

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

- Коротковская С. В., Никитина В. Р., Хлусова Е. И., Ушанова Э. А.* Влияние дополнительной термической обработки на структуру и микротвердость высокопрочной стали для судостроения 7
- Мендагалиев Р. В., Зотов О. Г., Иванов С. Ю., Климова-Корсмик О. Г., Лебедева Н. В., Куклина А. А.* Структура и механические свойства судостроительной стали, полученной методом прямого лазерного выращивания и горячей прокатки 17
- Исаева А. В., Приймак Е. Ю., Атамашкин А. С., Сёмка Я. С.* Микроструктурные аспекты усталостной прочности сварных соединений среднеуглеродистых сталей, полученных ротационной сваркой трением 27
- Громов В. Е., Порфирьев М. А., Иванов Ю. Ф., Крюков Р. Е., Шляров В. В.* Градиенты структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры в головке рельсов из заэвтектоидной стали после эксплуатации 39
- Цуканов В. В., Смирнова Д. Л.* Усовершенствованный метод определения диффузионных превращений аустенита в изотермических условиях. Часть 1. Анализ стандартных диаграмм и возможность применения усовершенствованной диаграммы в диффузионной области 49
- Цуканов В. В., Смирнова Д. Л.* Усовершенствованный метод определения диффузионных превращений аустенита в изотермических условиях. Часть 2. Диаграммы изотермических превращений и их роль при назначении режимов термической обработки 60
- Цуканов В. В., Смирнова Д. Л., Кархин В. А., Хомич П. Н., Ефимов С. В.* Решение задачи теплопроводности для расчетного моделирования процесса снижения содержания водорода при противодиффузионной термической обработке 68
- Александрова Н. М., Алиев А. А., Филиппов Г. А.* Разработка технологии химико-термической обработки для изготовления деталей электрооборудования автомобильного транспорта 76
- Толорайя В. Н., Остроухова Г. А.* Изучение механизма зарождения монокристаллов из Re–Ru-содержащих никелевых жаропрочных сплавов с заданной пространственной кристаллографической ориентацией от затравок системы Ni–W–Re–C с температурой ликвидус 1550–1600°C 83
- Бутрим В. Н., Адашкин А. М., Каширцев В. В., Трушников А. С.* Влияние вольфрама на структуру жаропрочных сплавов на основе хрома 96
- Лукина Е. А., Кочубей А. Я., Медведев П. Н., Журавлева П. Л.* Термомеханика пластического течения сплавов системы Al–Cu–Li 107

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Бобкова Т. И., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А., Гошкодеря М. Е., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В.* Разработка технологии получения функциональных покрытий из порошков стали X15Ю5 121
- Артемов А. В., Переславцев А. В., Воцинин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В.* Анализ базальтоподобного шлака плазменной переработки отходов: влияние морфологического состава отходов 127

ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Лебедев В. Л., Косильников В. Ю., Серый П. В., Трошкин С. Н.* Акустическая эмиссия при испытаниях сферопластиков на гидростатическую прочность 136
- Старостин Н. П., Аммосова О. А.* Совершенствование управления охлаждением при электродуговой сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур 147

Салахова Р. К., Панарин А. В. Исследование поверхностных энергетических характеристик стекло- и углеволокна методом Вашбурна.....	159
Андреанова К. А., Халиков А. А., Беззаметнов О. Н., Амирова Л. М. Функционально-градиентный углепластик на основе эпоксидной матрицы, модифицированной термоэластопластом.....	170
Полотнянщиков К. С., Юдин В. Е., Светличный В. М., Ваганов Г. В. Легкие термо- и теплостойкие композиционные материалы на основе пенополиимидов.....	178

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Вагапов Р. К., Михалкина О. Г., Лопаткин В. А., Ибатуллин К. А., Стрельникова К. О. Сравнение агрессивности сероводородных сред по отношению к сталям в паровой и водной фазах	188
--	-----

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Марголин Б. З., Пирогова Н. Е. Сорокин А. А., В. И. Кохонов, Дуб А. В., Сафонов И. А. Исследование сопротивления коррозионному растрескиванию под напряжением облученной ферритно-мартенситной нержавеющей стали 07X12НМФБ в сверхкритической водной среде. Часть 1. Проведение автоклавных испытаний	202
---	-----

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов	217
---	------------

УДК 669.14.018.293:621.785.6

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ ДЛЯ СУДОСТРОЕНИЯ

С. В. КОРОТОВСКАЯ, канд. техн. наук, В. Р. НИКИТИНА, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук,
Э. А. УШАНОВА, канд. физ.-мат. наук

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

Поступила в редакцию 11.04.2023

После доработки 11.05.2023

Принята к публикации 15.05.2023

Исследованы кинетика роста аустенитного зерна при нагреве и особенности фазовых превращений при охлаждении в зависимости от технологии изготовления высокопрочной стали. Для выявления бывших границ аустенитного зерна в стали применен метод вакуумного травления. Показано благоприятное влияние проведения дополнительной закалки с печного нагрева с отпуском после закалки с прокатного нагрева на формирование однородной структуры по морфологии и размерам структурных элементов в сталях мартенситного класса.

Ключевые слова: низкоуглеродистая высокопрочная сталь, закалка с отпуском, закалка с прокатного нагрева, вакуумное травление, размер аустенитного зерна, фазовые превращения, листовой прокат, структура, микротвердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-07-16

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. ГОСТ Р 52927–2015. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия. – М., 2015.
4. Орыщенко А. С., Голосиенко С. А., Хлусова Е. И. Новое поколение высокопрочных корпусных сталей // Судостроение. – 2013. – № 4. – С. 73–76.

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

5. Счастливец В. М., Табатчикова Т. И., Яковлева И. Л. и др. Влияние термомеханической обработки на сопротивление хрупкому разрушению низкоуглеродистой низколегированной стали // Физика металлов и металловедение. – 2015. – № 2. – С. 189–199.

6. Olasolo M., Uranga P., Rodriguez-Ibabe J. M., Lypetz B. Effect of austenite microstructure and cooling rate on transformation characteristics in a low carbon Nb–V microalloyed steel // Materials Science and Engineering A. – 2011. – N 528. – P. 2559–2569.

7. Золоторевский Н. Ю., Зисман А. А., Панпурин С. Н., Титовец Ю. Ф., Голосиенко С. А., Хлусова Е. И. Влияние размера зерна и деформационной субструктуры аустенита на кристаллогеометрические особенности бейнита и мартенсита низкоуглеродистых сталей // МиТОМ. – 2013. – № 10 (700). – С. 39–48.

8. 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. – № 46. – P. 389–398.

9. Петров С. Н., Пташник А. В. Экспресс-метод определения границ бывшего аустенитного зерна в сталях бейнитно-мартенситного класса на основе картирования кристаллографических ориентировок превращенной структуры // МиТОМ. – 2019. – № 5.

10. Lambert-Perlade A., Gourgues A. F., Pineau A. Austenite to bainite transformation in the steel heat-affected zone of high strength low alloy steel // Acta Materialia. – 2004. – V. 52. – P. 2337–2348.

