

СОДЕРЖАНИЕ

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

- Коротковская С. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И., Новоскольцев Н. С.* Влияние микролегирования на особенности структурообразующих процессов при горячей пластической деформации ..... 5
- Сыч О. В., Хлусова Е. И.* Взаимосвязь параметров структуры с характеристиками работоспособности судостроительных сталей различного легирования ..... 17
- Раевских А. Н.* Применение цифровых технологий для выявления неоднородных концентрационных зон в структуре жаропрочных никелевых сплавов, в том числе полученных селективным лазерным сплавлением ..... 32
- Ходинев И. А., Монин С. А., Рыжков П. В.* Исследование скорости роста трещины усталости в жаропрочных никелевых сплавах ..... 48
- Каблов Е. Н., Бондаренко Ю. А., Колодяжный М. Ю., Сурова В. А., Нарский А. Р.* Перспективы создания высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц и естественных композитов ..... 64
- Счастливая И. А., Леонов В. П., Третьяков И. В., Аскинази А. Ю.* Влияние состава титановых  $\alpha$ -сплавов на теплопроводность ..... 79

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Васильева О. В., Гюлиханданов Е. Л., Фармаковский Б. В., Хроменков М. В.* Особенности процесса литья микропроводов в стеклянной изоляции с жилой из сплавов на основе серебра и никеля ..... 87
- Шарин П. П., Акимова М. П., Яковлева С. П., Попов В. И.* Структура и микротвердость связки для алмазного инструмента на основе карбида вольфрама, полученной пропиткой расплавом железо – углерод ..... 95
- Быстров Р. Ю., Беляков А. Н., Васильев А. Ф., Прудников И. С., Фармаковский Б. В.* Сплав на основе алюминиево-магниевого системы для разработки мишени магнетронного напыления тонких пленок ..... 109
- Васильев А. Ф., Гюлиханданов Е. Л., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В.* Разработка сплава в системе теллур – медь – церий для изготовления функциональных покрытий фотокатодов фотоэлектронных приборов ..... 113
- Васильева О. В., Фармаковский Б. В., Хроменков М. В.* Разработка состава стекол для литья микропроводов в стеклянной изоляции с жилой из индия и олова ..... 117
- Яковлева Н. В., Фармаковский Б. В., Макаров А. М.* Исследование фазовых превращений при синтезе каталитических покрытий на металлическом носителе ..... 121
- Леонов А. А., Абдильменова Е. В., Калашников М. П., Ли Цзин.* Влияние нановолокон  $Al_2O_3$  на уплотнение, фазовый состав и физико-механические свойства композитов на основе  $ZrO_2$ , полученных свободным вакуумным спеканием ..... 132

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Железина Г. Ф., Соловьева Н. А., Шулдешова П. М., Кан А. Ч.* Влияние климатических факторов на свойства баллистически стойких органопластиков ..... 144
- Лишевич И. В., Анисимов А. В., Савёлов А. С., Саргсян А. С., Соболев М. Ю.* Влияние исходной шероховатости поверхности антифрикционных углепластиков на триботехнические характеристики и эффективность приработочного покрытия ..... 158

**КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ**

- Тюрина С. А., Чавушьян С. Л., Макарова А. В., Хвостов Р. Е., Юдин Г. А.* Исследование и анализ методик предотвращения потускнения серебряных сплавов ..... 170

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ**

## **И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

*Садкин К. Е., Филин В. Ю., Мизецкий А. В., Назарова Е. Д.* Оценка методом конечных элементов эффективности локального бокового обжатия призматических образцов с надрезом ..... 182

## **РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

*Ерак Д. Ю., Медведев К. И., Чернобаева А. А., Журко Д. А., Ерак А. Д., Бубякин С. А., Бандура А. П.* Исследование металла патрубков корпуса реактора ВВЭР-440 после 45 лет эксплуатации ..... 192

**Перечень статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вопросы материаловедения» в 2020 году** ..... 200

**Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов** ..... 204

**ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ НА ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

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

*НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,  
Шпалерная ул., 49, E-mail: nrk3@crism.ru*

Поступила в редакцию 25.11.2020

После доработки 2.12.2020

Принята к публикации 09.12.2020

Исследована кинетика роста аустенитного зерна при нагреве и изучены процессы динамической и статической рекристаллизации, протекающие при различных режимах пластической деформации (схема обжаты, температура деформации) высокопрочных сталей с различным комплексом микролегирувания. Проведенные исследования позволили определить термомодеформационные условия формирования мелкодисперсной однородной структуры стали. Разработаны технологические рекомендации для производства высокопрочных сталей в зависимости от их микролегирувания (ванадием, ниобием).

**Ключевые слова:** высокопрочная сталь, вакуумное травление, аустенитное зерно, статическая рекристаллизация, динамическая рекристаллизация, горячая прокатка, бейнитно-мартенситная структура, Gleeble 3800

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-05-16

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Лаврентьев А. А., Голосиенко С. А., Ильин А. В., Михайлов М. С., Мотовилина Г. Д., Петров С. Н., Садкин К. Е. Сопротивление хрупкому разрушению высокопрочной среднелегированной стали и его связь с параметрами структурного состояния // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 3(99). – С. 128–147.
2. Насибов А. Г., Матросов Ю. И., Рудченко А. В. Влияние ванадия, ниобия, углерода и кремния на свойства малоперлитной стали // Материаловедение и термическая обработка металлов. – 1973. – № 4. – С. 19–24.
3. Одесский П. Д., Смирнов Л. А. О применении ванадия и ниобия в микролегируемых сталях для металлических конструкций // Сталь. – 2005. – № 6. – С. 116–123.
4. Opiela M., Ozgovicz W. Effects of Nb, Ti and V on recrystallization kinetics of austenite in microalloyed steels // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2012. – N 55/2. – P. 759–771.
5. Glodowski R. J. Effect of V and N on processing and Properties of HSLA strip steels produced by thin slab casting // Proc. 42nd MWSP conf. ISS. V. XXXVIII. – 2000. – P. 441–451.
6. Siwecki T., Sandberg A., Roberts W., Lagneborg R. The influence of processing Route and nitrogen content on microstructure development and precipitation hardening in V-microalloyed HSLA steels // Thermomechanical processing of microalloyed austenite / Ed. By DeArdo, Ratz, Wray. – TMS-AIME, Warrendale, USE. – 1982. – P. 163–192.
7. Garcia de Andres C., Bartolome M. J., Capdevila C., San Martin D., Caballero F. G., Lopez V. Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels // Materials Characterization. – 2001. – N 46. – P. 389–398.
8. Fernandez A. I., Uranga P., Lopez B., Rodrigues-Ibabe J. M. Dynamic recrystallization behavior covering a wide austenite grain size range in Nb and Nb–Ti microalloyed steels // Materials Science and Engineering. – 2003. – N 361. – P. 367–376.
9. Medina S. F., Hernandez C. A. General expression of the Zener-Holloman parameter as a function of the chemical composition of low alloy and microalloyed steels // Acta Material. – 1996. – V. 44, N 1. – P. 137–148.
10. Зисман А. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. Построение и использование карт структурных изменений при горячей деформации аустенита низкоуглеродистой стали 09ХН2МДФ для

УДК 669.14.018.41: 669.15–194.2: 621.771.23: 539.4

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

О. В. СЫЧ, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 04.12.2020

После доработки 15.12.2020

Принята к публикации 17.1.2020

Представлены результаты исследования взаимосвязи прочности и работоспособности (температур вязкохрупкого перехода  $T_{кв}$  и нулевой пластичности NDT, критического раскрытия в вершине трещины CTOD при температуре испытаний  $-40^{\circ}\text{C}$ ) от параметров структуры толстолистового проката из низкоуглеродистых низколегированных сталей с различным содержанием основных легирующих и микролегирующих элементов.

*Ключевые слова:* низколегированная сталь, термомеханическая обработка, углеродный эквивалент, прочность, хладостойкость, трещиностойкость, параметры структуры

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-17-31

### ЛИТЕРАТУРА

1. НД № 2-020101-124. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII. Материалы. – СПб.: Российский морской регистр судоходства. – 2020. – 273 с.
2. Гусев М. А., Ильин А. В., Ларионов А. В. Сертификация судостроительных материалов для судов, эксплуатирующихся в условиях Арктики // Судостроение. – 2014. – № 5 (816). – С. 39–43.
3. Филин В. Ю. Контроль качества сталей для крупногабаритных сварных конструкций Арктического шельфа. Применение российских и зарубежных требований // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 2 (98). – С. 136–153.
4. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Ч. 1: Принципы легирования и требования к структуре листового проката // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3 (95). – С. 22–47.
5. Тазов М. Ф., Цветков Д. С., Горошко Т. В. Исследование неоднородности механических свойств и микроструктуры по толщине листа стали категории прочности K65, изготовленного способом термомеханической обработки // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2013. – № 2. – С. 72–77.
6. Голи-Оглу Е. А., Бокачев Ю. А. Термомеханическая обработка плит толщиной до 100 мм из низколегированной конструкционной стали в NLMK DanSteel // Сталь. – 2014. – № 9. – С. 71–78.
7. Голи-Оглу Е. А., Кичкина А. А. Микро- и наноструктурная неравномерность по толщине 100 мм плит из конструкционной стали после ТМО и ТО // Металлург. – 2016. – № 11 – С. 54–60.
8. Jia T., Zhou Y., Jia X. X., Wang Z. Effect of Microstructure on CVT Impact Toughness in Thermomechanically Processed High Strength Microalloyed Steel // Metallurgical and materials transactions A. – 2017. – February. – V. 48A. – P. 685–696.
9. Лаврентьев А. А., Голосиенко С. А., Ильин А. В., Михайлов М. С., Мотовилина Г. Д., Петров С. Н., Садкин К. Е. Сопротивление хрупкому разрушению высокопрочной среднелегированной стали и его связь с параметрами структурного состояния // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 3(99). – С. 128–147.
10. Орлов В. В. Принципы управляемого создания структурных элементов наноразмерного масштаба в трубных сталях при значительных пластических деформациях // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 2 (66). – С. 5–17.

