66.

8. Sen Joyanto K., Lindsay William E., Schuck Jon C. Innovative manufacturing processes for a lightweight, affordable composite helicopter airframe // *Proceedings 28-th Europ. Rotorcraft Forum, Bristol, 2002*.

9. Lang Didier. Aerospace structures: current trends // *Proceedings «Composites RTM infusion - 2009»*.

10. Коган Д. И., Чурсова Л. В., Петрова А. П. Технология изготовления ПКМ способом пропитки пленочным связующим // *Клеи. Герметики. Технологии*. – 2011. – № 6. – С. 25–29.

11. Мелехина М. И., Глухова С. С., Ямщикова Г. А. Стеклопластики, изготавливаемые по технологии RFI для крупногабаритных конструкций // *Композитный мир*. – 2014. – № 3. – С. 20–23.

12. Истягин С. Е., Вешкин Е. А., Постнов В. И., Коган Д. И. Роль технологических факторов в формировании стабильности свойств пленочного связующего // *Труды ВИАМ*. – 2016. – № 5. – Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 11.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-7-7.

13. Хрульков А. В., Душин М. И., Попов Ю. О., Коган Д. И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 292–301.

14. Хрульков А. В., Григорьев М. М., Язвенко Л. Н. Перспективы внедрения безавтоклавных технологий для изготовления конструкционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2016. №2. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 28.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-6-6.

15. Мухаметов Р. Р., Ахмадиева К. Р., Ким М. А., Бабин А. Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 260–265.

16. Мухаметов Р. Р., Долгова Е. В., Меркулова Ю. И., Душин М. И. Разработка бисмалеимидного термостойкого связующего для композиционных материалов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № 4. – С. 53–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-7-53-57.

17. Курносов А. О., Мельников Д. А., Соколов И. И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // *Труды ВИАМ*. – 2015. – № 8. – Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.

УДК 678.686

## **МОДИФИКАЦИЯ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ ГЕКСАГОНАЛЬНЫМ НИТРИДОМ БОРА**

А. С. МОСТОВОЙ, канд. техн. наук, А. Н. ЛЕДЕНЕВ

Энгельсский технологический институт (филиал ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина»), 413100 Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17, E-mail: [eti@techn.sstu.ru](mailto:eti@techn.sstu.ru)

В результате проведенных исследований показана возможность направленного регулирования эксплуатационных свойств эпоксидных композитов за счет использования малых добавок наноразмерного гексагонального нитрида бора, обеспечивающего создание эпоксидных композитов с эксплуатационными свойствами, удовлетворяющими требованиям большинства отраслей промышленности. Выбрано рациональное содержание нитрида бора как наноструктурирующей добавки в составе эпоксидной композиции (0,05 мас. ч), что обеспечило повышение уровня физико-механических свойств при сохранении термостойкости. При введении нитрида бора изменяются параметры кинетики отверждения эпоксидного олигомера – с 45 до 36 мин сокращается продолжительность гелеобразования и с 53 до 48 мин – продолжительность отверждения, при этом максимальная температура отверждения практически не изменяется. При введении в состав эпоксидной композиции даже малых добавок нитрида бора на 50–80% повышается коэффициент теплопроводности, при этом отмечается снижение термического сопротивления. Таким образом, разработанные материалы могут быть использованы для герметизации изделий электронной техники, для пропитки и заливки узлов конструкции в авиа-, судо- и автомобилестроении.