УДК 669.14.018.293:621.791.92:621.771.016

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ И ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Р. В. МЕНДАГАЛИЕВ¹, О. Г. ЗОТОВ², канд. техн. наук, С. Ю. ИВАНОВ¹,
О. Г. КЛИМОВА-КОРСМИК¹, канд. техн. наук, Н. В. ЛЕБЕДЕВА³, канд. техн. наук, А. А. КУКЛИНА⁴

¹ ФГБОУ ВО СПбГМТУ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. E-mail: ruslanm888@mail.ru

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

³ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49

⁴ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2

Поступила в редакцию 10.04.2023

После доработки 23.06.2023

Принята к публикации 13.06.2023

Исследованы структура и свойства образцов из стали 09ХН2МД, полученных методом прямого лазерного выращивания (ПЛВ). Представлены результаты оценки анизотропии свойств и структурной неоднородности, вызванной высокой скоростью нагрева и охлаждения при получении образцов из хладостойкой стали. Показано, что в структуре стали после ПЛВ на границах сплавления валиков содержание остаточного аустенита и цементита значительно больше, что вносит вклад в анизотропию. С целью снижения анизотропии свойств и повышения прочности и пластичности проведена прокатка образцов, полученных методом ПЛВ. В работе рассмотрены две технологии горячей прокатки: с закалкой с печного нагрева и с закалкой с прокатного нагрева, а также с последующим высоким отпуском. Особое внимание уделено анализу структурно-фазового состава и анизотропии механических свойств образцов, полученных методом ПЛВ. Проведена оценка влияния горячей прокатки с закалкой с прокатного и печного нагрева на структуру и механические свойства.

Ключевые слова: прямое лазерное выращивание, аддитивные технологии, горячая прокатка, судостроительная сталь, микроструктура, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-113-5-17-26

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.crim-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

ЛИТЕРАТУРА

1. Korsmik R., Tsybulskiy I., et al. The approaches to design and manufacturing of large-sized marine machinery parts by direct laser deposition // *Procedia CIRP*. – 2020. – V. 94. – P. 298–303.
2. Feng L., Gao J., et al. Effect of grain orientation on microstructure and mechanical properties of laser welded joint of additive manufactured 300M steel // *Materials Today Communications*. – 2023. – V. 35. – Art. 105497
3. Çalışkan C. İ., Khan H. M., Özer G., Waqar S., Tütük İ. The effect of conformal cooling channels on welding process in parts produced by additive manufacturing, laser powder bed fusion // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – V. 83. – P. 705–716.
4. Mendagaliyev R.V., Zadykyan G.G., Davletshin A. O., Mukashev T., Rashkovets M. Direct laser deposition of cold-resistant steels for Arctic shelf development // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – V. 30 (3). – P. 707–711.
5. Moeinfar Kh., Khodabakhshi F., Kashani-bozorg S.F., Mohammadi M., Gerlich A. P. A review on metallurgical aspects of laser additive manufacturing (LAM): Stainless steels, nickel superalloys, and titanium alloys // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – V. 16. – P. 1029–1068.
6. Mendagaliev R. V., Ivanov S. Y., Babkin K. D., Lebedeva N. V., Klimova-Korsmik O. G., Turichin G. A. Influence of the thermal cycle on microstructure formation during direct laser deposition of bainite-martensitic steel // *Materials Chemistry and Physics*. – 2023. – V. 300. – Art. 127523.
7. Хлусова Е. И., Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Пазилова У. А. Влияние легирования на структуру и свойства высокопрочной хладостойкой стали после термической и термомеханической обработки // *Вопросы материаловедения*. – 2007. – № 1 (49). – С. 20–32.
8. Yufan Zhao, Huakang Bian, Hao Wang, Aoyagi Kenta, Yamanaka Kenta, Akihiko Chiba. Non-equilibrium solidification behavior associated with powder characteristics during electron beam additive manufacturing // *Materials and Design*. – 2022. – V. 221. – Art. 110915.
9. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А. и др. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях // *Вопросы материаловедения*. – 2008. – № 2 (54). – С. 7–19.
10. Малахов Н. В., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И., Казаков А. А. Структурная неоднородность и методы ее снижения для повышения качества конструкционных сталей // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 3 (59). – С. 52–64.
11. Han G., Hu B., Yu Y. S., Rong X. Q., Xie Z. J., Misra R. D. K., Wang X. M., Shang C. J. Atomic-scale study on the mechanism of formation of reverted austenite and the behavior of Mo in a low carbon low alloy system // *Materials Characterization*. – 2020. – V. 163. – Art. 110269.
12. Lemarquis L., Giroux P. F., Maskrot H., Barkia B., Hercher O., Castany P. Cold-rolling effects on the microstructure properties of 316L stainless steel parts produced by Laser Powder Bed Fusion (LPBF) // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – V. 15. – P. 4725–4736.
13. Xinni Tian, Yuman Zhu, et al. Isotropic and improved tensile properties of Ti-6Al-4V achieved by in-situ rolling in direct energy deposition // *Additive Manufacturing*. – 2021. – V. 46. – Art. 102151.
14. Tao Zhang, Huigui Li, Hai Gong, Yunxin Wu, Abdulrahman Shuaibu Ahmad, Xin Chen. Effect of rolling force on tensile properties of additively manufactured Inconel 718 at ambient and elevated temperatures // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – V. 884. – Art. 161050.
15. Горынин В. И. Анизотропия сопротивляемости хрупкому разрушению низкоуглеродистых сталей с полосчатой структурой // *Вопросы материаловедения*. – 2008. – № 3 (55). – С. 89–95.
16. Kan W. H., Jiang D., et al. Effect of in-situ layer-by-layer rolling on the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of a directed energy deposited 316L stainless steel // *Additive Manufacturing*. – 2022. – V. 55. – Art. 102863.
17. Li Ch., Tian Y., Chen Y., Hodgson P., Wu X., Zhu Y., Huang A. Hierarchical layered and refined grain structure of Inconel 718 superalloy produced by rolling-assisted directed energy deposition // *Additive Manufacturing Letters*. – 2021. – V. 1. – Art. 100009.

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ РОТАЦИОННОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

А. В. ИСАЕВА^{1,2}, канд. техн. наук, Е. Ю. ПРИЙМАК^{1,2}, канд. техн. наук,
А. С. АТАМАШКИН¹, канд. техн. наук, Я. С. СЁМКА¹

¹ФГБОУВО «Оренбургский государственный университет», 460018, Оренбург, пр. Победы, 13

²АО «Завод бурового оборудования», 460026, Оренбург, пр. Победы, 118.

E-mail: stepan4uckova@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.04.2023

После доработки 10.05.2023

Принята к публикации 15.05.2023

Исследовано сопротивление усталостному разрушению сварных соединений сталей марок 32Г2 и 40ХН2МА, предназначенных для производства бурильных труб для геологоразведки. Соединение трубных заготовок с целью изготовления экспериментальных образцов осуществляли посредством ротационной сварки трением при различных параметрах процесса. Оценка сопротивления усталостным нагрузкам производили при испытаниях сплошных цилиндрических образцов со сварным швом в условиях изгиба с вращением, что позволило выявить наиболее слабую зону, в которой произошло зарождение и развитие усталостной трещины. Исследование микроструктуры осуществляли с помощью оптической и электронной сканирующей микроскопии с применением метода дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD). В ходе исследований установлено, что наибольшее сопротивление усталостным нагрузкам обеспечивается за счет интенсивного развития процессов деформационного упрочнения в зоне термомеханического влияния сварных соединений в зависимости от параметров ротационной сварки трением.