11. Смирнов М. А., Пышминцев И. В., Мальцева А. Н., Мушина О. В. Влияние ферритно-бейнитной структуры на свойства высокопрочной трубной стали // *Металлург.* – 2012. – № 1. – С. 55–62.
12. Bingley M. S. Effect of grain size and carbide thickness on impact transition temperature of low carbon structural steels // *Materials Science and Technology.* – 2001. – V. 17. – P. 700–714.
13. Казаков А. А., Киселев Д. В., Казакова Е. И., Курочкина О. В., Хлусова Е. И., Орлов В. В. Влияние структурной анизотропии в ферритно-бейнитных штрипсовых сталях после термомеханической обработки на уровень их механических свойств // *Черные металлы.* – 2010. – № 6. – С. 7–13.
14. Кичкина А. А., Матросов М. Ю., Эфрон Л. И., Клюквин М. Б., Голованов А. А. Влияние структурной анизотропии ферритно-бейнитной трубной стали на механические свойства при испытаниях на растяжение и ударный изгиб // *Металлург.* – 2010. – № 12. – С. 33–39.
15. Настич С. Ю. Особенности ферритно-бейнитной структуры и сопротивление вязким разрушениям высокопрочных трубных сталей // *Деформация и разрушение материалов.* – 2012. – № 7. – С. 19–25.
16. Урцев В. Н., Корнилов В. Л., Шмаков А. В., Краснов М. Л., Стеканов П. А., Платов С. И., Мокшин Е. Д., Урцев Н. В., Счастливец В. М., Разумов И. К., Горностырев Ю. Н. Формирование структурного состояния высокопрочной низколегированной стали при горячей прокатке и контролируемом охлаждении // *Физика металлов и металловедение.* – 2019. – Т. 120, № 12. – С. 1335–1344.
17. Пышминцев И. Ю., Борякова А. Н., Смирнов М. А., Дементьева Н. В. Свойства низкоуглеродистых сталей, содержащих в структуре бейнит // *Металлург.* – 2009. – № 12. – С. 45–50.
18. Настич С. Ю. Влияние морфологии бейнитной составляющей микроструктуры низколегированной стали X70 на хладостойкость проката больших толщин // *Металлург.* – 2012. – № 3. – С. 62–69.
19. Isasti N., Jorge-Badiola D., Taheri M. L., Uranga P. Microstructural Features Controlling Mechanical Properties in Nb–Mo Microalloyed Steels. Part II: Impact Toughness // *Metallurgical and Materials Transactions A.* – 2014. – V. 45. – P. 4972–4982.
20. Thridandapani R. R., Misra R. D. K., Mannering T., Panda D., Jansto S. The application of stereological analysis in understanding differences in toughness of V- and Nb-microalloyed steels of similar yield strength // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2006. – P. 285–291.
21. Hu J., Du L. X., Zang M., Yin S. J., Wang Y. G., Qi X. Y., Gao X.H., Misra R. D. K. On the determining role of acicular ferrite in V–N microalloyed steel in increasing strength-toughness combination // *Materials Characterization.* – 2016. – V. 118. – P. 446–453.
22. Настич С. Ю., Матросов М. Ю. Структурообразование высокопрочных трубных сталей при термомеханической обработке // *Металлург.* – 2015. – № 9 – С. 46–54.
23. Казаков А. А., Киселев Д. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И. Методика оценки микроструктурной неоднородности по толщине листового проката из хладостойкой низколегированной стали арктического применения // *Черные металлы.* – 2020. – № 9. – С. 11–19.
24. Казаков А. А., Киселев Д. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И. Количественная оценка структурной неоднородности в листовом прокате из хладостойкой низколегированной стали для интерпретации технологических особенностей его изготовления // *Черные металлы.* – 2020. – № 11. – С. 4–14.

УДК 669.245.018.44: 621.762.5

**ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ  
КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ЗОН В СТРУКТУРЕ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ,  
В ТОМ ЧИСЛЕ ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ**

А. Н. РАЕВСКИХ

*Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов  
(ФГУП «ВИАМ»), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: [raevskih\\_anton@me.com](mailto:raevskih_anton@me.com)*

Поступила в редакцию 6.04.2020

После доработки 25.09.2020

Принята к публикации 1.10.2020

Представлены экспериментальные данные, полученные с применением цифровых технологий при изучении химической, кристаллографической и морфологической однородности структуры жаропрочного сплава на никелевой основе с карбидно-интерметаллидным упрочнением и повышенным содержанием  $\gamma'$ -фазы, синтезированного на монокристаллические подложки разного состава с КГО  $\langle 001 \rangle$  в Z-направлении. С использованием предложенного подхода показана возможность изучения и аттестации разноуровневых изменений структуры образцов в исходном состоянии и после термического воздействия. Анализ проводили при помощи интегрированных в растровый электронный микроскоп системы для EBSD-анализа и программного пакета для анализа электронно-микроскопических изображений.

**Ключевые слова:** селективное лазерное сплавление, РЭМ, концентрационные неоднородности,  $\gamma'$ -фаза, анализ изображений, микротекстура, EBSD-анализ, монокристаллические образцы, кристаллографическая ориентация, структурные преобразования

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-32-47

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. – 2015. – № 2 (11) . – С. 52–55.
2. Каблов Е. Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // Металлы Евразии. – 2017. – № 1. – С. 2–6.
3. Каблов Е. Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России: Сб. науч.-информ. материалов. – М.: ВИАМ, 2015. – С. 458–464.
4. Самойлов А. И., Морозова Г. И., Кривко А. И., Афоничев О. С. Аналитический метод оптимизации легирования жаропрочных никелевых сплавов // Материаловедение. – 2000. – № 2. – С.14–17.
5. Морозова Г. И. Сбалансированное легирование жаропрочных никелевых сплавов // Металлы. – 1993. – № 1. – С. 38–41.
6. Петрушин Н. В., Елютин Е. С., Назаркин Р. М., Колодочкина В. Г., Фесенко Т. В. Структура и свойства монокристаллов жаропрочного никелевого сплава, содержащего рений и рутений // Металлургия машиностроения. – 2013. – № 1. – С. 12–18.
7. Дынин Н. В., Иванова А. О., Хасиков Д. В., Оглодков М. С. Селективное лазерное сплавление алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2017. – № 8 (56). – С. 12–23. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.01.2018). DOI 10.18577/2307-6046-2017-0-8-2-2.
8. Pinkerton A. J. Lasers in additive manufacturing // Optics & Laser Technology. – 2016. – V 78. – P. 25–32.
9. Yadroitsev I. Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. – Germany, Saarbüken: LAP (Lambert Academic Publishing), 2009.
10. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective Laser Melting // Laser Technik Journal. – 2012. – V. 9, N. 2. – P. 33–38.
11. Классификация дефектов металлических материалов, синтезированных методом селективного лазерного сплавления, и возможности методов неразрушающего контроля для их обнаружения / Н. П. Алешин, В. В. Мурашов, А. Г. Евгенов и др. // Общие вопросы дефектоскопии. – 2016. – № 1. – С. 48–55.
12. Xia M., Gu D., Yu G., Dai D. Porosity evolution and its thermodynamic mechanism of randomly packed powder-bed during selective laser melting of Inconel 718 alloy // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2017. – V. 116. – P. 96–106.
13. Сухов Д. И., Мазалов П. Б., Неруш С. В., Ходырев Н. А. Влияние параметров селективного лазерного сплавления на образование пористости в синтезированном материале коррозионно-стойкой стали // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2017. – № 8 (56) . – С. 34–44. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 11.01.2018). DOI 10.18577/2307-6046-2017-0-8-4-4.
14. Lu Y., Wu S., Gan Y., Huang T., Yang C., Junjie L., Lin J. Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy, Opt. Laser Technol. – 2015. – N 75. – P. 197–206.

15. Catchpole-Smith S., Aboulkhair N., Parry L., Tuck C., Ashcroft I.A., Clare A. Fractal scan strategies for selective laser melting of 'unweldable' nickel superalloys // *Additive Manufacturing*. – 2017. – V. 15. – P. 113–122, DOI: 10.1016/j.addma.2017.02.002.
16. Rolchigo M. R., Mendoza M. Y., Samimi P., Brice D. A., Martin B., Collins P. C., Lesar R. Modeling of Ti–W solidification microstructures under Additive manufacturing conditions // *Metallurgical and materials transactions*. – 2017. – V. 48a. – P. 3606–3622.
17. Vajda E. G., Humphrey S., Skedros J. G., Bloebaum R. D. Influence of topography and specimen preparation on backscattered electron images of bone. – 1999. – V. 21. – P. 379–386.
18. Kangas E. A method for quantitative determination of mean atomic number from backscattered electron images, a mineralogical focus. – Bachelor of Science thesis, Göteborg, 2017.
19. Lloyd G. Atomic number and crystallographic contrast images with the SEM: A review of backscatterd electron techniques // *Mineral Mag*. – 1987. – N 51. – P. 3–19.
20. Sánchez E., Torres Deluigi M., Castellano G. Mean Atomic Number Quantitative Assessment in Backscattered Electron Imaging // *Microsc. Microanal.* – 2012. – N 18. – P. 1355–1361.
21. Ткаль В. А., Шараева А. В., Жуковская И. А. Цифровая обработка топографических изображений дефектов структуры монокристаллов // Сб. материалов и программа Шестого международного научного семинара и Четвертой международной молодежной научной школы-семинара «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», 19–27 августа 2013 г., НФ СПбГУСЭ. – Великий Новгород, 2013. – С. 234–235.
22. Ткаль В. А., Шараева А. В., Жуковская И. А. Цифровая обработка поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов// Сб. материалов и программа Шестого международного научного семинара и Четвертой международной молодежной научной школы-семинара «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», 19–27 августа 2013 г., НФ СПбГУСЭ. – Великий Новгород, 2013. – С. 131–133.
23. Ткаль В. А., Шараева А. В., Жуковская И. А. Количественная оценка эффективности цифровой обработки HDR-изображений // Сб. материалов и программа Шестого международного научного семинара и Четвертой международной молодежной научной школы-семинара «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», 19–27 августа 2013 г., НФ СПбГУСЭ. – Великий Новгород, 2013. – С. 134–135.
24. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений. – СПб.: Техносфера. – 2006. – С. 1072.
25. Leszek W. Image analysis: applications in materials engineering. – CRC Press LLC, 1999. – P. 239.
26. Xia M., Gu D., Yu G., Dai D., Chen H., Shi Q. Selective laser melting 3D printing of Ni-based superalloy: understanding thermodynamic mechanisms // *Sci. Bull.* – 2016. – N 61(13). – P. 1013–1022, DOI 10.1007/s11434-016-1098-7.
27. Clark M., Clare A., Dryburgh P., Li W., Patel R., Pieris D., Sharples S., Spatially R. S. Resolved Acoustic Spectroscopy (SRAS) Microstructural Imaging 45th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation // *AIP Conf. Proc.* – 2102. – V. 38, 020001-1–020001-7; <https://doi.org/10.1063/1.5099705>.
28. Attallah M. M., Jennings R., Wang X., Carter L. N. Additive manufacturing of Ni-based superalloys the outstanding issues // *MRS bulletin*. – 2016. – V. 41, N 10. – P. 758–764. <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.211>.
29. Marchese G., Lorusso M., Calignano F., Ambrosio E. P., Manfredi D., Pavese M., Biamino S., Ugues D., Fino P. Inconel 625 by direct metal laser sintering: effects of the process parameters and heat treatments on microstructure and hardness // *Proceedings of the 13th International Symposium on Superalloys TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Superalloys 2016*. – P. 1013–1020.
30. Раевских А. Н., Чабина Е. Б., Петрушин Н. В., Филонова Е. В. Исследование структурно-фазовых изменений на границе между монокристаллической подложкой и сплавом ЖС32-ви, полученным селективным лазерным сплавлением, после воздействия высоких температур и напряжений // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2019. – № 1 (73). – С. 3–12, URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.02.2020 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-3-12.

31. Sames W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R., Babu S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // International Materials Reviews. – 2016. – P. 1–46, DOI 10.1080/09506608.2015.1116649.

32. Бокштейн С. З., Болберова Е. В., Игнатова И. А., Кишкин С. Т., Разумовский И. М., Влияние величины несоответствия параметров решеток фаз на диффузионную проницаемость межфазных границ // Физика металлов и металловедение. – 1985. – № 59(5). – С. 938–942.

33. Шанявский А. А., Артамонов М. А., Прудников И. Д., Гришин М. М., Методика автоматизированного определения температурного перегрева жаропрочных никелевых сплавов по состоянию упрочняющей фазы // Научный вестник МГТУ ГА. – 2007. – № 123. – С. 74–78.

34. Бронфин М. Б., Алексеев А. А., Чабина Е. Б. Металлофизические исследования. Возможности и перспективы // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. – М.: ВИАМ, 2007. – С. 362.

35. Белов Н. В. Процессы реального кристаллообразования. – М.: Наука, 1977. – С.1–235.

36. 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.