*Ключевые слова:* эпоксидная смола, модификация, наполнитель, гексагональный нитрид бора, механические свойства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Radoman T. S., Dzunuzovic J. V., Jeremic K. B., Grgur B. N., Milicevic D. S., Popovic I. G., Dzunuzovic E. S. Improvement of epoxy resin properties by incorporation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles surface modified with gallic acid esters // *Materials and Design*. – 2014. – N 62. – P. 158–167.
2. Осипов П. В., Осипчик В. С., Смотровая С. А., Савельев Д. Н. Регулирование свойств наполненных эпоксидных олигомеров // *Пластические массы*. – 2011. – № 4 – С. 3–5.
3. Садыгов Ш. Ф., Ищенко Н. Я., Агаева С. А. Модификация ЭД-20 глицидными эфирами некоторых бензойных кислот // *Пластические массы*. – 2008. – № 3. – С. – 24–26.
4. Стухляк П. Д., Карташов В. В., Соривка И. Т., Скороход А. З. Влияние ферромагнитных наполнителей на ударную вязкость и седиментационную стойкость эпоксикомпозитов, сформированных под воздействием переменного магнитного поля // *Перспективные материалы*. – 2013. – № 6. – С. 63–68.
5. Старокадомский Д. Л., Ткаченко А. А., Гаращенко И. И. Изменение свойств композита полиэпоксид – нанокремнезем после модифицирования поверхности наполнителя исходной эпоксидной смолой // *Пластические массы*. – 2015. – № 5–6. – С. 50–55.
6. Плакунова Е. В., Панова Л. Г. Исследование возможности использования технологических отходов химических производств в качестве наполнителей полимерных матриц // *Химическая промышленность*. – 2013. – Т. 90, № 6. – С. 295–301.
7. Мостовой А. С., Яковлев Е. А., Бурмистров И. Н., Панова Л. Г. Использование модифицированных наноразмерных частиц полититаната калия и физических методов модификации эпоксидных составов с целью повышения их эксплуатационных свойств // *Журнал прикладной химии*. – 2015. – Т. 88, № 1. – С. 138–149.
8. Мостовой А. С., Плакунова Е. В., Панова Л. Г. Разработка огнестойких эпоксидных композиций и исследование их структуры и свойств // *Перспективные материалы*. – 2014. – № 1. – С. 37–43.
9. Мостовой А. С., Панова Л. Г., Курбатова Е. А. Модификация эпоксидных полимеров кремнийсодержащим наполнителем с целью повышения эксплуатационных свойств // *Вопросы материаловедения*. – 2016. – № 2 (86). – С. 87–95.
10. Кадыкова Ю. А., Улегин С. В. Направленное регулирование свойств эпоксидбазальтопластиков // *Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов*. – 2015. – № 7 (164). – С. 130–131.
11. Улегин С. В., Кадыкова Ю. А., Артеменко С. Е., Демидова С. А. Наполненные базальтом эпоксидные композиционные материалы // *Пластические массы*. – 2013. – № 2. – С. 31–33.
12. Мостовой А. С. Использование эпоксисиланов при создании эпоксидных композитов с повышенными физико-химическими и механическими свойствами // *Перспективные материалы*. – 2016. – № 4. – С. 60–66.



13. Mazov I. N., Burmistrov I. N., Ilinykh I. A., Stepashkin A., Kuznetsov D. V., Issi J.-P. Anisotropic Thermal Conductivity of Polypropylene Composites Filled With Carbon Fibers and Multiwall Carbon Nanotubes // *Polymer Composites*. – 2015. – V. 36, N 11. – P. 1951–1957.

14. Muratov D. S., Kuznetsov D. V., Ilinykh I. A., Burmistrov I. N., Mazov I. N. Thermal conductivity of polypropylene composites filled with silane-modified hexagonal BN // *Composites Science and Technology*. – 2015. – V. 111, № 6. – P. 40–43.

15. Мостовой А. С. Олигооксипропиленгликоль – эффективный пластификатор для эпоксидных полимеров // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 4 (84). – С. 117–122.

16. Ширшова Е. С., Татаринцева Е. А., Плакунова Е. В., Панова Л. Г. Изучение влияния модификаторов на свойства эпоксидных композиций // *Пластические массы*. – 2006. – № 12. – С. 34–36.

17. Еремеева Н. М., Никифоров А. В., Свешникова Е. С., Панова Л. Г. Исследование свойств эпоксидных композиций на основе модифицированных целлюлозосодержащих материалов // *Молодой ученый*. – 2015. – № 24.1 (104.1). – С. 20–23.

УДК 678.067:628.953.2:620.186

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ С ОПТИЧЕСКИМИ СВЕТОВОДАМИ В ИНФОРМКОМПОЗИТАХ**

М. Ю. ФЕДОТОВ<sup>1</sup>, А. М. ШИЕНОК<sup>2</sup>, Р. Р. МУХАМЕТОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук,  
И. Н. ГУЛЯЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>ООО НИЦ «ИРТ», 119049, Москва, ул. Крымский Вал, д. 3, стр. 2

<sup>2</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: admin@viam.ru

Статья поступила 4.04.2016, в окончательной редакции – 26.12.2016

Приведены результаты исследования границы раздела отвержденной полимерной матрицы с оптическими световодами на основе кварцевого стекла, покрытыми защитной оболочкой, методами микроструктурного анализа. Методами ИК-спектроскопии исследовано защитное покрытие оптического световода на предмет совместимости с полимерной матрицей с учетом режимов отверждения.