Ключевые слова: ротационная сварка трением, среднеуглеродистые стали, сварное соединение, зона термомеханического влияния, циклическая долговечность, деформационное упрочнение

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-27-38

ЛИТЕРАТУРА

1. Emre H. E., Kaçar R. Effect of Post Weld Heat Treatment Process on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Welded Dissimilar Drill Pipe // *Materials Research*. – 2015. – V. 18 (3). – P. 503–508. <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.308114>.
2. Banerjee A., Ntovas M., Da Silva L., Rahimi S., Wynne B. Inter relationship between microstructure evolution and mechanical properties in inertia friction welded 8630 low-alloy steel // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2021. 21:149 <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00300-9>.
3. Khadeer S. A., Babu P. R., Kumar B. R., Kumar A. S. Evaluation of friction welded dissimilar pipe joints between AISI 4140 and ASTM A 106 Grade B steels used in deep exploration drilling // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – V. 56. – P. 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.078>.
4. Kumar A. S., Khadeer S. A., Rajinikanth V., Pahari S., Kumar B. R. Evaluation of bond interface characteristics of rotary friction welded carbon steel to low alloy steel pipe joints // *Materials Science and Engineering A*. – 2021. – V. 824. 14184 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141844>.
5. Li P. et al. Inhomogeneous microstructure and mechanical properties of rotary friction welded AA2024 joints // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – V. 9, N 3. – P. 5749–5760. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.100>.
6. Nagaraj M., Ravisankar B. Effect of Severe Plastic Deformation on Microstructure and Mechanical Behaviour of Friction-Welded Structural Steel IS2062 // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2019. – V. 72. – P. 751–756. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1527-1>.
7. Jeffrey W. S., Thomas G. H., McColskey J. D., Victor F. P., Ramirez A. J. Characterization of mechanical properties, fatigue-crack propagation, and residual stresses in a microalloyed pipeline-steel friction-stir weld // *Materials and Design*. – 2015. – V. 88. – P. 632–642. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.049>.

8. Abdulstaar M. A., Al-Fadhlah K. J., Wagner L. Microstructural variation through weld thickness and mechanical properties of peened friction stir welded 6061 aluminum alloy joints // *Materials Characterization*. – 2017. – V. 12. – P. 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.02.011>.
9. Mc Pherson N. A., Galloway A. M., Cater S. R., Hambling S. J. Friction stir welding of thin DH36 steel plate // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2013. – V. 18. – P. 441–450. <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000122>.
10. Baillie P., Campbell S., Galloway A., Cater S., McPherson N. A. Comparison of Double Sided Friction Stir Welding in Air and Underwater for 6mm S275 Steel Plate // *International Journal of Chemical, Nuclear, Metallurgical and Materials Engineering*. – 2014. – V. 8. – P. 651–655. <https://doi.org/10.13140/2.1.2306.2400>.
11. Ericsson M., Sandstrom R. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG // *International Journal of Fatigue*. – 2003. – V. 25. – P. 1379–1387. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00059-8).
12. Yamamoto Y., Ochi H., Sawai T., Ogawa K., Tsujino R., Yasutomi M. Tensile Strength and Fatigue Strength of Friction-Welded SUS304 Stainless Steel Joints-Evaluation of Joint Strength by Deformation Heat Input in Upset Stage and Upset Burn-Off Length // *Journal of the Society of Materials Science Japan*. – 2004. – V. 53 (5). – P. 512–517. <https://doi.org/10.2472/jsms.53.512>.
13. Paventhan R., Lakshminarayanan P. R., Balasubramanian V. Fatigue behaviour of friction welded medium carbon steel and austenitic stainless steel dissimilar joints // *Materials and Design*. – 2011. – V. 32. – P. 1888–1894. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.011>.
14. Sahin M. Joining with friction welding of high speed and medium carbon steel // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – V. 168, N. 2. – P. 168–202. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.11.015>.
15. Атамашкин А. С., Приймак Е. Ю., Тулибаев Е. С., Степанчукова А. В. Предел выносливости и механизм разрушения фрикционных сварных соединений геологоразведочных бурильных труб // *Черные металлы*. – 2021. – № 5. – С. 33–38. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.05.06>
16. Belkahla Y., Mazouzi A., Lebouachera S. E. I., Hassan A.J., Fides M. Hvizdoš P., Cheniti B. Miroud D. Rotary friction welded C45 to 16NiCr6 steel rods: statistical optimization coupled to mechanical and microstructure approaches // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – V. 116. – P. 2285–2298. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07597-z>.
17. Selvamani S. T., Vigneshwar M., Nikhil M., Hariharan S. J., Palanikumar K. Enhancing the Fatigue Properties of Friction Welded AISI 1020 Grade Steel Joints using Post Weld Heat Treatment Process in Optimized Condition // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – V. 16. – P. 1251–1258. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.222>.
18. Mercan S., Aydin S., Özdemir N. Effect of welding parameters on the fatigue properties of dissimilar AISI 2205–AISI 1020 joined by friction welding // *International Journal of Fatigue*. – 2015. – V. 81. – P. 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.07.023>
19. Barrionuevo G. O., Mullo J. L., Ramos-Grez J. A. Predicting the ultimate tensile strength of AISI 1045 steel and 2017-T4 aluminum alloy joints in a laser-assisted rotary friction welding process using machine learning: a comparison with response surface methodology // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – V. 116. – P. 1247–1257. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07469-6>.
20. Лукин В. И., Овсепян С. В., Ковальчук В. Г., Саморуков М. Л. Особенности ротационной сварки трением высокожаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // *Жаропрочные стали и сплавы*. – 2017. – № 12 (60). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-12-1-1>.
21. Fang Y., Jiang X., Mo D., Zhu D., Luo Z. A review on dissimilar metals' welding methods and mechanisms with interlayer // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – V. 102. – P. 2845–2863. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03353-6>.
22. Вилль В. И. Сварка металлов трением. – М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.
23. Humphreys F. J., Hatherly M. Recrystallisation and related annealing phenomena. – UK: Pergamon, 1996. – 658 p.

ГРАДИЕНТЫ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И ДИСЛОКАЦИОННОЙ СУБСТРУКТУРЫ В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСОВ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. Е. ГРОМОВ¹, д-р физ.-мат. наук, М. А. ПОРФИРЬЕВ¹, Ю. Ф. ИВАНОВ², д-р физ.-мат. наук,
Р. Е. КРЮКОВ¹, д-р техн. наук, В. В. ШЛЯРОВ¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, Новокузнецк,
ул. Кирова, 42. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

²Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3

Поступила в редакцию 1.06.2023

После доработки 7.06.2023

Принята к публикации 13.06.2023

Методами просвечивающей электронной микроскопии выполнен анализ градиентов структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры на глубину до 10 мм по центральной оси головки рельсов категории ДТ400ИК специального назначения после пропущенного тоннажа 234,7 млн. т на Забайкальской железной дороге. Выявлено формирование изгибных контуров экстинкции, свидетельствующее об упругонапряженном состоянии материала. Указаны источники кризисно-кручения кристаллической решетки: внутрифазные и межфазные границы. Рассмотрены механизмы разрушения пластинчатого перлита (разрезание движущимися дислокациями) и растворения с перемещением атомов углерода на дефекты.