УДК 669.245.018.44: 539.421

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ

И. А. ХОДИНЕВ, С. А. МОНИН, П. В. РЫЖКОВ

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

Поступила в редакцию 28.09.2020

После доработки 02.11.2020

Принята к публикации 13.11.2020

Приведены результаты испытаний на скорость роста усталостной трещины в компактных образцах при внецентренном растяжении с использованием датчика раскрытия трещины в условиях асимметричного цикла нагружения  $R = 0,1$  при комнатной и повышенной температурах. Рассмотрена взаимосвязь условий силового нагружения и предварительно выращенной исходной усталостной трещины. Получены значения эффективного коэффициента интенсивности напряжений  $K_{eff}$ , которые являются важной оценкой для интерпретации наблюдаемого характера роста трещины. Представлено сравнение свойств циклической трещиностойкости сплава ВЖ175-ИД со свойствами зарубежных аналогов Rene 88DT, Inconel 625SLM и отечественных ЭП741НП, ЭК151-ИД. Показано влияние температуры испытания на скорость роста трещины. Проверена гипотеза о линейной зависимости параметров уравнения Пэриса.

**Ключевые слова:** жаропрочные деформируемые никелевые сплавы, механические свойства, характеристики усталости, кинетическая диаграмма усталостного разрушения, эффективный коэффициент интенсивности напряжений, закрытие трещины, уравнение Пэриса

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-48-63

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С., Сидоров В. В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2013. – № 3. – С. 47–54.

2. Dowling N. E. Mechanical Behavior of Materials. – Pearson Education Limited, 2007.

3. Hudak Jr. S. J. The dependence of crack closure on fatigue loading variables // Mechanics of Closure. – ASTM STP 982, 1987. – P. 121–138.

4. 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.

5. Gorbovets M. A., Khodinev I. A., Belyaev M. S., Ryzhkov P. V. Low-Cycle Fatigue of a VZh175 Nickel Superalloy during Asymmetric Loading // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – No 9. – P. 889–893.

6. Каблов Е. Н., Летников М. Н., Оспенникова О. Г., Бакрадзе М. М., Шестакова А. А. Особенности формирования частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы в процессе старения высоколегированного жаропрочного деформируемого никелевого сплава ВЖ175-ИД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – № 9(81) . – С. 3–14. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.07.2020). DOI: [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2019-0-9-3-14](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-9-3-14)

7. Бакрадзе М. М., Овсепян С. В., Шугаев С. А., Летников М. Н. Влияние режимов закалки на структуру и свойства штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2013. – № 9. – Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.07.2020).

8. Горбовец М. А., Беляев М. С., Рыжков П. В. Сопротивление усталости жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом СЛС // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 3. – С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-50-55.

9. Медведев П. Н., Гуляев А. И. Анализ пространственного распределения трещин в жаропрочном никелевом сплаве, изготовленном по технологии СЛС // Авиационные материалы и технологии, 2020. – № 1. – С. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-12-18.

10. Горбовец М. А., Ходинев И. А., Рыжков П. В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2018. – № 9. Ст.06 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 21.07.2020). DOI: [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60).

11. Каблов Е. Н., Евгенов А. Г., Мазалов И. С., Шуртаков С. В., Зайцев Д. В., Прагер С. М. Эволюция структуры и свойств высокохромистого жаропрочного сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления. Ч. I // Материаловедение. – 2019. – № 3. – С. 9–17.

12. Голубовский Е. Р., Волков М. Е., Эммауский Н. М. Метод определения границ устойчивого роста трещины усталости и параметров уравнения Пэриса // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – № 9.

13. Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension. // Engineering Fracture Mechanics. – 1970. – V. 2. – P. 37–45.

14. Poulin J.-R., Brailovski V., Terriault P. Long fatigue crack propagation behavior of Inconel 625 processed by laser powder bed fusion: influence of build orientation and post-processing conditions. // International Journal of Fatigue. – 2018. – V. 116. – P. 144–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.07.008>.

15. Yokobori T., Aizawa T. The influence of temperature and stress intensity factor upon the striation spacing and fatigue crack propagation rate of aluminum alloy // International Journal. Fracture. – 1973. – V. 9. – P. 489–491.

16. Schijve J. Some formulas for the crack opening stress level // Engineering Fracture Mechanics. – 1981. – V. 14. – P. 461–465.

17. Голубовский Е. Р., Волков М. Е., Эммауский Н. М. Оценка скорости развития трещины усталости (СРТУ) в никелевых сплавах для дисков ГТД // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 2/201. – С. 229–235.

18. Shyam A., Allison J. E., Szczepanski C. J., Pollock T. M., Jones J. W. Small fatigue crack growth in metallic materials: A model and its application to engineering alloys // Acta Materialia. – 2007. – V. 55. – P. 6606–6616. DOI: 10.1016/j.actamat.2007.08.022.

УДК 669.018.44: 621.438

## **ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ МАТРИЦ И ЕСТЕСТВЕННЫХ КОМПОЗИТОВ**

Е. Н. КАБЛОВ, акад. РАН, Ю. А. БОНДАРЕНКО, д-р техн. наук, М. Ю. КОЛОДЯЖНЫЙ,  
В. А. СУРОВА, А. Р. НАРСКИЙ

Поступила в редакцию 27.08.2020

После доработки 24.09.2020

Принята к публикации 25.09.2020

Рассмотрены научно-технические и технологические аспекты в области создания новых высокотемпературных материалов для деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД) с рабочими температурами, превышающими существующие в ГТД. Исследованы наиболее тугоплавкие металлургические материалы для создания новых высокожаропрочных сплавов, используемых для изготовления рабочих и сопловых лопаток и других деталей перспективных ГТД на основе систем NiAl–Ni<sub>3</sub>Al, Co–Cr–Re, Pt–Al, Nb–Si, Mo–Si–B. В сплавах системы NiAl–Ni<sub>3</sub>Al в качестве упрочняющей фазы выступает интерметаллид NiAl(β), обладающий высокой температурой плавления (1638°C) и низкой плотностью ( $\gamma \sim 5,7 \text{ г/см}^3$ ), что обеспечивает высокую жаростойкость материала вплоть до 1300°C. В сплавах системы Co–Cr–Re жаропрочность обеспечивается в основном за счет упрочнения Co-матрицы, в том числе дисперсными выделениями карбидной фазы TaC, боридной фазы Cr<sub>2</sub>B, в сплавах системы Pt–Al – за счет легирования Cr, Al, Ti, Re... и выделений когерентно внедренной фазы Pt<sub>3</sub>Al, в эвтектических сплавах системы Nb–Si – за счет комплексного упрочнения твердого раствора Nb и силицида Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, а также естественно-композиционной структуры. В сплавах Mo–Si–B высокая прочность достигается за счет легирования α-Mo твердого раствора и образования интерметаллидных фаз Mo<sub>3</sub>Si, Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>, карбидов Mo<sub>2</sub>C, TiC.

Были выбраны композиции, проведен анализ методов их выплавки, включая направленную кристаллизацию, обеспечивающую получение естественно-композиционной структуры, оценены механические свойства при комнатной и высокой температурах, стойкость к окислению, исследованы особенности структуры, дана информация о технологическом оборудовании и о возможности получения деталей различными способами. Показано, что в зависимости от состава выбранной матрицы рабочая температура жаропрочных сплавов может возрасти до 1300–1500°C, что существенно превышает рабочую температуру существующих никелевых жаропрочных сплавов. Сделан вывод о перспективности исследуемых материалов для использования в авиационном двигателестроении и аэрокосмической промышленности.

**Ключевые слова:** жаропрочные сплавы, тугоплавкие матрицы, упрочняющие фазы, эвтектический композит, микроструктура, кратковременная и длительная прочность, газотурбинные двигатели

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-64-78

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бабкин В. Н. Роль науки в решении практических задач авиационного двигателестроения // Двигатель. – 2013. – № 3 (87). – С.2–6.
2. История авиационного материаловедения: ВИАМ – 80 лет: годы и люди / Под общ. ред. Е. Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2012. – 520 с.
3. Reed R. C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. – Cambridge University Press, Cambridge, 2006. – 372 p.
4. 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.
5. Каблов Е. Н., Бондаренко Ю. А., Ечин А. Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № S. – С.24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
6. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Светлов И. Л., Демонис И. М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // Технология легких сплавов. – 2007. – № 2. – С. 6–16.
7. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Светлов И. Л., Демонис И. М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № S. – С. 36–52.

8. Walston S., Cetel A., MacKay R., O'Hara K., Duhl D., Dreshfield R. Joint development of a fourth generation single crystal superalloys. // *Superalloys 2004*, Seven Springs Mountain Resort, Champion (Pennsylvania). – Minerals, Metals & Materials Society, 2004. – P. 15–24.
9. Koizumi Y., Kobayashi T., Yokokawa T., Zhang J., Osawa M., Harada H., Aoki Y., Arai M. Development of next-generation Ni-base single crystal superalloys // *Superalloys 2004*, Seven Springs Mountain Resort, Champion (Pennsylvania). – Minerals, Metals & Materials Society, 2004. – P. 35–43.
10. Development of an Oxidation-Resistant high-strength sixth-Generation Single-Crystal Superalloy TSM-238 / K. Kawagishi et al. // *Superalloys 2012*, TMS. – 2012. – P. 189–195.
11. Yokokawa T., Harada H., Mori Y., Kawagishi K., Koizumi Y., Kobayashi T., Yuyama M., Suzuki S. Design of Next Generation Ni-Base Single Crystal Superalloys Containing Ir: Towards 1150°C Temperature Capability // *Superalloy 2016*, TMS. – 2016. – P.123–130.
12. Khan T. Further assessment and improvement of high strength  $\gamma/\gamma'$ -NbC composites for advanced turbine blades // *Proc. of Conf. on In-Situ Composites 111*. – Lexington: Ginn Custom Publishing, 1978. – P. 378–389.
13. Damerval Claire. Contributions a l'etude du comportement mecanique des composites COTAS  $\gamma/\gamma'$ -NbC a moyennc et naute temperature // *Note technique ONERA*. – 1986. – March. – 156 p.
14. Stohr J. F. Stabilité thermique de composites de solidification metal-carbure // *Annales de Chimie*. – 1980. – V.5, N 2–3. – P. 226–241.
15. Woodford D. A. Creep and rupture of an advanced fiber strengthened eutectic composite superalloy // *Metallurgical Transaction*. – 1977. – V. 8a, N 4. – P.639–650.
16. Meetnam G. W. Superalloys in gas turbine engines // *The Metallurgist and Materials Technologist*. – 1982. – V. 14, N 9. – P.387–392.
17. Качанов Е. Б., Петрушин Н. В., Светлов И. Л. Жаропрочные эвтектические сплавы с карбидно-интерметаллидным упрочнением // *МИТОМ*. – 1995. – № 4. – С.24–29.
18. Бондаренко Ю. А., Каблов Е. Н., Панкратов В. А. Особенности получения рабочих лопаток малогабаритных ГТД из сплава ВКПС-20 // *Авиационная промышленность*. – 1993. – № 2. – С.9–10.
19. Бондаренко Ю. А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. – 2019. – № 2 (55) . – С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
20. Корнилов И. И. Физико-химические основы жаропрочности сплавов. – М.: Изд-во АН СССР. 1961. – 516 с.
21. Корнилов И. И., Минц Р. С. Исследование системы Ni–Cr–NiAl // *Неорганическая химия*. – 1958. – Т. III, вып. 5. – С. 699–707.
22. Бондаренко Ю. А., Каблов Е. Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом // *МИТОМ*. – 2002. – № 7. – С. 20–23.
23. Бондаренко Ю. А., Кузьмина Н. А., Базылева О. А., Раевских А. Н. Исследование структуры и фазового состава интерметаллидного сплава системы NiAl–Ni<sub>3</sub>Al, полученного методом высокоградиентной направленной кристаллизации // *Вопросы материаловедения*. – 2018. – № 2 (94) . – С. 52–60.
24. Gorr B., Burk S., Trindade V. B., Christ H.-J. The Effect of Pre-Oxidation Treatment on the High-Temperature Oxidation of Co–Re–Cr Model Alloys // *Oxidation of Metals*, 2010. – P. 239–253.
25. Mukherji D., Rosler J., Wehrs J., Strunz P., Beran P., Gilles R., Hofmann M., Hoelzel M., Eckelerbe H., Szentmiklosi L., Macsik Z. Application of *In Situ* Neutron and X-Ray Measurements at High Temperatures in the Development of Co–Re-Based Alloys for Gas Turbines // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2013. – V. 44A, January. – P. 22–30.
26. Strunz P., Mukherji D., Beran P., Gilles R., Karge L., Hofmann M., Hoelzel M., Rosler J., Farkas G. Matrix Transformation in Boron Containing High-Temperature Co–Re–Cr Alloys // *Metals and Materials International*. – 2018. – P. 934–944.
27. Wolff I. M., Hill P. J. Platinum Metals-Based Intermetallics for High-Temperature Service // *Platinum Metals Review*. – 2000. – N 44. – P. 158–166.