*Ключевые слова:* полимерная матрица, оптический световод, оптоволоконный сенсор, количественный микроструктурный анализ, информкомполит.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Гуняева А. Г., Чурсова Л. В., Федотов М. Ю., Черфас Л. В. Исследование углепластика с наномодифицированным молниезащитным покрытием и системой встроенного контроля на основе волоконных брэгговских решеток // *Вопросы материаловедения*. – 2016. – № 1(85). – С. 80–91.

2. Гуняева А. Г., Черфас Л. В., Комарова О. А., Федотов М. Ю. Изыскание путей создания молниезащитного покрытия на основе углеродной ткани с металлическими включениями и возможности его применения в элементе конструкции крыла, выполненного из углепластика // *Сб. материалов молодежной конф. «Фундаментальные научные основы современных комплексных методов исследований и испытаний материалов, а также элементов конструкций»*. – ФГУП «ВИАМ», 2015. – С. 6.

3. Гончаров В. А., Федотов М. Ю. Моделирование физико-механических свойств интеллектуального углепластика с оптоволоконными сенсорами // *Сб. материалов V междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN-2013*, Москва, ИМЕТ РАН, 26–29 ноября 2013.

4. Гуляев И. Н., Гуляев Г. М., Раскутин А. Е. Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № S. – С. 242–253.

5. Федотов М. Ю., Гончаров В. А., Шиенок А. М. Интеллектуальные ПКМ – материалы нового поколения // *Сб. докл. конф. «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России»*. – Научное электронное издание локального пространства. – М.: ВИАМ, 2012.

6. Федотов М. Ю. Концепции создания и тенденции развития интеллектуальных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 71–80.
7. Shishkin V. V., Terentyev V. S., Kharenko D. S., Dostovalov A. V., Wolf A. A., Simonov V. A., Babin S. A., Shelemba I. S., Fedotov M. Yu., Shienok A. M. Fiber-optic sensors based on FBGs with increased sensitivity difference embedded in polymer composite material for separate strain and temperature Measurements // *Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction “Transforming the Future of Infrastructure through Smarter Information”*. ICSIC 2016. – P. 75–79. DOI: 10.1680/tfisi.61279.75
8. Shishkin V. V., Terentiev V. S., Kharenko D. S., Dostovalov A. V., Wolf A. A., Simonov V. A., Fedotov M. Yu., Shienok A. M., Shelemba I. S., Babin S. A. Experimental method of temperature and strain discrimination in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on femtosecond-inscribed FBGs // *Journal of Sensors*. – 2016. – Article ID 3230968.
9. Пат. RU 2588552. Панель из полимерного композиционного материала с молниезащитным покрытием. Оpubл. 27.06.16 // *Бюлл.* № 18.
10. Железина Г. Ф., Сиваков Д. В., Гуляев И. Н. Встроенный контроль: от датчиков до композиционных // *Авиационная промышленность*. – 2008. – № 3. – С. 46–50.
11. Гнусин П. И., Васильев С. А., Медведков О. И., Греков М. В., Дианов Е. М., Гуляев И. Н., Сиваков Д. В. Использование волоконных решеток в качестве чувствительных элементов в композиционных материалах // *Фотон-экспресс*. – 2009. – № 6 (78). – С. 90–91.
12. Назиров М. Ф., Жуков Ю. А., Яковицкая С. Ю. Измерение деформированного состояния образцов с помощью оптоволоконных датчиков, внедренных в структуру композиционного материала // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. – 2015. – № 9–10. – С. 95–101.
13. Пат. US6204920 Optical fiber sensor system / McDonnell Douglas Corporation. Оpubл. 20.03.08.
14. Пат. JP2005098921 Damage detection system for structural composite material and method of detecting damage to structural composite material. Оpubл. 14.04.05.
15. Пат. JP2007232371. Damage detection system using optical fibre sensors. Оpubл. 13.06.07.
16. Sang-Woo Kima, Min-Soo Jeonga, In Leea, Eun-Ho Kimb, Il-Bum Kwonc, Tae-Kyung Hwangd Determination of the maximum strains experienced by composite structures using metal coated optical fiber sensors // *Composites Science and Technology*. – 2013. – V 78, N 1 April. – P. 48–55.
17. Sante R. Di, Donati L. Strain monitoring with embedded Fiber Bragg Gratings in advanced composite structures for nautical applications // *Measurement*. – 2013. – 26 March.
18. Kojovic A., Zivkovic I., Brajovic L., Mitrakovic D., Aleksic R. Laminar composite materials damage monitoring by embedded optical fibers // *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures*. – 2006. – P. 1035–1036.
19. Vincenzini P., Casciati F., Rizzo P. Smart Composite Device for Structural Health Monitoring *Advances in Science and Technology*. – 2012. – V. 83, September.
20. Деев И. С., Кобец Л. П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных матриц // *Клеи. Герметики. Технологии*. – 2013. – № 5. – С. 19–27.
21. Деев И. С., Каблов Е. Н., Кобец Л. П., Чурсова Л. В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. – № 7. – С. 6. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 16.03.2016 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
22. Бабин А. Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2013. – № 4. – С. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 16.03.2016 г.).
23. Мухаметов Р. Р., Ахмадиева К. Р., Чурсова Л. В., Коган Д. И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. – 2011. – № 2. – С. 38–42.
24. Мухаметов Р. Р., Ахмадиева К. Р., Ким М. А., Бабин А. Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 260–265.