Ключевые слова: заэвтектоидная сталь, головка рельсов, градиенты, плотность дислокаций, фрагменты

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-39-48

ЛИТЕРАТУРА

1. Yuriev A. A., Ivanov Yu. F., Gromov V. E., Rubannikova Yu. A., Starostenkov M. D., Tabakov P. Y. Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation. – Millersville, PA, USA: Materials Research Forum LLC. – 2021. – 190 p.
2. Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Кузнецов Р. В., Глезер А. М., Шлярова Ю. А., Перегудов О. А. Деформационное преобразование структуры и фазового состава поверхности рельсов при сверхдлительной эксплуатации // Деформация и разрушение материалов. – 2022. – № 1. – С. 35–39.
3. Кузнецов Р. Е., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Кормышев В. Е., Шлярова Ю. А., Юрьев А. А. Градиенты структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры рельсов при сверхдлительной эксплуатации // Известия Алтайского государственного университета. – 2022. – № 1. – С. 44–50.
4. Григорович К. В., Громов В. Е., Кузнецов Р. В., Иванов Ю. Ф., Шлярова Ю. А. Формирование тонкой структуры перлитной стали при сверхдлительной пластической деформации // Доклады РАН. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 503. – С. 8–12.
5. Lojkowski W., Millman Y., Chugunova S.I., Goncharova I.V., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Fecht H.-J. The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks // Materials Science and Engineering A. – 2003. – V. 303, N 1–2. – P. 209–215.
6. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Gierlotka S., Zielinski W., Fecht H.-J. Nanostructure formation on the surface of railway tracks // Materials Science and Engineering A. – 2001. – V. 303. – P. 197–208.
7. Ivanisenko Yu., Fecht H. J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels: effect of high strain rate deformation // Steel Tech. – 2008. – V. 3, N 1. – P. 19–23.
8. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies // Electronic Journal of Structural Engineering. – 2013. – V. 13. – P. 67–74.
9. Steenbergen M., Dollevoet R. On the mechanism of squat formation on train rails: Part I. Origination // International Journal of Fatigue. – 2013. – V. 47. – P. 361–372.
10. Pal S., Valente C., Daniel W., Farjoo M. Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation // Wear. – 2012. – V. 284. – P. 30–42.

11. Konieczny J., Labisz K. Structure and Properties of the S49 Rail after a Long Term Outdoor Exposure // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2022. – V. 16, N 2. – P. 280–290.
12. Shi X.-J., Zhang X.-X., Diao G.-J., Yan Q.-Z. Wear Behavior of High-Speed Wheel and Rail Steels under Various Hardness Matching // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2023. – V. 32. – P. 366–380.
13. Atroshenko S. A., Smirnov V. I., Maier S. S. Failure analysis of pearlitic rail steel with internal macrocrack after long-term operation // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – V. 139. – P. 106445.
14. Man T., Zhou Y., Dong N., Liu T., Dong H. Microstructural Evolution of the Rail Steels Manufactured by Hanyang Iron Works // *Materials*. – 2022. – V. 15 (16). – P. 5488.
15. Su X., Zhu M., Xu G., Zhang Q., Cai F. Comparison Between the Wear Behavior of U68CuCr and U71MnG Rail Steels // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2021. – V. 231. – P. 2896–2908.
16. Woodhead D.H. Investigating the performance of rail steels // *Fields journal of Huddersfield student research*. – 2021. – V. 7 (1). – P. 15.
17. Шур Е. А. Повреждения рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.
18. Zuo J. M., Spence J. C. H. *Advanced Transmission Electron Microscopy*. – New York: Springer, 2017. – 729 p.
19. Egerton F. R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. – Basel: Springer International Publishing, 2016. – 196 p.
20. Carter C. B., Williams D. B. *Transmission Electron Microscopy*. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
21. Конева Н. А., Козлов Э. В. Дислокационная структура и физические механизмы упрочнения металлических материалов // *Перспективные материалы. Структура и методы исследования* / Под ред. Д. Л. Меерсона. – Тула: ТГУ; М.: МИСиС, 2006. – С. 267–320.
22. Конева Н. А., Киселева С. Ф., Попова Н. А. Эволюция структуры и внутренние поля напряжений. Аустенитная сталь. – Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2017. – 145 с.
23. Тришкина Л. И., Черкасова Т. В., Попова Н. А., Конева Н. А., Громов В. Е., Аксенова К. В. Дислокационный ансамбль: скалярная плотность дислокаций и ее компоненты. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2019. – 71 с.
24. Гриднев В. Н., Гаврилук В. Г. Распад цементита при пластической деформации стали // *Металлофизика*. – 1982. – Т. 4, № 3. – С. 74–87.
25. Tsellermaer V. Ya. Substructural and phase transformations during intense plastic deformation of metals // *Steel Trans*. – 1999. – V. 29, N 12. – P. 75–81.
26. Bhadeshia H. K. D. H. Cementite // *International materials reviews*. – 2020. – V. 65. – P. 1–27.
27. Gavriljuk V. G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation // *Materials Science and Engineering A*. – 2003. – V. 345. – P. 81–89.
28. Li Y. J., Chai P., Bochers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite // *Acta Mater*. – 2011. – V. 59. – P. 3965–3977.
29. Gavriljuk V. G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires // *Scripta Mater*. – 2001. – V. 45. – P. 1469–1472.
30. Цементит в углеродистых сталях / Под ред. В. М. Счастливецова. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. – 380 с.
31. Panin V. E., Egorushkin V. E., Panin A. V., Chernyavskii A. G. Plastic distortion as a fundamental mechanism in nonlinear mesomechanics of plastic deformation and fracture // *Phys. Mesomech*. – 2016. – V. 19, N 3. – P. 255–268.
32. Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Панин А. В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе // *УФН*. – 2012. – Т. 182, № 12. – С. 1351–1357.

33. Панин В. Е., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Юрьев А. А., Кормышев В. Е. Роль кривизны решетки в деградации структуры поверхностного слоя металла рельсов при длительной эксплуатации // Доклады РАН. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 494. – С. 68–71.

34. Панин В. Е., Иванов Ю. Ф., Юрьев А. А., Громов В. Е., Панин С. В., Кормышев В. Е., Рубаникова Ю. А. Эволюция тонкой структуры и свойств металла рельсов при длительной эксплуатации // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23, № 5. – С. 85–94.

35. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

36. Громов В. Е., Перегудов О. А., Иванов Ю. Ф., Коновалов С. В., Юрьев А. А. Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 164 с.

УДК 621.785.4:669.14.017.3

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИФфуЗИОННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ АУСТЕНИТА В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ. Часть 1. Анализ стандартных диаграмм и возможность применения усовершенствованной диаграммы в диффузионной области

В. В. ЦУКАНОВ^{1,2}, д-р техн. наук, Д. Л. СМЕРНОВА^{1,2}

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

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», СПбГМТУ, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

Поступила в редакцию 10.07.2023

После доработки 25.07.2023

Принята к публикации 7.08.2023

Рассмотрена усовершенствованная методика определения диффузионных превращений аустенита в изотермических условиях. Произведена оценка применимости стандартных диаграмм при определении условий предварительной термической обработки на стадии охлаждения послековки (стадии накопления) крупногабаритных заготовок.