28. Hill P. J., Biggs T., Ellis P., Hohls J., Taylor S. S., Wolff I. M. An Assessment of Ternary Precipitation-Strengthened Pt Alloys for Ultra-High Temperature Applications // *Materials Science and Engineering: A*. – 2001. – Т. 301, N 2. – P.167–179.
29. Odusote J. K., Cornish L. A., Papo J. M. Assessment of the Oxidation Behavior of a Pt-Based Alloy for High Temperature Applications // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2013. – V. 22(11). – P. 3466–3475.
30. Vorberg S., Wenderoth M., Fischer B., Glatzel U., Volkl R. A TEM Investigation of the  $\gamma/\gamma'$ -Phase Boundary in Pt-Based Superalloys // *Journal of the Minerals*. – 2005. – P. 49–51.
31. Huller M., Wenderoth S., Vorberg S., Fischer B., Glatzel U., Volkl R. Optimization of Composition and Heat Treatment of Age-Hardened Pt–Al–Cr–Ni Alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2005 V. 36(13). – P. 681–689.
32. Wenderoth M., Volkl R., Vorberg S., Yamabe-Mitarai Y., Harada H., Glatzel U. Microstructure, Oxidation Resistance and High-Temperature Strength of Gamma Prime Hardened Pt-Base Alloy // *International Journal of Materials Research*. – 2007. – N 98(6). – P. 463–467.
33. Fairbank G. B., Humphreys C. J., Kelly A., Jones C. N. Ultra-High Temperature Intermetallic for the Third Millennium // *Intermetallics*. – 2000. – N 8. – P. 1091–1100.
34. Cornish L. A., Fischer B., Volkl R. Development of Platinum-Group-Metal Superalloys for High-Temperature Use // *A Publication of the Materials Research Society (MRS BULLETIN)*. – 2003. – N 28(9). – P. 632–638.
35. Оспенникова О. Г., Подъячев В. Н., Столянков Ю. В. Тугоплавкие сплавы для новой техники // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2016. – № 10. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 06.02.2017 г.). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-5-5.
36. Solidification processing of high temperature intermetallic eutectic-based alloys / B. P. Bewlay, M. R. Jackson, J. A. Sutcliffe et al. // *Material Science and Engineering. Part 2*. – 1995. – N 192/193. – P. 534–543.
37. Bewlay B. P., Jackson M. R., Lipsitt H. A. The Balance of Mechanical and Environmental Properties of a Multielement Niobium-Niobium Silicide-Based In-Situ Composite // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1996. – V. 27A, N 12. – P. 3801–3808.
38. Bewlay B. P., Jackson M. R., Subramanian P. R. Processing high temperature refractory metal-silicide in situ composites // *Journal of Metals (JOM)*. – 1999. – V. 51, N 4. – P. 32–36.
39. Tanaka R., Kasama A., Fujikura M., Iwanaga I., Tanaka H., Motsumuro Y. Research and development of niobium-based superalloys for hot components of gas turbines // *Proceeding of the International Gas Turbine Congress, 2003*. – P. 1–5.
40. Guo X. P., Guan P., Ding X., Zhang J., Kusabiraki K., Fu H. Z. Unidirectional Solidification of a Nb<sub>ss</sub>/Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> in-situ Composite // *Materials Science Forum*. – 2005. – V. 475–479. – P. 745–748.
41. Bewlay B. P., Jackson M. R., Zhao J. C., Subramanian P. R., Mendiratta M. G., Lewandowski J. Ultra-high temperature Nb–Silicide-based composites // *MRS Bulletin*. – 2003. – V. 28, N 9. – P. 646–653.
42. Bewlay B. P., Jackson M. R., Zhao J. C., Subramanian P. R. A review of very high-temperature Nb-silicide based composites // *Metallurgical & Materials Transactions A*. – 2003. – V. 34A, N 10. – P. 2043–2052.
43. Patent № CN 102703971, заявл. 01.06.2012 г., опубл. 03.10.2012 г.
44. Patent № US 8307881, заявл. 06.01.2009 г., опубл. 13.11.2012 г.
45. Patent № CN 102051669, заявл. 04.11.2010 г., опубл. 25.07.2012 г.
46. Patent № US 2006130996, заявл. 22.12.2004 г., опубл. 22.06.2006 г.
47. Patent № US 7610945, заявл. 29.09.2006 г., опубл. 03.11.2009 г.
48. Patent № EP 2322684, заявл. 16.10.2009 г., опубл. 18.05.2011 г.
49. Patent № EP 1743729, заявл. 29.06.2006 г., опубл. 18.04.2007 г.
50. Светлов И. Л. Высокотемпературные Nb–Si композиты – замена монокристаллическим никелевым жаропрочным сплавам // *Двигатель*. – 2010. – № 5 (71). – С. 36–37.
51. Мин П. Г., Вадеев В. Е., Крамер В. В. Технология выплавки высокотемпературного композиционного материала на основе системы Nb–Si в вакуумной индукционной печи // *Металлург*. – 2019. – № 8. – С. 91–96.

52. Бондаренко Ю. А., Ечин А. Б., Колодяжный М. Ю., Сулова В. А. Формирование структуры эвтектического сплава системы Nb–Si при направленной кристаллизации в жидкометаллическом охладителе // МИТОМ. – 2017. – № 8 (746). – С. 41–45.
53. Бондаренко Ю. А., Колодяжный М. Ю., Ечин А. Б., Раевских А. Н. Исследование микро-структуры и свойств ниобийкремниевого эвтектического композита, полученного при направленной кристаллизации в жидкометаллическом охладителе // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2 (90). – С. 68–75.
54. Бондаренко Ю. А., Ечин А. Б., Колодяжный М. Ю., Нарский А. Р. Направленная кристаллизация, структура и механические свойства эвтектического сплава системы Nb–Si с естественно-композиционной структурой для лопаток ГТД // Электromеталлургия. – 2017. – № 8. – С. 2–9.
55. Бондаренко Ю. А., Колодяжный М. Ю., Ечин А. Б., Нарский А. Р. Направленная кристаллизация, структура и свойства естественного композита на основе эвтектики Nb–Si на рабочие температуры до 1350°C для лопаток ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2018. – № 1 (61). – С. 1–9. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 04.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-1-1.
56. Perepezko J. H., Sossaman T. A., Taylor M. Environmentally Resistant Mo–Si–B-Based Coating // Journal Thermal Spray Technology. – 2017. – V. 26. – P. 929–940.
57. Schneibel J. H., Tortorelli P. F., Ritchie R. O., Kruzic J. J. Optimization of Mo–Si–B intermetallic alloys // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2005. – V. 36. – P. 525–531.
58. Seong-Ho H., Kyosuke Y., Kouichi M., Rong T., Takashi G. Phase Formation and Solidification Routes Near Mo–Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> Eutectic Point in Mo–Si–B System // Materials Transactions. – 2010. – V. 51, N 9. – P. 1699–1704.
59. Kamata S. Y., Kanekon D., Lu Y., Sekido N., Maruyama K., Eggeler G., Yoshimi K. Ultrahigh-temperature tensile creep of TiC-reinforced Mo–Si–B-based alloy // Scientific Reports. – 2018. – N 8:10487. – P. 1–14.
60. Jain P., Kumar K. S. Tensile creep of Mo–Si–B alloys // Acta Materialia. – 2010. – N 58. – P. 2124–2142.
61. Uemura S., Yamamuro T., Kim J.W., Morizono Y., Tsurekawa S., Yoshimi K. Quantitative Evaluation of Microstructure in Mo–Si–B–TiC Alloy Produced by Melting and Tilt Casting Methods // Materials Transactions. – 2018. – V. 59, N 1. – P. 136–145.
62. Takata N., Sekido N., Takeyama M., Perepezko J. H. Crystallography of Bcc/T<sub>1</sub>/T<sub>2</sub> Three-Phase Microstructure in the Directionally Solidified Mo–Nb–Si–B Alloy. // Proceedings “Materials Research Society Symposium”. – 2015. – V. 1760.
63. Matsunoshita H., Sasai Y., Fujiwara K., Kishida K., Inui H. Plastic deformation of directionally solidified ingots of binary and some ternary MoSi<sub>2</sub>/Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> eutectic composites // Science and Technology of Advanced Materials. – 2016. – V. 17, N 1. – P. 517–529.
64. Jehanno P., Heilmaier M., Kestler H. Characterization of an industrially processed Mo-based silicide alloy // Intermetallics. – 2004. – V. 12. – P. 1005–1009.
65. Kamata S. Y., Kanekon D., Lu Y., Sekido N., Maruyama K., Eggeler G., Yoshimi K. Ultrahigh-temperature tensile creep of TiC-reinforced Mo–Si–B-based alloy // Scientific Reports. – 2018. – V. 8. – P. 1–14.

УДК 669.295: 536.212.2: 621.039.53

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ТИТАНОВЫХ $\alpha$ -СПЛАВОВ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

И. А. СЧАСТЛИВАЯ, В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, И. В. ТРЕТЬЯКОВ,  
А. Ю. АСКИНАЗИ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 11.09.2020

После доработки 29.10.2020

Принята к публикации 07.12.2020

Рассмотрены результаты исследований нового титанового сплава композиции Ti–Zr–Al–O с повышенной теплопроводностью для трубных систем энергосилового оборудования. Среди титановых сплавов современные  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавы занимают особое место в силу уникального сочетания своих механических свойств, коррозионной стойкости, малой плотности и высокой удельной прочности, что определяет эффективность их применения в различных отраслях промышленности. Анализ конструкционных материалов, применяемых для теплообменного оборудования АЭС, показал, что повышение эффективности и компактности трубных систем из титановых  $\alpha$ -сплавов сдерживается из-за их низкой теплопроводности, которая не превышает 8–9 Вт/(м·К) при температуре 20°C. Исключение составляет сплав марки BT1-0, область применения которого ограничена максимальной температурой эксплуатации не более 250°C.