25. Сперлинг Л. Взаимопроникающие полимерные сетки и аналогичные материалы. – Л.; М.: Мир, 1984. – 327 с.

26. Гуляев А. И., Исходжанова И. В., Журавлева П. Л. Применение метода оптической микроскопии для количественного анализа структуры ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2014. – № 7. – С. 7. URL:<http://www.viam-works.ru> (дата обращения 16.03.2016 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-7-7.

УДК 621.791.753.5

## К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Б. Ф. ЯКУШИН, д-р техн. наук

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

E-mail: jakushinbf@mail.ru

Статья поступила 16.11.2016

В работе приведены результаты сравнительного анализа новых методов повышения производительности автоматической дуговой сварки и эксплуатационных свойств сварных соединений.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, коэффициент наплавки, дополнительная горячая присадка (ДГП), температура сварочной ванны, способ ввода ДГП, коэффициенты перехода легирующих элементов в ванну, свойства сварных соединений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шолохов М. А. Развитие элементов теории формирования шва и технологических основ многопроходной сварки плавящимся электродом по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники из высокопрочных сталей // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2016. – 33 с.

2. Повышение технологической прочности при сварке под флюсом за счет введения порошкообразного присадочного металла / Б. Ф. Якушин, И. И. Ивочкин, Ю. А. Чернов и др. // Сварочное производство. – 1974. – № 11. – С. 16–17.

3. Болдырев А. М., Гребенчук В. Г., Гуцин Д. А. влияние диоксида титана в составе металлургической присадки на механические свойства металла шва стали 10ХСНД // Сварка и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 39–42.

4. Якушин Б. Ф., Шванева Ю. Ю. Новые методы сварки хладостойких сталей // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 1. – С. 166–170.

5. Salkin J. T. Hot Wire Gas Tungsten Arc Welding: An Overview of process, applications and capabilities // Fabtech International & AWS Welding Show Hot Wire Welding and Cladding Conference, November, 2007.

6. А. С. СССР 1431198. Способ лучевой сварки с присадочным металлом / Б. Ф. Якушин, А. В. Костурбатов, А. П. Гусаренко и др. // Б. И. – 1988. – № 10. – С. 26.

7. Якушин Б. Ф., Соболев Я. А. Эффективность горячей присадки при дуговой сварке аустенитным швом закаливающих сталей // Машиностроение. – 1981. – № 10. – С. 88–91.

8. Повышение стойкости к трещинообразованию и увеличение производительности процесса при сварке под флюсом с горячей присадкой корпусных сталей / Л. В. Грищенко, М. С. Меркель, Б. Ф. Якушин и др. // Вопросы судостроения. – 1983. – № 25. – С. 65–68.

9. Деев А. И. Разработка технологии автоматической сварки с присадкой толстолистовой высокопрочной стали стабильноаустенитными сварочными материалами // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1989.

10. Тихонов В. П. Исследование и разработка способа повышения стойкости против трещин при сварке трудносвариваемых сталей швами переменного состава: Автореферат дис.... канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1979.

11. Якушин Б. Ф. Разработка научных основ и способов обеспечения технологической прочности сварных соединений крупногабаритных конструкций из сталей и сплавов ограниченной свариваемости // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2000.

12. Tadahisa Tsuyama, Kiyomichi Nakai, Takumi Tsuji. Development of submerged arc welding method using hot wire // Welding in the World. – 2014. – V. 58, Is. 5. – P. 713–718. DOI: 10.1007/s40194-014-0153-8.