Ключевые слова: диаграммы превращения аустенита, изотермические диаграммы, ферритно-перлитное превращение, дилатометрия, металловедение, крупногабаритные заготовки

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-49-59

ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин Ю. М., Рахштадт А. Г. Термическая обработка в машиностроении. Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

2. Попов А. А., Попова А. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. – М.: Машгиз, 1961. – 430 с.

3. Погодин-Алексеев Г. И., Геллер Ю. А., Рахштадт А. Г. Металловедение. – М.: Оборонгиз, 1950. – 456 с.

4. Гуляев А. П. Металловедение: Учебник для вузов. Изд. 6-е – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

5. Болховитинов Н. Ф. Металловедение и термическая обработка. – Л.: Машгиз, 1952. – 427 с.

6. Справочник металлиста. Т. 2 / Под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Брострема. – М.: Машиностроение, 1976. – 720 с.

7. Анастасиади Г. П., Кондратьев С. Ю., Малышевский В. А., Сильников М. В. Значение термокинетических диаграмм превращения переохлажденного аустенита для разработки режимов термической обработки ответственных стальных деталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2016. – № 11 (737). – С. 16–22.

8. Цуканов В. В., Смирнова Д. Л., Ефимов С. В. Научно-методические основы выбора режимов накопления и предварительной термической обработки при производстве поковок из среднеуглеродистых среднелегированных сталей // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 4 (108). – С. 49–64.
9. Цуканов В. В., Смирнова Д. Л., Ефимов С. В. Анализ характера превращения аустенита стали типа 56NiCrMoV7 при моделировании режимов охлаждения с температурыковки с переходом на режим накопления // Тяжелое машиностроение. – 2022. – № 11–12. – С. 21–26.
10. Садовский В. Д. Структурная наследственность в стали. – М.: Металлургия, 1973. – 208 с.
11. Д. К. Чернов и наука о металлах / Под ред. акад. Н. Т. Гутцова. – М.–Л.: Metallurgizdat, 1950. – 564 с.
12. Борисов И. А., Байкова Т. М. Термообработка крупных поковок в тяжелом и транспортном машиностроении. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1983. – 32 с.
13. Склюев П. В. Водород и флокены в крупных поковках. – М.: Машгиз, 1963. – 188 с.
14. Семенов Е. И. Ковка и штамповка: Справочник. Т.1: Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / Под ред. Е. И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1985. – 568 с.

УДК 621.785.4:669.14.017.3

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИФфуЗИОННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ АУСТЕНИТА В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ. Часть 2. Диаграммы изотермических превращений и их роль при назначении режимов термической обработки

В. В. ЦУКАНОВ^{1,2}, д-р техн. наук, Д. Л. СМИРНОВА^{1,2}

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

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», СПбГМТУ, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

Поступила в редакцию 10.07.2023

После доработки 25.07.2023

Принята к публикации 7.08.2023

Рассмотрена усовершенствованная методика определения диффузионных превращений аустенита в изотермических условиях на примере проведения изотермического отжига стали 5ХНМ, применяющейся при изготовлении штампов. Произведена оценка корректности стандартных диаграмм.

Ключевые слова: диаграммы превращения аустенита, изотермические диаграммы, ферритно-перлитное превращение, дилатометрия, материаловедение

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-49-59

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А. А., Попова А. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. – М.: Машгиз, 1961. – 430 с.
2. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986. – 384 с.
3. Антикайн П. А. Металловедение. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1972. – 256 с.
4. Перлит в углеродистых сталях / В. М. Счастливец и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 311 с.
5. Самохоцкий А. И., Кунявский А. Н. Металловедение. – М.: Металлургия, 1967. – 457 с.
6. Болховитинов Н. Ф. Металловедение и термическая обработка. – Л.: Машгиз, 1952. – 427 с.
7. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. Изд. 5-е. – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
8. Цуканов В. В., Смирнова Д. Л., Ефимов С. В. Научно-методические основы выбора режимов накопления и предварительной термической обработки при производстве поковок из среднеуглеродистых среднелегированных сталей // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 4 (108). – С. 49–64.

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА
СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА В КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОКОВКАХ
ПРИ ПРОТИВОФЛОКЕННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

В. В. ЦУКАНОВ^{1,2}, д-р техн. наук, Д. Л. СМИРНОВА^{1,2}, В. А. КАРХИН³, д-р техн. наук,
П. Н. ХОМИЧ³, канд. техн. наук, С. В. ЕФИМОВ⁴, канд. техн. наук

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

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,
СПбГМТУ, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

³ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

⁴АО «НПО ЦНИИТМАШ», 115088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4

Поступила в редакцию 10.07.2023

После доработки 24.07.2023

Принята к публикации 7.08.2023

Исследована проблема флокенообразования в крупногабаритных заготовках при термической обработке, повышающей дегазацию водорода. Приведено решение задачи теплопроводности, на примере среднелегированных сталей марок 5ХНМ и 20ХЗНМФА выполнена оценка термических циклов при предварительной термической обработке для последующего решения задачи диффузии водорода.

Ключевые слова: металловедение, задачи теплопроводности, термическая обработка, термические циклы, метод конечных разностей, коэффициент теплообмена

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-68-75

ЛИТЕРАТУРА

1. Цуканов В. В. Современные стали и технологии в энергомашиностроении. – СПб.: Профес-
сионал, 2014. – 464 с.
2. Садовский В. Д. Структурная наследственность в стали. – М.: Metallurgy, 1973.
3. Цуканов В. В., Смирнова Д. Л., Ефимов С. В. Научно-методические основы выбора режимов
накопления и предварительной термической обработки при производстве поковок из среднеуглеро-
дистых среднелегированных сталей // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 4(108). – С. 49–64.
4. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. Изд. 5-е. – М.: Metallurgy, 1983.
5. Борисов И. А., Байкова Т. М. Термообработка крупных поковок в тяжелом и транспортном
машиностроении. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1983. – 32 с.
6. Склюев П. В. Водород и флокены в крупных поковках. – М.: Машгиз, 1963. – 188 с.
7. Семенов Е. И. Ковка и штамповка: Справочник. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование.
Ковка / Под ред. Е. И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1985. – 568 с.
8. Бернштейн М. Л., Рахштадт А. Г. Металловедение и термическая обработка стали.
Т. 1. – М.: Металловедение, 1983 г.
9. Лахтин Ю. М. Термическая обработка в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1980.
10. Влияние металлургической технологии на качество поковок стали 5ХНМ для изготовления
крупногабаритных штамповых плит / В. Г. Милуц, В. В. Цуканов, В. В. Вихарев и др. // Тяжелое ма-
шиностроение. – 2020. – № 10. – С. 2–9.
11. Цуканов В. В., Смирнова Д. Л., Ефимов С. В. Анализ характера превращения аустенита
стали типа 56NiCrMoV7 при моделировании режимов охлаждения с температуры ковки с переходом
на режим накопления // Тяжелое машиностроение. – 2022. – № 11–12.

12. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М., 1967.
13. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
14. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений. Т. 2. – М.: ГИФМЛ, 1960. – 620 с.
15. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. Изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

УДК 621.785.5

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Н. М. АЛЕКСАНДРОВА, д-р техн. наук, А. А. АЛИЕВ, канд. техн. наук,
Г. А. ФИЛИППОВ, д-р техн. наук

*ФГУП ГНЦ «ЦНИИЧЕРМЕТ им. И. П. Бардина», 105005, Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2.
E-mail: akper.aliiev@gmail.com*

Поступила в редакцию 2.06.2023

После доработки 5.06.2023

Принята к публикации 22.06.2023

Проведен анализ состояния технологии и оборудования для термической и химико-термической обработок, применяемых для изготовления основных деталей стартеров, распределителей системы зажигания, генераторов. Отмечено, что технический уровень этих технологий и оборудования не отвечает современным требованиям. Технологии цементации в твердом карбюризаторе и цианирование в жидкой среде часто приводят к образованию на поверхности деталей нестабильных параметров диффузионного слоя и в конечном итоге – к «пятнистой твердости» и интенсивному износу деталей при эксплуатации.

С целью модернизации процессов цементации и цианирования разработаны экологически чистые технологии химико-термической обработки, обеспечивающие получение стабильных параметров диффузионного слоя, тем самым способствующие повышению эксплуатационных характеристик изделий электрооборудования автомобильного транспорта.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, закалка, цементация, цианирование, кипящий слой, твердость

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-76-82

ЛИТЕРАТУРА

1. Минкевич А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 с.
2. Шубин Р. П., Гринберг М. Л. Нитроцементация деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 35 с.
3. Кальнер В. Д., Юрасов С. А. Современные методы цементации и нитроцементации. – М.: Машиностроение, 1987. – 65 с.
4. Технологические процессы цементации и нитроцементации / В. М. Зинченко, Б. В. Георгиевская и др. // Технология автомобилестроения. – 1982. – Серия XII. – С. 121.
5. Горелик С. С. Фазовые и структурные изменения, сопровождающие горячую деформацию металлов // Пластическая деформация сталей и сплавов. – М.: МИСиС, 1996. – С. 396–400.
6. Алиев А. А. Технология и оборудование цементации стальных деталей в кипящем слое в производстве автотракторного электрооборудования // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 7. – С. 45–49.
7. Алиев А. А. Цементация стальных деталей в кипящем слое на основе пропан-бутановой смеси // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 3. – С. 31–33.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ЗАРОЖДЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ИЗ Re–Ru-СОДЕРЖАЩИХ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ЗАДАННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ОТ ЗАТРАВОК СИСТЕМЫ Ni–W–Re–C С ТЕМПЕРАТУРОЙ ЛИКВИДУС 1550–1600°C

В. Н. ТОЛОРАЙЯ, Г. А. ОСТРОУХОВА

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17. E-mail: viam.lab1@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2023

После доработки 22.05.2023

Принята к публикации 16.06.2023

Представлены результаты исследования механизма зарождения монокристаллов заданной кристаллографической ориентации из никелевых жаропрочных сплавов, содержащих рений и рутений, от затравок системы Ni–W–Re–C с температурой ликвидус 1550–1600°C.

Ключевые слова: никелевый жаропрочный сплав, монокристаллическая структура, кристаллографическая ориентация (КГО), направленная кристаллизация, затравка, температура ликвидус

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-83-95

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Толорайя В. Н., Некрасов С. Н., Остроухова Г. А. Сравнительный анализ структуры и свойств отливок из жаропрочных сплавов, полученных на установках типа УВНК и ПМП // *Новости материаловедения. Наука и техника*. – 2018. – № 5–6 (31). – С. 01. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 06.03.2023 г.).

3. Герасимов В. В., Петрушин Н. В., Висик Е. М. Усовершенствование состава и разработка технологии литья монокристаллических лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2015. – № 3. Ст. 1. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 06.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-1-1.

4. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Петрушин Н. В., Висик Е. М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 2 (35). – С. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25

5. Петрушин Н. В., Елютин Е. С., Висик Е. М., Голынец С. А. Разработка монокристаллического жаропрочного никелевого сплава V поколения // *Металлы*. – 2017. – № 6. – С. 38–51.

6. Ганина Н. И., Захаров А. М., Оленичева В. Г., Петрова Л. А. Диаграммы состояния металлических систем за 1987 г. – М.: ВИНТИ, 1988. – 628 с.

7. Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Сидоров В. В., Демонис И. М. Разработка монокристаллических высокорениевых жаропрочных никелевых сплавов методом компьютерного конструирования // *Авиационные материалы и технологии*. – 2004. – № 1. – С. 22–36.

8. Толорайя В. Н., Каблов Е. Н., Орехов Н. Г., Чубарова Е. Н. Методы получения монокристаллов жаропрочных сплавов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2005. – № 5. – С. 172–189.

9. Колядов Е. В., Висик Е. М., Герасимов В. В., Аргинбаева Э. Г. Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства интерметаллидных сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2019. – № 3 (75). Ст. 2. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 06.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-14-26.

10. Петрушин Н. В., Висик Е. М., Горбовец М. А., Назаркин Р. М. Структурно-фазовые характеристики и механические свойства монокристаллов жаропрочных никелевых ренийсодержащих сплавов с интерметаллидно-карбидным упрочнением // *Металлы*. – 2016. – № 4. – С. 57–70.

11. Бондаренко Ю. А., Каблов Е. Н., Сулова В. А., Ечин А. Б. Влияние высокоградиентной направленной кристаллизации на структуру и свойства ренийсодержащего монокристаллического сплава // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2006. – № 8 (614) . – С. 33–35.
12. 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. – № 5. – С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
13. Висик Е. М., Герасимов В. В., Колядов Е. В., Кузьмина Н. А. Влияние технологических режимов литья на параметры структуры монокристаллов новых жаропрочных сплавов // *Металлургия машиностроения*. – 2016. – № 5. – С. 27–31.
14. Толорайя В. Н., Остроухова Г. А. Получение монокристалльных затравок [001] из сплавов системы Ni–W методом направленной кристаллизации // *Вопросы материаловедения*. – 2021. – № 2 (106). – С. 55–65.
15. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б., Толорайя В. Н., Гаврилин О. С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
16. Кузьмина Н. А., Пьянкова Л. А. Контроль кристаллографической ориентации монокристаллических отливок никелевых жаропрочных сплавов методом рентгеновской дифрактометрии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2019. – № 12. Ст.02. (дата обращения: 06.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-11-19.

УДК 669.018.44

ВЛИЯНИЕ ВОЛЬФРАМА НА СТРУКТУРУ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ХРОМА

В. Н. БУТРИМ¹, д-р техн. наук, А. М. АДАСКИН², канд. техн. наук,
В. В. КАШИРЦЕВ¹, канд. техн. наук, А. С. ТРУШНИКОВА¹, канд. техн. наук

¹АО «Композит», Россия, 141070, Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, д.4.
E-mail: vbutrim@kompozit-mv.ru

²ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет – СТАНКИН»,
127994, ГСП-4, Москва, Вадковский пер., д. 1. E-mail: tolia.home@list.ru

Поступила в редакцию 9.06.2023

После доработки 17.06.2023

Принята к публикации 22.06.2023

Исследовано влияние вольфрама на структуру и свойства сплава Cr–32Ni–W. Выделены характерные концентрации вольфрама: до 3%, 3–10% и более 10%, определяющие структуру сплава. Определены механические свойства сплавов. Показана область рационального применения сплава Cr–32Ni–W.