*Ключевые слова:* титан, теплопроводность,  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавы титана

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-79-86

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Охотин А. С., Боровикова Р. П., Нечаева Т. В., Пушкарский А. С. Теплопроводность твердых тел: Справочник / Под ред. А. С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 321 с.
2. Логинов Ю. Н., Котов В. В. Проявления анизотропии в процессах деформации альфа-сплавов титана. – Екатеринбург, УГГУ – УПИ, 2009. – С. 136–187.
3. Титан высокой чистоты. Перспективы применения и получения / М. Л. Коцарь и др. // Титан. – 2009. – № 3. – С. 34–38.
4. Электронно-лучевая плавка титана, циркония и гафния / В. М. Ажажа, П. Н. Вьюгов, С. Д. Лавриненко и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2002. – № 6 (82). – С. 95–99.
5. Титановый сплав с повышенной прочностью и теплопроводностью для трубных систем теплообменного оборудования / А. С. Кудрявцев, Э. А. Карасев и др. // Титан. – 2003. – № 1. – С. 72–76.
6. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Анохин С. В. Получение титановых слитков из недробленых блоков губчатого титана методом электронно-лучевой плавки // Титан. – 2005. – № 2. – С. 23–25.
7. Клопотов А. А., Потекаев А. И., Козлов Э. В., Тюрин Ю. И., Арефьев К. П., Солоницина Н. О., Клопотов В. Д. Кристаллогеометрические и кристаллохимические закономерности образования бинарных и тройных соединений на основе титана и никеля. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2011. – 312 с.
8. Жуков В. А., Иванова Л. А., Разуваева И. Н. Термическая стабильность титановых псевдо- $\alpha$ -сплавов и методы ее оценки // МиТОМ. – 1981. – № 12. – С. 37–39.
9. Корнилов И. И. Титан: Источники, составы, свойства, металлохимия и применение. – М.: Наука, 1975. – 308 с.
10. Бокий Г. Б. Введение в кристаллохимию. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1954. – 491 с.
11. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. Титановые сплавы: состав, структура, свойства: справочник. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 519 с.
12. Aitchison L., Honeycombe R. W. K., Johnson R. H. Thermal cycling of zirconium // Proc. Berkeley Conf. on Properties of Reactor Materials and effect of Radiation Damage, Berkeley, Calif., Butterworths Publications, London, 1962. – P. 430.

УДК 621.74: 621.315.3

#### **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ МИКРОПРОВОДОВ В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ С ЖИЛОЙ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СЕРЕБРА И НИКЕЛЯ**

О. В. ВАСИЛЬЕВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Е. Л. ГЮЛИХАНДАНОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, М. В. ХРОМЕНКОВ<sup>1</sup>

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

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

Поступила в редакцию 02.03.2020

После доработки 03.11.2020

Принята к публикации 11.11.2020

Приведены результаты исследования особенностей процесса литья микропроводов в стеклянной изоляции из сплавов на основе серебра, имеющего температурный коэффициент сопротивления, близкий к нулю, и на основе никеля, имеющего высокое значение термоэлектродвижущей силы (термоЭДС).

*Ключевые слова:* литой микропровод в стеклянной изоляции, температурный коэффициент сопротивления (ТКС), термоЭДС, погонное сопротивление

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-87-94

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Литой микропровод и его применение в науке и технике // Под ред. Д. В. Гуцу. – Кишинев: Штиинца, 1988. – 424 с.
2. Горынин И. В. Фармаковский Б. В. Длинномерные литые микропровода в стеклянной изоляции с жилкой из интерметаллических соединений // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 4 (84). – С. 58–61.
3. Грущанская Н. А., Данилюк И. Я., Дидковская Л. А., Щербинская А. А. Состояние метрологического обеспечения элементов и приборов сопротивления // Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции «Приборы сопротивления и резистивная элементная база электроизмерительных приборов», Кишинев, 1992. – С. 17–21.
4. Крутько З. В., Анищенко Т. И. Структура и свойства литого микропровода // Вопросы формирования метастабильной структуры сплавов. Днепропетровск, 1984. – С. 98–102.
5. Литой микропровод и его свойства / Бадинтер Е. Я. и др. – Кишинев: Штиинца, 1973. – 317 с.
6. Масайло Д. В., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А., Мазеева А. К. Литые микропровода в стеклянной изоляции из сплавов на основе меди с минимальным температурным коэффициентом сопротивления // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 3(75). – С. 81–87.
7. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2017.
8. Масайло Д. В., Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Высокопрочные литые микропровода для армирования конструкционных композитов // Металлообработка. – 2012. – № 4 – С. 23–27.
9. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Под ред. Ж. И. Алферова и др. – СПб.: Изд-во И. П. Пермяков С.А., 2015. – С. 137–163.

УДК: 621.921.34: 621.762.5

#### **СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ СВЯЗКИ ДЛЯ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА, ПОЛУЧЕННОЙ ПРОПИТКОЙ РАСПЛАВОМ ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОД**

П. П. ШАРИН<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, М. П. АКИМОВА<sup>1</sup>, С. П. ЯКОВЛЕВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук,  
В. И. ПОПОВ<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН при ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1. E-mail: [iftps01@mail.ru](mailto:iftps01@mail.ru)

<sup>2</sup>Северо-Восточный Федеральный университет им. М. К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58

Поступила в редакцию 11.08.2020

После доработки 23.09.2020

Принята к публикации 08.10.2020

Проведено экспериментальное моделирование технологии получения матрицы путем спекания алмазосодержащего брикета с наполнителем из порошка монокарбида вольфрама с пропиткой расплавом эвтектики Fe–C в вакууме. Методами растровой электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализов, спектроскопии комбинационного рассеяния

исследованы микроструктура, элементный и фазовый составы продуктов, образующихся в процессе спекания алмазосодержащей матрицы с пропиткой расплавом эвтектики Fe–C в вакууме. Установлено, что матрица состоит из фаз карбида вольфрама с относительным содержанием 61,0%, карбида железа – 17,0%,  $\alpha$ -Fe – 16,5% и графита – 5,5%. Эвтектический сплав Fe–C, выполняющий функцию связующего компонента матрицы, состоит из ферритно-перлитной металлической основы с включениями графита. Показано, что на межфазной границе алмаз – матрица графитные включения формируются не сплошным слоем, а прерывистыми участками по периметру алмазных зерен. Микротвердость матрицы на основе WC с пропиткой расплавом Fe–C составляет ~11 ГПа, что более чем в 3 раза превышает микротвердость твердосплавной матрицы WC–Co–Cu, полученной спеканием с пропиткой медью.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии изготовления износостойких матриц алмазных инструментов широкого класса, применяемых при обработке материалов с высоким уровнем твердости.

*Ключевые слова:* алмаз, матрица, железоуглеродистые сплавы, эвтектическое плавление, микроструктура, графитизация, алмазоудержание

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-95-108

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бакуль В. Н., Никитин Ю. И., Верник Е. Б., Селех В. Ф. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
2. Новиков Н. В., Бондаренко Н. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Влияние диффузии и химических реакций на структуру и свойства буровых вставок. 1. Кинетическое описание систем  $C_{\text{алмаз}}\text{--}VK6$  и  $C_{\text{алмаз}}\text{--}(VK6\text{--}CrB_2\text{--}W_2B_5)$  // Физическая мезомеханика. – 2005. – № 2 (8). – С. 99–106.
3. Новиков Н. В., Бондаренко Н. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Влияние диффузии и химических реакций на структуру и свойства буровых вставок. 2. Результаты аттестации структурного состояния сверхтвердых материалов состава алмаз–твердый сплав  $VK6$  // Физическая мезомеханика. – 2006. – № 2 (9). – С. 107–116.
4. Витязь П. А., Жорник В. И., Кукареко В. А. Исследование структурно-фазового состояния и свойств спеченных сплавов, модернизированных наноразмерными алмазосодержащими добавками // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2011. – № 3. – С. 5–17.
5. Artini C., Muolo M. L., Passerone A. Diamond–metal interfaces in cutting tools: a review // Journal of Materials Science. – 2012. – V. 47 (7). – P. 3252–3264.
6. Семенов А. П., Поздняков В. В., Крапошина Л. Б. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами и сплавами. – М.: Наука, 1974. – 110 с.
7. Семенов А. П., Поздняков В. В., Лапшина В. А. Контактное эвтектическое плавление алмаза и графита с металлами триады железа // Доклады Академии наук СССР. – 1968. – № 6 (181). – С. 1368–1371.
8. Ножкина А. В., Бугаков В. И., Лаптев А. И. Прочность алмазных материалов после нагрева под давлением // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – 2018. – № 21. – С. 151–160.
9. Гуревич Ю. Г. К теории эвтектических сплавов и эвтектического (контактного) плавления // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2010. – № 8. – С. 8–10.
10. Залкин В. М., Крапошин В. С. Строение железоуглеродистых расплавов. О стабильности цементита в расплавах // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2010. – № 1. – С. 15–18.
11. Pant U., Meena H., Shivagan D.D. Development and realization of iron-carbon eutectic fixed point at NPLI // MAPAN-Journal Metrology Society of India. – 2018. – V. 33. – P. 201–208.
12. Kolesnichenko G. A., Naidich Yu. V., Petrishev V. Ya., Sergeenkova V. M. Kinetics of contact melting in iron-carbon systems // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1996. – V. 35 (9–10). – P. 529–532.
13. Чуманов И. В., Аникеев А. Н. Пропитка подложек из монокарбида вольфрама низкоуглеродистой сталью контактными и бесконтактными методами // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2018. – № 5 (61). – С. 407–412.

14. Аникеев А. Н., Чуманов В. И., Чуманов И. В. Изучение смачиваемости WC расплавом железа различными методами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2013. – № 2 (13). – С. 44–46.
15. Тихомиров С. В., Кимстач Т. Б. Спектроскопия комбинационного рассеяния – перспективный метод исследования углеродных наноматериалов // Аналитика. – 2011. – № 1. – С. 28–32.
16. Букалов С. С., Михалицын Л. А., Зубавичус Я. В., Лейтес Л. А., Новиков Ю. Н. Исследование строения графитов и некоторых других sp<sup>2</sup>-углеродных материалов методами микро-спектрометрии КР и рентгеновской дифрактометрии // Российский химический журнал. – 2006. – Т. 50, № 1. – С. 83–91.
17. Sidorenko D. A., Zaitsev A. A., Kirichenko A. N., Levashov V. V., Kurbatkina V. V., Loginov P. A., Rupasov S. I., Andreev V. A. Interaction of diamond grains with nanosized alloying agents in metal-matrix composites as studied by Raman spectroscopy // Diamond and Related Materials. – 2013. – V. 38. – P. 59–62. Doi: 10.1016/j.diamond.2013.05.007.
18. Ni Z., Wang Y., Yu T., Shen Z. Raman spectroscopy and imaging of graphene // Nano Research. – 2008. – V.1 (4). – P. 273–291. Doi: 10.1007/s12274-008-8036-1.
19. Ferrari A. C., Meyer J. C., Scardaci V., Casiraghi C., Lazzeri M., Mauri F., Piscanec S., Jiang D., Novoselov K.S., Roth S., Geim A. K. Raman spectrum of graphene and graphene layers // Physical Review Letters. – 2006. – V. 97. – P. 187401. Doi: 10.1103/PhysRevLett.97.187401.
20. Yoon D., Moon H., Son Y.-W., Choi J.S., Park B.H., Cha Y.H., Kim Y.D., Cheong H. Interference effect on Raman spectrum of graphene on SiO<sub>2</sub>/Si // Physical Review B. – 2009. – V. 80. – P.125422. Doi: 10.1103/PhysRevB.80.125422
21. Ножкина А. В. Влияние металлов на фазовое превращение алмаза в графит // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 3. – С. 11–15.
22. Сидоренко Д. А., Левашов Е. А., Логинов П. А., Швындина Н. В., Скрылева Е. А., Ускова И. Е. О механизме самопроизвольного плакирования алмаза карбидом вольфрама в процессе спекания инструмента с наномодифицированной металлической связкой Cu–Fe–Co–Ni // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 5. – С.53–63. Doi: 10.17073/0021-3438-2015-5-53-63.

УДК 621.793.7

## СПЛАВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МИШЕНИ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Р. Ю. БЫСТРОВ, А. Н. БЕЛЯКОВ, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, И. С. ПРУДНИКОВ,  
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 15.09.2020

После доработки 30.09.2020

Принята к публикации 06.10.2020

Приведены результаты исследований по разработке прецизионного сплава системы Al–Mg–Ce–La–Y для получения тонких пленок с использованием метода магнетронного напыления. Тонкие пленки применяются для создания на их основе элементов электронной техники.