УДК 669.15–194.56:620.196.2

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕДРЕНИЯ НА ПИТТИНГОВУЮ И МЕЖКРИСТАЛЛИТНУЮ КОРРОЗИЮ АУСТЕНИТНОЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ

А. С. КУДРЯВЦЕВ, канд. техн. наук, К. А. ОХАПКИН, канд. техн. наук, С. А. СУВОРОВ

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

Статья поступила 26.12.2016

Исследована возможность повышения стойкости аустенитной хромоникелевой стали марок 09X18H9 и 08X16H11M3 к питтинговой и межкристаллитной коррозии в условиях стояночного режима реакторной установки типа БН. Коррозионные испытания длительностью до 15 000 ч показали, что скорость коррозии существенно снижается при уменьшении содержания углерода и повышении содержания азота в стали.

*Ключевые слова:* аустенитные хромоникелевые стали, реакторная установка, питтинговая и межкристаллитная коррозия, элементы внедрения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Карзов Г. П., Кудрявцев А. С., Марков В. Г., Гришмановская Р. Н., Трапезников Ю. М., Ананьева М. А. Разработка конструкционных материалов для атомных энергетических установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем // Вопросы материаловедения. – № 2 (82). – 2015. – С. 23–33.
2. Розенфельд И. Л. Коррозия и защита материалов. – М.: Metallurgy, 1970.
3. Герасимов В. В., Монахов А. С. Коррозия реакторных материалов. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1994.
4. Структура и коррозия металлов и сплавов: Справочник / Под ред. Е. А. Ульянина. – М.: Metallurgy, 1989. – 400 с.
5. Bardal E. Corrosion and Protection. – London: Springer-Verlag, 2004. – 307 p.
6. Encyclopedia of corrosion technology / Ed. Ph. A. Schweitzer. – New York: Marcel Dekker, 2004. – 671 p.
7. Чигал В. Межкристаллитная коррозия нержавеющей сталей. – Л.: Химия, 1969. – 232 с.
8. ГОСТ 6032–2003. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии.
9. Landolt D. Corrosion and Surface Chemistry of Metals. – EPFL Press, 2007. – P. 614.
10. Кудрявцев А. С., Охупкин К. А., Трапезников Ю. М., Артемьева Д. А., Ковалев П. В. Повышение служебных характеристик стали марки 08X16H11M3 за счет оптимизации системы легирования // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 3 (83). – С. 38–46.

УДК 622.24.053:539.422

## АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Е. Ю. ПРИЙМАК<sup>1</sup>, канд. техн. наук; А. П. ФОТ<sup>2</sup>, д-р техн. наук; А. В. СТЕПАНЧУКОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Орский гуманитарно-технологический институт (филиал ОГУ)», 462403, Орск, Оренбургская обл., пр. Мира, 15а. E-mail: pri\_rector@ogti.orsk.ru

<sup>2</sup>ГОУ «Оренбургский государственный университет», 460018, Оренбург, пр. Победы, 13

<sup>3</sup>ОАО «Завод бурового оборудования», 460026, Оренбург, пр. Победы, 13

Статья поступила 26.09.2016, в окончательной редакции – 17.01.2017

Произведен анализ причин аварийного повреждения труб, предназначенных для бурения твердых пород. Показана нецелесообразность применения для изготовления бурильных труб, эксплуатирующихся в условиях российского климата, трубных заготовок Drillmax 850 зарубежного

производства с поверхностным упрочнением резьбы методом карбонитрации. Установлено, что карбонитрация способствует повышению порога хладноломкости материала заготовки Drillmax 850 и, как следствие, снижению сопротивляемости материала распространению трещин.

Ключевые слова: аварийные повреждения, бурильная труба, резьбовая часть, карбонитрация, эксплуатационная трещина, ударная вязкость, порог хладноломкости, хрупкое разрушение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие процесса карбонитрации / С. Г. Цих, В. И. Гришин, А. В. Супов и др. // МиТОМ. – 2010. – № 9. – С. 7–12.
2. Приймак Е. Ю., Степанчукова А. В., Яковлева И. Л., Терещенко Н. А. Применение карбонитрации для упрочнения резьбовых соединений бурильных труб из среднеуглеродистых легированных сталей // МиТОМ. – 2015. – № 2. – С. 38–44.
3. Утевский Л. М., Гликман Е. Э., Карк Г. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. – М.: Металлургия, 1987. – С. 222.
4. Yu. J., Mc. Mahon C.J. The Effect of Composition and Carbide Precipitation on Temper Embrittlement of 2,25Cr–1Mo Steel. Part 1. Effects of P and Sn // Met. Trans. – 1980. – V. 11A, N. 2. – P. 277–300.
5. Smith J. F., Reynolds J. H., Southworth H. N. The Role of Mn in the temper Embrittlement of A 3,5Ni–Cr–Mo–V Steel // Acta Met. – 1980. – V. 28. – P. 1555–1564.