Ключевые слова: твердые растворы замещения Ni в Cr (α -фаза) и Cr в Ni (γ -фаза), σ -фаза, свойства фаз; область применения сплавов системы Cr–32Ni–W

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-96-106

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутрим В. Н., Адашкин А. М. Особенности жаропрочного сплава на основе хрома и область его применения // *Технология легких сплавов*. – 2021. – № 4. – С. 60–71.
2. Жаропрочные никелевые сплавы, получаемые методом монокристалльного литья, для деталей перспективных двигателей // *Логоунов А. В., Разумовский И. М., Ларионов В. Н. и др. // Перспективные материалы*. – 2008. – № 2. – С. 10–18.
3. Semenova E. L. Chromium–Nickel–Tungsten. Landolt-Borstein Numerical Data and Relation in Science and Technology. Group IV. Physical Chemistry. Ternary Alloy Systems. V. 11, 2010. – P. 222–239.
4. Дриц М. Е., Будберг П. Г., Бурханов Г. С., Дриц А. М., Пановко В. М. Свойства элементов. – М.: *Металлургия*, 1985. – 672 с.
5. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы. – М. *Металлургия*, 1976. – 586 с.

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
<http://www.crim-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

6. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н.П. Лякишева. Т. 2. – 1023 с.
7. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н. П. Лякишева. Т. 3, кн. 1. – 872 с.
8. Адаскин А. М., Бутрим В. Н., Сапронов Ю. И. Фазовые превращения, структура и свойства сплава Х65НВФТ на основе хрома // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – Т. 35, № 11. – С. 1475–1486.
9. Кубашевский Щ., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. – М. Металлургия, 1965. – 428 с.
10. Патент № 2 557 438 С1, МПК С22С 27/06. Жаропрочный сплав на основе хрома и способ выплавки сплава на основе хрома / Береснев А. Г., Бутрим В. Н., Каширцев В. Н., Адаскин А. М. // Бюл. № 20. – 2015.
11. Адаскин А. М., Кириллов А. К, Кутин А. А. Улучшение обрабатываемости резанем жаропрочного сплава на основе хрома // Вестник машиностроения. – 2020. – № 6. – С. 79–81.
12. Патент № 2 570 608 С1. МПК С22С 27/06. Жаропрочный сплав на основе хрома / Береснев А. Г., Бутрим В. Н., Адаскин А. М. и др. // Бюл. № 34. – 2015.
13. Хрущов М. М. Трение, износ и микротвердость материалов. – М.: URSS, 2011. – 510 с.
14. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. – Киев: Техніка, 1970. – 395 с.
15. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник. Т 1. – М.: Машиностроение, 1983. – 352 с.
16. Патент № 2 211 875 С1. МПК С 22 С 27/06. Сплав на основе хрома и изделие, выполненное из него / Каблов Е. Н., Воронин Г. М., Ефимов А. Е., Бабич Б. Н. – 2003.
17. Adaskin A. M., Grigor'ev S. N. Chromonickel Alloy for Dies Used in Hot Stamping of Hard Materials. Russian Engineering Research. – 2020. – V. 40, N 1. – P. 26–32.

УДК 669.715:539.374.6:621.78.011

ТЕРМОМЕХАНИКА ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Li

Е. А. ЛУКИНА, канд. техн. наук, А. Я. КОЧУБЕЙ, канд. техн. наук,
П. Н. МЕДВЕДЕВ, канд. физ.-мат. наук, П. Л. ЖУРАВЛЕВА

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17.
E-mail: evaluk69@gmail.com

Поступила в редакцию 21.04.2023

После доработки 22.05.2023

Принята к публикации 5.07.2023

Проведены эксперименты по плоской осадке сплавов системы Al–Cu–Li. Образцы подвергали деформации в изотермических условиях на величину $\epsilon = 55\%$ в интервалах скоростей 10^{-3} – 10^{-1} с⁻¹ и температур 400–480°С. Получены эмпирические уравнения, связывающие термомеханические параметры деформации сплавов системы Al–Cu–Li. Построена диаграмма механизмов высокотемпературной деформации сплавов системы Al–Cu–Li, указаны температурно-скоростные области действия механизмов горячей деформации и теплой деформации. Показано, что область теплой деформации на диаграмме механизмов деформации совпадает с областью динамической полигонизации на диаграмме структурных состояний, а область горячей деформации совпадает с областью частичной рекристаллизации.

Ключевые слова: плоская осадка, термомеханическое поведение, параметр Зинера–Холломона, горячая деформация, теплая деформация, диаграммы механизмов деформации

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-107-120

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов В. В., Клочкова Ю. Ю., Романенко В. А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № S. – С. 195–211. DOI: 10.18577/2071–9140-2017-0-S-195-211.

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
<http://www.crim-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

2. Антипов В. В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 5. – С. 186–194. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
3. Оглодков М. С., Щетинина Н. Д., Рудченко А. С., Пантелеев М. Д. Направления развития перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационно космической техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. – 2020. – № 1. – С. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
4. Каблов Е. Н., Дынин Н. В., Бенариев И., Щетинина Н. Д., Самохвалов С. В., Неруш С. В. Перспективные алюминиевые сплавы для паяных конструкций авиационной техники // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2021. – Т. 19, № 4. – С. 179–192.
5. Антипов В. В., Колобнев Н. И., Хохлатова Л. Б. Развитие алюминий-литиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 183–195.
6. Фридляндер И. Н., Грушко О. Е., Антипов В. В., Колобнев Н. И., Хохлатова Л. Б. Алюминий-литиевые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 309–314.
7. Антипов В. В., Серебренникова Н. Ю., Нефедова Ю. Н., Козлова О. Ю., Пантелеев М. Д., Осипов Н. Н., Клычев А. В. Технологические особенности изготовления деталей из алюминий-литиевого сплава 1441 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2018. – № 10 (70). – Ст.03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-17-26.
8. Кузнецов А. О., Оглодков М. С., Климкина А. А. Влияние химического состава на структуру и свойства сплава системы Al–Mg–Si // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2018. – № 7 (67). – Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-3-9.
9. Вайнблат Ю. М. Критические параметры горячей деформации // *Металловедение и литье легких сплавов*. – М.: Металлургия, 1977. – С. 287–300.
10. McQueen, H.J.; Spigarelli, S.; Kastner, M.E.; Evangelista, E. *Hot Deformation and Processing of Aluminum Alloys* // CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2011.
11. Щетинина Н. Д., Рудченко А. С., Селиванов А. А. Применение методов математического моделирования при разработке режимов деформации алюминий-литиевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2020. – № 8. – Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-20-34.
12. Lingfei Cao, Bin Liao, Xiaodong Wu, Chaoyang Li, Guangjie Huang, Nanpu Cheng. Hot Deformation Behavior and Microstructure Characterization of an Al–Cu–Li–Mg–Ag Alloy // *Crystals*. – 2020. – V. 10. – P. 416.
13. Кочубей А. Я., Медведев П. Н., Клочков Г. Г., Автаев В. В. Закономерности текстурообразования при плоской осадке сплава системы Al–Cu–Li // *Технология легких сплавов*. – 2016. – № 1. – С. 74–79.
14. Лукина Е. А., Кочубей А. Я., Филонова Е. В., Рабкевич М. Э. Закономерности формирования структуры в ходе рекристаллизационных процессов в сплаве В-1480 системы Al–Cu–Li при термомеханическом воздействии // *Деформация и разрушение материалов*. – 2021. – № 9. – С. 11–17.
15. Пуарье Ж. П. *Высокотемпературная пластичность кристаллических тел*. – М.: Металлургия, 1982. – 272 с.
16. Ying Deng, Zhimin Yin, Jiwu Huang. Hot deformation behavior and microstructural evolution of homogenized 7050 aluminum alloy during compression at elevated temperature // *Materials Science and Engineering A*. – 2011. – V. 528. – P. 1780–1786.
17. Чадек Й. *Ползучесть металлических материалов*. – М.: Мир, 1987. – 302 с.
18. Горелик С. С. Добаткин С. В., Капуткина Л. М. *Рекристаллизация металлов и сплавов*. Изд. 3-е. – М: МИСИС, 2005. – С. 432.
19. *Рекристаллизация металлических материалов* / Под ред. Ф. Хесснера. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.
20. Милевская Т. В., Рушиц С. В., Ткаченко Е. А., Антонов С. М. Деформационное поведение высокопрочных алюминиевых сплавов в условиях горячей деформации // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 2. – С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-3-9.