*Ключевые слова:* лантаноиды, мишень, магнетронное напыление, плазменная панель, катод

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-109-112

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kelly P. J., Arnell R. D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications // Vacuum. – 2000. – N 56. – P. 159–172.
2. Ешметьева Е. Н., Шолкина М. Н., Фармаковская А. Я., Быстров Р. Ю. Магнетронное напыление функционально-градиентных износостойких наноструктурированных покрытий // // Материалы II международной заочной конференции «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве», Орск. – Изд-во Орского гуманитарно-технологического института (филиала ОГУ), 2013. – 187 с.

3. Кирюханцев-Корнеев Ф. В., Швейко А. Н., Левашов Е. А. Штанский Д. В. Перспективные наноструктурированные покрытия для машиностроения // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 3(83). – С. 122–132.

4. Грачев В. И., Марголин В. И., Жабров В. А., Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск, 2014. – 387. с.

5. Суздалев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – СПб.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. – 445 с.

6. Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017.

7. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Васильева О. В., Васильев А. Ф., Виноградова Т. С., Ешметьева Е. Н., Самоделкин Е. А., Кузнецов П. А. Биотехнологические исследования, проводимые в научном нанотехнологическом центре ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3(87). – С. 82–97.

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

УДК 621.793.7: 669.777'3'855

### **РАЗРАБОТКА СПЛАВА В СИСТЕМЕ ТЕЛЛУР – МЕДЬ – ЦЕРИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ФОТОКАТОДОВ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

А. Ф. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, Е. Л. ГЮЛИХАНДАНОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, Е. А. САМОДЕЛКИН<sup>1</sup>,  
Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук

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

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

Поступила в редакцию 20.10.2020

После доработки 8.11.2020

Принята к публикации 11.11.2020

Приведены результаты исследований по разработке сплава в системе теллур – медь – церий, применяемого для изготовления функциональных покрытий с использованием технологий сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления. Покрытия из указанного сплава используются для изготовления фотокатодов фотоэлектронных приборов, работающих в УФ-области спектра.

*Ключевые слова:* механосинтез, дезинтеграторная обработка, функциональное покрытие, фотокатод, фотоэлектронный прибор

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-113-116

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Beguchev V. P., Shefova I. A., Musatov A. L. Optical and photo emissive properties of multi-alkali photocathode's // J. Phus. D.: Appl. Phus. – 1993. – V. 26. – P. 1499.

2. А. с. СССР № 569641. Сплав на основе теллура / Т. А. Лаврут и др., 1977.

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

4. Геращенко Д. А. Результаты исследования адгезионной прочности композиционных покрытий системы металл–неметалл на стандартном основании, полученных методом «холодного» газодинамического напыления // Сб. тезисов VI конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий», ФГУП ЦНИИчермет им. И. П. Бардина, 25–26 февраля 2015 г. – С. 14–18.

5. Геращенко Д. А., Песков Т. В., Беляев И. В. Исследование и разработка технологии нанесения защитных антикоррозионных покрытий методом «холодного» газодинамического напыления

на поверхность редкоземельных постоянных магнитов // Тез. докл. VII конференции молодых ученых и специалистов ЦНИИ КМ «Прометей». – 2008. – С. 3.

6. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Машек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 2(77). – С. 87–96.

7. Марголин В. И., Жабров В. А., Лукьянов Г. Н., Тупик В. А. Введение в нанотехнологию: Учебник. – СПб.: Лань, 2012. – 464 с.

УДК 621.74: 621.315.3

## РАЗРАБОТКА СОСТАВА СТЕКОЛ ДЛЯ ЛИТЬЯ МИКРОПРОВОДОВ В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ С ЖИЛОЙ ИЗ ИНДИЯ И ОЛОВА

О. В. ВАСИЛЬЕВА, канд. техн. наук, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук, М. В. ХРОМЕНКОВ

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

Поступила в редакцию 9.09.2020

После доработки 05.11.2020

Принята к публикации 06.11.2020

Приведены результаты исследований и разработки стекол для литья микропроводов в стеклянной изоляции системы  $PbO - SiO_2 - Na_2O - InO_2 - SnO_2$ . Определен оптимальный состав композиции, позволяющий наладить устойчивый процесс литья микропроводов из индия и олова длиной более 1000 м. Показано, что из таких микропроводов возможно изготовление малогазных плавких предохранителей с высокой плотностью тока плавления.

*Ключевые слова:* литой микропровод в стеклянной изоляции, малогазные плавкие предохранители, плотность тока плавления

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-117-120

### ЛИТЕРАТУРА

1. Глезер А. М., Пермякова И. Е. Нанокристаллы, закаленные из расплава. – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.

2. Горынин И. В., Фармаковский Б. В. Длинномерные литые микропровода в стеклянной изоляции с жилой из интерметаллических соединений // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 4(84). – С. 58–61.

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

4. Литой микропровод и его свойства / Бадинтер Е. Я. и др. – Кишинев: Штиинца, 1973. – 317 с.

5. Третьяков Ю. Д. Микро- и наноструктурированные материалы. Репортаж из «пятого измерения». – М.: ООО Премиум, 2008. – 181 с.

6. Обидина С. П., Денисова М. Ф. Исследование возможности применения некоторых стекол для литых микропроводов. Серия III. Детали и компоненты аппаратуры. – 1984. – Вып. 20. – С. 48–62.

7. Кравцов Н. А., Фармаковский Б. В. Получение сверхтонких литых микропроводов в стеклянной изоляции для создания на их основе метаматериалов // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 3(99). – С. 67–75.

8. Чудин Д.А., Бобылева Т.М., Шмырева М.Ф., Сиваков П.М. Исследование стабильности и термостойкости микропроводов. // Электронная техника. Серия 9. Радиоконпоненты. – 1987. – Вып. 1. – С. 66–77.

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

UDC 621.762.224: 621.793.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ СИНТЕЗЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ НОСИТЕЛЕ

Н. В. ЯКОВЛЕВА, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук, А. М. МАКАРОВ

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

Поступила в редакцию 03.11.2020

После доработки 16.11.2020

Принята к публикации 23.11.2020

Приведены результаты исследования каталитически активной системы Ni–Al–Al(OH)<sub>3</sub>–Ca(OH)<sub>2</sub>–Mg(OH)<sub>2</sub> для эффективного получения синтез-газа. Разработана технология получения объемно-пористых функциональных покрытий с использованием метода сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления. Показаны преимущества этого метода и его возможности с точки зрения создания носителей для катализаторов получения синтез-газа.

**Ключевые слова:** катализатор, синтез-газ, реформинг, энергия активации, гидроксиды, фазовые превращения, дифракционный спектр, удельная поверхность

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-121-131

### ЛИТЕРАТУРА

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

2. Wilhelm D. J., Simbeck D. J., Karp A. D., Dickenson R. L. Syngas production for gas-to-liquids applications: technologies, issues and outlook // Fuel Processing Technology. – 2001. – V. 71, Iss. 1–3. – P. 139–148.

3. Enger B. C., Lodeng R., Holmen A. A review of catalytic partial oxidation of methane to synthesis gas with emphasis on reaction mechanisms over transition metal catalysts // Appl. Catal. A. – 2008. – V. 346, Iss. 1–2. – P. 1–27.

4. Куранов А. Л., Корабельников А. В., Михайлов А. М. Применение конверсии углеводородного топлива в силовых установках летательных аппаратов // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, вып. 2. – С. 90–94.

5. Виноградова Т. С., Гюлиханов Е. Л., Улин И. В., Фармаковский Б. В., Яковлева Н. В. Каталитически активные порошковые композиции для систем снижения токсичности вредных выбросов в атмосферу // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 3(99). – С. 51–60.

6. Пахомов Н. А. Научные основы приготовления катализаторов. – Новосибирск, 2010. – С. 281.

7. Габелков С. В., Тарасов Р. В., Полтавцев Н. С. Эволюция фазового состава при термическом разложении гидроксида магния // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – № 2 (97). – С. 72–76.

УДК 666.3-121: 621.762.5

## ВЛИЯНИЕ НАНОВОЛОКОН Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> НА УПЛОТНЕНИЕ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ZrO<sub>2</sub>, ПОЛУЧЕННЫХ СВОБОДНЫМ ВАКУУМНЫМ СПЕКАНИЕМ

А. А. ЛЕОНОВ<sup>1,3</sup>, Е. В. АБДУЛЬМЕНОВА<sup>1,2</sup>, М. П. КАЛАШНИКОВ<sup>1,2</sup>, ЛИ ЦЗИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: [laa-91@yandex.ru](mailto:laa-91@yandex.ru)

<sup>2</sup> ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», 634055, Томск, пр. Академический, 2/4

<sup>3</sup> ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН», 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

Поступила в редакцию 05.11.2020

Исследовано влияние относительного содержания нановолокон  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на уплотнение, фазовый состав и физико-механические свойства композитов на основе  $\text{ZrO}_2$ , полученных свободным вакуумным спеканием. Обнаружено, что в процессе изготовления композитов нановолокна спекаются в зерна  $\text{Al}_2\text{O}_3$  сложной вытянутой формы, которые образуют твердую каркасно-армирующую структуру. В композитах с 5 и 10 мас. % нановолокон наблюдается снижение относительной плотности вплоть до 95%. Показано, что во всех спеченных образцах в качестве основной фазы выступает тетрагональная модификация  $\text{ZrO}_2$ , а различное содержание нановолокон в композитах сказывается на количестве кубической и моноклинной модификаций  $\text{ZrO}_2$ . Установлено, что добавки 5 и 10 мас. % нановолокон  $\text{Al}_2\text{O}_3$  приводят к повышению микротвердости композита на 11% и трещиностойкости на 46%.

**Ключевые слова:** композит, керамика, диоксид циркония, нановолокна  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , микроструктура, фазовый состав, физико-механические свойства

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-132-143

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жигачев А. О., Головин Ю. И., Умрихин А. В., Коренков В. В., Тюрин А. И., Родаев В. В., Дьячек Т. А. Керамические материалы на основе диоксида циркония. – М.: Техносфера, 2018. – 358 с.
2. Подзорова Л. И., Ильичева А. А., Пенькова О. И., Аладьев Н. А., Баикин А. С., Коновалов А. А., Мороков Е. С. Дисперсное упрочнение композитов системы оксида алюминия и тетрагонального диоксида циркония, стабилизированного катионами церия // Стекло и керамика. – 2017. – № 6. – С. 16–20.
3. Seo J., Oh D., Kim D., Kim K., Kwon J. Enhanced mechanical properties of  $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  dental ceramic composites by altering  $\text{Al}_2\text{O}_3$  form // Dental Materials. – 2020. – V. 36. – P. 117–125.
4. Hussainova I., Drozdova M., Pérez-Coll D., Rubio-Marcos F., Jasiuk I., Soares J. A. N. T., Rodríguez M.A. Electroconductive composite of zirconia and hybrid graphene/alumina nanofibers // Journal of the European Ceramic Society. – 2017. – V. 37. – P. 3713–3719.
5. Abdullah M., Ahmad J., Mehmood M. Effect of sintering temperature on properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  whisker reinforced 3 mol%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  stabilized tetragonal  $\text{ZrO}_2$  (TZ-3Y) nanocomposites // Composites Part B: Engineering. – 2012. – V. 43. – P. 1785–1790.
6. Leonov A. A., Abdulmenova E. V. Alumina-based composites reinforced with single-walled carbon nanotubes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 511. – P. 012001.
7. Leonov A. Effect of alumina nanofibers content on the microstructure and properties of ATZ composites fabricated by spark plasma sintering // Materials Today: Proceedings. – 2019. – V. 11. – P. 66–71.
8. Anstis G. R., Chantikul P., Lawn B. N., Marshall D. B. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness. I: direct crack measurements // Journal of the American Ceramic Society. – 1981. – V. 64. – P. 533–538.
9. Леонов А. А., Пайгин В. Д., Толкачёв О. С., Алишин Т. Р. Структурно-фазовые превращения нановолокон оксида алюминия // Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения: сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции, Томск, 26–30 ноября 2018. – Томск: ТПУ. – 2018. – С. 64–66.
10. Савченко Н. Л., Королёв П. В., Мельников А. Г., Саблина Т. Ю., Кульков С. Н. Структура и механические характеристики спеченных композитов на основе  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2008. – Т. 5, № 1. – С. 94–99.
11. Подзорова Л. И., Шворнева Л. И., Ильичева А. А., Аладьев Н. А., Пенькова О. И. Микроструктура и фазовый состав образцов системы  $\text{ZrO}_2\text{-CeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  модифицированных  $\text{MgO}$  и  $\text{Y}_2\text{O}_3$  // Неорганические материалы. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 389–394.
12. Подзорова Л. И., Ильичева А. А., Пенькова О. И., Аладьев Н. А., Волченкова В. А., Шворнева Л. И. Модифицированные композиты системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-(Ce-TZP)}$  как материалы медицинского назначения // Перспективные материалы. – 2016. – № 1. – С. 32–39.

13. Azar M., Palmero P., Lombardi M., Garnier V., Montanaro L., Fantozzi G., Chevalier J. Effect of initial particle packing on the sintering of nanostructured transition alumina // Journal of the European Ceramic Society. – 2008. – V. 28. – P. 1121–1128.

14. Перевислов С. Н., Чупов В. Д., Томкович М. В. Влияние активирующих добавок алюмоитриевого граната и магнезиальной шпинели на уплотняемость и механические свойства SiC-керамики // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 1 (65). – С. 123–129.

15. Yuan L., Zhang P., Zuo F., Luo R., Guo Z., Plucknett K., Jiang B., Nie G., Meng F., Valcárcel-Juárez V., Maître A., Lin H. Comparison of sintering behavior and reinforcing mechanisms between 3Y-TZP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(w) and 12Ce-TZP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(w) composites: Combined effects of lanthanide stabilizer and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> whisker length // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – V. 41. – P. 706–718.

16. Зиганьшин И. Р., Порозова С. Е., Трапезников Ю. Ф. Получение пористого материала на основе нанодисперсного порошка ZrO<sub>2</sub>–15 мол.%CeO<sub>2</sub> // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 4 (64). – С. 79–84.

17. Порозова С. Е., Кульметьева В. Б., Зиганьшин И. Р., Торсунов М. Ф. Сравнительная характеристика результатов определения содержания моноклинной фазы в диоксиде циркония // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 1 (61). – С. 46–52.

18. Оболкина Т. О., Гольдберг М. А., Смирнов В. В., Смирнов С. В., Титов Д. Д., Коновалов А. А., Кудрявцев Е. А., Антонова О. С., Баринов С. М., Комлев В. С. Интенсификация спекания и упрочнение керамических материалов ZrO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> введением оксида Fe // Неорганические материалы. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 192–199.

19. Леонов А. А., Двилис Э. С., Хасанов О. Л., Пайгин В. Д., Калашников М. П., Петюкевич М. С., Панина А. А. Керамический композит на основе диоксида циркония, армированный одностенными углеродными нанотрубками // Российские нанотехнологии. – 2019. – Т. 14, № 3–4. – С. 32–38.

20. Леонов А. А., Абдульменова Е. В., Калашников М. П. Структура, фазовый состав и физико-механические свойства композитов на основе ZrO<sub>2</sub> и многостенных углеродных нанотрубок // Перспективные материалы. – 2020. – № 10. – С. 56–68.

21. Leonov A. A., Ivanov Yu. F., Kalashnikov M. P., Abdulmenova E. V., Paygin V. D., Teresov A. D. Effect of electron beam irradiation on structural phase transformations of zirconia-based composite reinforced by alumina nanofibers and carbon nanotubes // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1393. – P. 012106.

22. Ivanov Yu., Shugurov V., Kalashnikov M., Leonov A., Teresov A., Petukevich M., Polissadova V. Multilevel hierarchical structure formed in the film (Ti)/substrate (SiC-ceramics) system under irradiation by an intense pulsed electron beam // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 2051. – P. 020110.

23. Иванов В. В., Кайгородов А. С., Хрустов В. Р., Паранин С. Н., Спиринов А. В. Прочная керамика на основе оксида алюминия, получаемая с использованием магнитно-импульсного прессования композитных нанопорошков // Российские нанотехнологии. – 2006. – Т. 1, № 1–2. – С. 201–207.

24. Leonov A. A., Khasanov A. O., Danchenko V. A., Khasanov O. L. Spark plasma sintering of ceramic matrix composite based on alumina, reinforced by carbon nanotubes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 286. – P. 012034.

25. Кульметьева В. Б., Каченюк М. Н., Поносова А. А. Получение композиционного керамического материала на основе ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, модифицированного многослойным графеном // Материаловедение. – 2017. – № 2. – С. 41–48.

26. Подзорова Л. И., Ильичёва А. А., Пенькова О. И., Антонова О. С., Баикин А. С., Коновалов А. А. Керамические композиты на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с высокой устойчивостью к хрупкому разрушению // Неорганические материалы. – 2019. – Т. 55, № 6. – С. 671–677.

УДК 678.067.2

## ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА БАЛЛИСТИЧЕСКИ СТОЙКИХ ОРГАНОПЛАСТИКОВ

Г. Ф. ЖЕЛЕЗИНА, канд. техн. наук, Н. А. СОЛОВЬЕВА, П. М. ШУЛЬДЕШОВА, А. Ч. КАН

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

Поступила в редакцию 27.08.2020

После доработки 24.09.2020

Принята к публикации 25.09.2020

Баллистически стойкие органические пластики, состоящие из слоев арамидной ткани, адгезионно соединенных пленкой связующего, проявляют более высокую склонность к поглощению влаги, воды и технических жидкостей по сравнению с конструктивными органическими пластиками монолитной структуры. Поглощение жидкостей носит анизотропный характер и проявляется наиболее интенсивно через торцы образцов. Обеспечить стабильность свойств баллистически стойких материалов при воздействии факторов внешней среды (повышенной влажности, воды, топлива, масла, естественных климатических условий) можно путем использования защитных лакокрасочных покрытий.

**Ключевые слова:** органический пластик, влагопоглощение, климатическое воздействие, фактор внешней среды, защитные лакокрасочные покрытия

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-144-157

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бойцов Б. В., Коротков С. С., Кривонос В. В., Тарасов Ю. М. Некоторые вопросы технологического проектирования конструкций из полимерных композиционных материалов, работающих в экстремальных условиях. – М.: Академия проблем качества, 2019. – 112 с.
2. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. – 2016. – № 2 (14). – С. 16–21.
3. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 7–17.
4. Кривонос В. В., Тарасов Ю. М. Инновационные композитные материалы и технологии в авиастроении. – Сб. «Композиты СНГ: Цифровизация и стоимостный анализ жизненного цикла изделий», Ивент группа Musthavevents. – М., 2018. – С. 23–26.
5. Железина Г. Ф., Войнов С. И., Каримбаев Т. Д., Чернышев А. А. Арамидные органические пластики для корпусов вентиляторов авиационных двигателей // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 32 (90). – С. 153–165.
6. Железина Г. Ф., Тихонов И. В., Черных Т. Е., Бова В. Г., Войнов С. И. Арамидные волокна третьего поколения Русар НТ для армирования органических текстолитов авиационного назначения // Пластические массы. – 2019. – № 3–4. – С. 43–46.
7. Колобков А. С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2020. – № 6–7. ст.05 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 04.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
8. Железина Г. Ф., Соловьева Н. А., Орлова Л. Г., Войнов С. И. Баллистически стойкие арамидные слоисто-тканые композиты для авиационных конструкций // Все материалы. Энциклопедический справочник: Композиционные материалы. – 2012. – № 12. – С. 23–26.
9. 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. ст.06 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 04.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
10. Ерасов В. С., Крылов В. Д., Панин С. В., Гончаров А. А. Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 3. – С. 60–64.
11. Железина Г. Ф., Войнов С. И., Соловьева Н. А., Кулагина Г. С. Арамидные органические текстолиты для ударостойких авиационных конструкций // Журнал прикладной химии. – 2019. – Т. 92. – Вып. 3.
12. Валуева М. И. Современные материалы и технологии для получения бронезащитных изделий // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2 (90). – С. 197–207.
13. Roberts G. D., Revilock D. M., Binienda W. K., Nie W. Z., Mackenzie S. B., Todd K. B. Impact Testing and Analysis of Composites for Aircraft Engine Fan Cases // J. Aerosp. Eng. – 2002. – N 15. – P. 104–110.

14. Li C.-S., Zhan M.-S., Huag X.-C., Zhou H., Li Y. Hydrothermal aging mechanisms of aramid fibers via synchrotron small-angle X-ray scattering and dynamic thermal mechanical analysis // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2013. – V. 128, № 2. – P. 1291–1296.
15. Железина Г. Ф., Бова В. Г., Войнов С. И., Кан А. Ч. Перспективы использования гибридных тканей на основе углеродных и арамидных волокон в качестве армирующего наполнителя полимерных композиционных материалов // *Вопросы материаловедения*. – 2019. – № 2 (98). – С. 86–95.
16. Bourke P. Lightweight Ballistic impact on composite armor // *Ballistic impact on composite armor*. – 2007. – P. 11.
17. Шульдешова П. М., Железина Г. Ф. Арамидный слоисто-тканый материал для защиты от баллистических и ударных воздействий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2014. – № 9. – Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-6-6.
18. Тимошков П. Н., Хрульков А. В. Современные технологии переработки полимерных композиционных материалов, получаемых методом пропитки расплавным связующим // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2014. – № 8. – ст.04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 03.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-4-4.
19. Железина Г. Ф. Особенности разрушения органопластиков при ударных воздействиях // *Авиационные материалы и технологии*, 2012. №S. С. 272–277.
20. Каблов Е. Н., Старцев В. О., Иноземцев А. А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 2. – С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-58.
21. Гладких А. В., Курс И. С., Курс М. Г. Анализ данных натурных климатических испытаний, совмещенных с приложением эксплуатационных факторов, неметаллических материалов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2018. – №10. – Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 3.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82.
22. Startsev O.V., Krotov A.S., Golub P.D. Effect of climatic and radiation ageing on properties of glass fibre reinforced epoxy laminates // *Polymers and Polymer Composites*. – 1998. – Vol. 6. – № 7. – P. 481–488.
23. Derombise G., Vouyovitch Van Schoors L., Davies P. Degradation of aramid fibers under alkaline and neutral conditions: Relations between the chemical characteristics and mechanical properties // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2010. – V. 116, № 5. – P. 888–898.
24. Derombise G., Chailleux E., Forest B., Riou L., Lacotte N., Vouyovitch Van Schoors L., Davies P. Long-term mechanical behavior of aramid fibers in seawater // *Polymer Engineering & Science*. – 2011. – V. 51. – № 7. – P. 1366–1375.
25. Tikhonov I. V., Tokarev A. V., Shorin S. V., Shchetinin V. M., Chernykh T. E., Bova V. G. Russian aramid fibres: past–present–future // *Fibre Chemistry*. – 2013. – № 5. – P. 1–8.
26. Гайданский А. И., Тарасов Ю. М., Кривонос В. В., Бойцов Б. В. Комплекс исследований для обеспечения разработки и изготовления требуемого качества конструкции консоли крыла из композиционных материалов для перспективных гражданских самолетов // *Научные труды Академии проблем качества, Минобрнауки РФ*. – 2016. – Спецвыпуск. – С. 378–385.
27. Старцев В. О., Махоньков А. Ю., Котова Е. А. Механические свойства и влагостойкость ПКМ с повреждениями // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № S1. – С. 49–55. DOI 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-49-55.
28. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. – 2018. – №2. – С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
29. Каблов Е. Н., Старцев О. В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 4 (37). – С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
30. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов*. – 2010. – № 11. – С. 19–27.

**ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ АНТИФРИКЦИОННЫХ  
УГЛЕПЛАСТИКОВ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИРАБОТОЧНОГО ПОКРЫТИЯ**

И. В. ЛИШЕВИЧ, канд. техн. наук, А. В. АНИСИМОВ, д-р техн. наук,  
А. С. САВЁЛОВ, канд. техн. наук, А. С. САРГСЯН, канд. техн. наук, М. Ю. СОБОЛЕВ

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

Поступила в редакцию 9.09.2020

После доработки 16.09.2020

Принята к публикации 1.10.2020

Исследовано влияние шероховатости поверхности трения антифрикционных углепластиков, применяемых в узлах трения скольжения при смазке водой, на триботехнические характеристики в процессе приработки. Экспериментально обоснован диапазон оптимальной (по триботехнической эффективности) шероховатости поверхности, формируемой при механической лезвийной обработке углепластиков. Представлены результаты серии триботехнических испытаний по различным методикам при различных условиях (контактное давление, скорость скольжения, материал контртел). Установлена связь исходной шероховатости и эффективности приработочного покрытия на основе порошка политетрафторэтилена марки ФОРУМ®.

*Ключевые слова:* антифрикционные углепластики, трение и износ, скольжение, приработка, шероховатость

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-158-169

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Бахарева В. Е., Николаев Г. И., Анисимов А. В. Антифрикционные неметаллические материалы для узлов трения скольжения // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 1 (65). – С. 75–88.
2. Бахарева В. Е., Анисимов А. В., Лишевич И. В. Антифрикционные углепластики в узлах трения центробежных насосов // Насосы. Турбины. Системы. – 2011. – № 1. – С. 47–52.
3. Лишевич И. В. Создание антифрикционных теплостойких углепластиков для высокоскоростных подшипников насосов и паровых турбин // Автореф. дис. ... канд. техн. наук – СПб.: ФГУП ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей», 2015.
4. Горынин И. В., Анисимов А. В., Бахарева В. Е. Антифрикционные углепластики в подшипниках скольжения судовых механизмов // Судостроение. – 2014. – № 1 (812). – С. 49–57.
5. Белецкий Е. Н., Сойту Н. Ю., Петров В. М. Особенности процесса резания композиционных углепластиков лезвийным инструментом без охлаждения и с модифицированными СОТС // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – № 3(41). – С. 98–105.
6. Иванов О. А. Повышение эффективности лезвийной обработки композиционных углепластиков на основе учета их физико-механических характеристик: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб. ин-т машиностроения. – Санкт-Петербург, 2006. – 22 с.
7. Гаркунов Д. Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1999. – 315 с.
8. Комбалов В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М.: Наука, 1974. – 112 с.
9. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
10. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
11. Фторопластовые защитные покрытия. <http://www.plastpolymer.org/pokr.htm> Дата обращение – 10.04.2020.
12. Бузник В. М., Цветников А. К., Шикун Б. Ю., Полькин В. В. Размеры и форма частиц ультрадисперсного политетрафторэтилена, полученного термогазодинамическим способом. Перспективные материалы. – 2002. – № 2. – С. 89–72.

13. Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Тихонов В. П., Французова С. Б. Влияние структуры и поверхностного пластического деформирования контртел на триботехнические характеристики и износостойкость материалов в парах трения углепластик ФУТ–сталь // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 2 (46). – С. 62–69.

14. Курбаткин И. И., Самохвалов Г. В., Муравьева Т. И., Мезрин А. М. Морфология контактной поверхности и трибологические характеристики углепластиков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 4(3). – С. 788–793.

15. Абозин И. Ю., Анисимов А. В., Бахарева В. Е., Гинзбург Б. М., Точильников Д. Г. Влияние анизотропии, трибомодификаторов и материала контртела на триботехнические свойства антифрикционных углепластиков // Вопросы материаловедения. – 2003. – № 3 (35). – С. 7–15.

16. Крагельский И. В. Трение и износ. – М.: Машгиз, 1962. – 383 с. (Изд. 1-е); М.: Машиностроение, 1968. – 481 с. (Изд. 2-е).

УДК 669.225: 620.191.5: 620.179.11

### ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОТУСКНЕНИЯ СЕРЕБРЯНЫХ СПЛАВОВ

С. А. ТЮРИНА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, С. Л. ЧАВУШЬЯН<sup>2</sup>, А. В. МАКАРОВА<sup>1</sup>, Р. Е. ХВОСТОВ<sup>1</sup>,  
Г. А. ЮДИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, Москва,  
пр. Вернадского, 78, E-mail: [mguri.tyurina@mail.ru](mailto:mguri.tyurina@mail.ru)

<sup>2</sup>Московская государственная художественно-промышленная академия имени С. Г. Строганова,  
125080, Москва, Волоколамское шоссе, 9

Поступила в редакцию 2.09.2020

После доработки 9.11.2020

Принята к публикации 11.11.2020

Рассматривается проблема потускнения музейного серебра. Исследуются факторы, вызывающие потемнение изделий из серебряных сплавов, находящихся в витринах и хранилищах музеев, анализируются методы предотвращения данного нежелательного процесса. Также приводятся результаты применения этих методов.

*Ключевые слова:* серебро, потускнение серебра, коррозия серебра, культурное наследие

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-170-181

### ЛИТЕРАТУРА

1. Wiesinger R. Influence of relative humidity and ozone on atmospheric silver corrosion // Journal of Cultural Heritage. – 2016. – N 17. – P. 20–26.

2. Шемаханская М. С. Металлы и вещи: история, свойства, разрушение, реставрация. – 2015. – 288 стр.

3. Tissot Monteiro O. C., Barreiros M. A., Correia J., Guerra M. F. Corrosion of silver alloys in sulphide environments: a multianalytical approach for surface characterization // The Royal Society of Chemistry. – 2016. – N 6. – P. 51856–51863.

4. Palomar T. Evaluation of cleaning treatments for tarnished silver: the conservator's perspective // Int. J. Conserv. Sci. – 2018. – N 9, V. 1

5. Costa V. The deterioration of silver alloys and some aspects of their conservation // Rev. Conserv. – 2001. – N 2. – P. 18–34.

6. Ortiz-Corona J., Rodriguez-Gomez F. J. Role of copper in tarnishing process of silver alloys in sulphide media // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2019. – N 29. – P. 2646–2657.

7. Ingoa G.M., Angelini E., Riccucci C., De Caro T., Mezzi A., Faraldi F., Caschera D., Giuliani C., Di Carlo G. Indoor environmental corrosion of Ag-based alloys in the Egyptian Museum (Cairo, Egypt) // Applied Surface Science. – 2015. – V. 326. – P. 222–235.

УДК 620.173.24: 621.791.011

## ОЦЕНКА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКАЛЬНОГО БОКОВОГО ОБЖАТИЯ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С НАДРЕЗОМ

К. Е. САДКИН, канд. техн. наук, В. Ю. ФИЛИН, д-р техн. наук, А. В. МИЗЕЦКИЙ, Е. Д. НАЗАРОВА

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

Поступила в редакцию 20.10.2020

После доработки 23.11.2020

Принята к публикации 27.11.2020

При оценке результатов испытаний образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной на статическую трещиностойкость одним из критериев их корректности является прямолинейность фронта трещины. В действительности за счет наличия остаточных напряжений идеально прямолинейного фронта трещины не бывает. Особенно это актуально для образцов, вырезанных из сварных соединений, из-за наличия остаточных сварочных напряжений (ОСН). Одним из методов, позволяющих снизить влияние ОСН, является боковое обжатие образцов. Его эффективность доказана опытным путем, какие-либо количественные оценки в доступной литературе не представлены. В рамках настоящей работы с использованием метода конечных элементов произведено моделирование процесса сварки, вырезки образца и его обжатия. Также произведены расчеты влияния обжатия на однородный металл без остаточных напряжений. Установлено, что в процессе обжатия поле остаточных напряжений, возникающее в процессе сварки и изготовления образца, заменяется иным полем с меньшим градиентом напряжений, более благоприятным для получения фронта трещины, отвечающего критериям корректности результатов признанных методик испытаний. Расчетами показано, что в диапазоне реализуемых на практике степеней бокового обжатия полное снятие остаточных напряжений как в основном металле, так и в сварном соединении невозможно.

*Ключевые слова:* механика разрушения, сварные образцы, испытания на трещиностойкость, прямолинейность фронта трещины, боковое обжатие

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-182-191

### ЛИТЕРАТУРА

1. DNVGL-RU-SHIP. Rules for classification: Ships (RU-SHIP). Part 2: Materials and welding. Ch. 2: Metallic materials, rev. 2018–01. – 217 p.
2. Российский морской регистр судоходства. НД № 2-020101-124. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII. Материалы. – СПб., 2020. – 273 с.
3. BS 7448 Fracture Mechanics Toughness Test. Part 1. Method for determination of K<sub>1c</sub>, critical CTOD and critical J – values of metallic materials, 1991.
4. ISO 15653:2018. Metallic materials. Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds. – 2018. – 46 p.
5. Ильин А.В., Филин В.Ю. Аттестация судокорпусной стали по параметру трещиностойкости CTOD металла зоны термического влияния сварных соединений. Анализ критериев корректности испытаний. // Вопросы материаловедения. Труды конференции молодых ученых и специалистов ЦНИИ КМ «Прометей», 24–25 июня 2002 г.
6. Артемьев Д. М., Садкин К. Е., Мизецкий А. В. Расчетная оценка остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях судокорпусных конструкций методом конечных элементов // Безопасность и живучесть технических систем: материалы и доклады V Всероссийской конференции, Красноярск, 12–16 октября 2015г. В 3 т.: Т.1. – С. 51–55.

УДК 621.039.531: 539.4:620.17

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛА ПАТРУБКОВ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-440 ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ТЕЧЕНИЕ 45 ЛЕТ

Д. Ю. ЕРАК, д-р техн. наук, К. И. МЕДВЕДЕВ, А. А. ЧЕРНОБАЕВА, д-р техн. наук,  
Д. А. ЖУРКО, канд. техн. наук, А. Д. ЕРАК, канд. техн. наук, С. А. БУБЯКИН, канд. техн. наук,  
А. П. БАНДУРА\*

Поступила в редакцию 21.08.2020

После доработки 04.09.2020

Принята к публикации 07.09.2020

Представлены результаты определения механических характеристик металла проб, вырезанных из патрубков и цилиндрической части обечайки зоны патрубков корпуса реактора ВВЭР-440 после эксплуатации в течение 45 лет.

*Ключевые слова:* обечайка зоны патрубков, критическая температура хрупкости, предел текучести, предел прочности, материал корпуса ВВЭР-440

**DOI:** 10.22349/1994-6716-2020-104-4-192-199

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 50.05.12–2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Контроль радиационного охрупчивания корпуса реактора атомной станции. – М.: Стандартинформ, 2019. – 53 с.
2. ГОСТ 1497–84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2008. – 26 с.
3. Student. The probable error of a mean // *Biometrika*. – 1908. – № 6 (1). – P. 1–25.
4. Магнус Я. Р., Катышев П. К., Пересецкий А. А. Эконометрика. Начальный курс. – М.: ДЕЛО, 2004. – 576 с.
5. Gurovich B., Kuleshova E., Zabusov O., Fedotova S., Frolov A., Saltykov M., Maltsev D. Influence of structural parameters on the tendency of VVER-1000 reactor pressure vessel steel to temper embrittlement // *J. Nucl. Mater.* – N 435. – 2013. – P. 25–31.
6. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002–86) / Госатомнадзор. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.