21. *Металловедение: Учебник / И. И. Новиков, В. С. Золоторевский, В. К. Портной и др. / Под ред. В. С. Золоторевского. – М.: МИСиС, 2009. – 496 с.*
22. *Рябова Е. Н., Колобнев Н. И., Хохлатова Л. Б., Оглодков М. С., Лукина Е. А., Сбитнева С. В. Алюминий-литиевый сплав нового поколения марки В-1481 для обшивки фюзеляжа // Докл. науч.-технич. конф. «Металловедение и современные разработки в области технологии литья, деформации и термической обработки легких сплавов». – М.: ФГУП «ВИАМ», 2016. – С. 8–15.*
23. *Каблов Е. Н., Лукина Е. А., Сбитнева С. В., Хохлатова Л. Б., Зайцев Д. В. Формирование метастабильных фаз при распаде твердого раствора в процессе искусственного старения Al-сплавов // Технология легких сплавов. – 2016. – № 3. – С. 7–17.*
24. *Пуарье Ж. П. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах. – М.: Мир, 1988. – 287 с.*

УДК 621.793.7

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВ СТАЛИ X15Ю5

Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук, А. Ф. ВАСИЛЬЕВ, Д. А. ГЕРАЩЕНКОВ, д-р техн. наук,
М. Е. ГОШКОДЕРЯ, Е. А. САМОДЕЛКИН, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 12.05.2023

После доработки 17.05.2023

Принята к публикации 13.06.2023

Приведены результаты исследований по разработке технологии нанесения функциональных покрытий с высокими значениями адгезионной прочности, микротвердости и стойкости к износу с использованием метода сверхзвукового холодного газодинамического напыления. В качестве исходного материала для получения таких покрытий был использован окисленный порошок из стали X15Ю5.

Ключевые слова: окисление, порошок, функциональное покрытие, адгезионная прочность, микротвердость, стойкость к износу

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-121-126

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каблов Е. Н., Бондаренко Ю. А., Колодяжный М. Ю., Сузова В. А., Нарский А. Р. Перспективы создания высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц и естественных композитов // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 4 (104). – С. 64–78.*
2. *Грачев В. И., Марголин В. И., Жабрев В. А., Тупик В. А. Основы синтеза наноразмерных частиц и пленок. – Ижевск: Удмуртия, 2014. – 480 с.*
3. *Герашенков Д. А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом холодного газодинамического напыления на основе армированных порошков системы Al–Sn+Al₂O₃ // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2015. – 24 с.*
4. *Бобкова Т. И. Разработка материалов и технологии получения износостойких градиентных покрытий на базе наноструктурированных композиционных порошков // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2017.*
5. *Рогов В. А., Соловьев В. В., Копылов В. В. Новые материалы в машиностроении: Учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 324 с.*
6. *Кузнецов П. А., Фармаковский Б. В. Методы получения наноматериалов: Справочник // Материалы для судостроения и морской техники. – 2010. – Т. 2. – С. 301–306.*
7. *Анциферов В. Н., Бобров Г. В., Дружинин Л. К. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.*

УДК 669.046.58

АНАЛИЗ БАЗАЛЬТОПОДОБНОГО ШЛАКА ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ: ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ОТХОДОВ

А. В. АРТЕМОВ, д-р хим. наук, А. В. ПЕРЕСЛАВЦЕВ, канд. техн. наук,
С. А. ВОЩИНИН, С. С. ТРЕСВЯТСКИЙ, С. В. КОРОБЦЕВ, канд. физ.-мат. наук

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва,
пл. Академика Курчатова, 1. E-mail: arsenyart@icloud.com*

Поступила в редакцию 2.05.2023

После доработки 5.06.2023

Принята к публикации 9.06.2023

Проведен анализ базальтоподобного шлака, получаемого при пиролизе отходов в высокотемпературном плазменном конвертере. С использованием различных физико-химических методов показана возможность получения из шлака базальтовых волокон. Исследовано влияние морфологического состава отходов на выход базальтоподобного шлака. С применением статистических методов получена математическая модель, связывающая выход базальтоподобного шлака с морфологическим составом отходов. Перспективным направлением использования базальтовых волокон является их применение в составе базальтовых и базальтоуглеродных композитов для создания прочностных оболочек.

Ключевые слова: плазменный пиролиз отходов, состав отходов, базальтоподобный шлак, базальтовое волокно, математическая модель, базальтовые и базальтоуглеродные композиты, прочностные оболочки

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-127-135

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемов А. В., Вошинин С. А., Переславцев А. В., Кулыгин В. М. Перспективные аспекты плазменной переработки стеклосодержащих отходов // Твердые бытовые отходы. – 2018. – № 3. – С. 39–43.
2. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В. Получение базальтовых волокон из базальтового шлака плазменной переработки отходов // Химическая технология. – 2021. – Т. 2, № 7. – С. 294–298.
3. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В. Аддитивные энергогенерирующие технологии плазменной переработки отходов: технико-экономический анализ (обзор) // Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА». – 2022. – Т. 3, № 3. – С. 227–261.
4. Каминская А. Ю. Химия и технология минерального волокна // Российский химический журнал. – 2003. – Т. 47, № 4. – С. 382–387.
5. Пугачев В. Е. Спецбазальт: базальтовые теплоизоляционные материалы и прогрессивные технологии их производства // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2007. – № 10. – С. 31.
6. Джигирис Д. Д., Махова М. Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. – М.: Теплоэнергетик. – 2002. – 416 с.
7. Крнев В. А., Бабиевская И. З., Дробот Н. Ф. Базальт – традиции и современность // Ресурсы. Технологии. Экономика. – 2005. – № 5. – С. 15–19.
8. Фомичев С. В., Дергачева Н. П., Крнев В. А. Оценка и модифицирование исходного состава габбро-базальтовых пород для получения минеральных волокон и изделий каменного литья // Неорганические материалы. – 2010. – Т. 46, № 10. – С. 1240–1245.

9. Матвеева И. Г., Лебедев М. П. Полимерные композиционные материалы на основе базальта // Химическая технология. – 2017. – Т. 18, № 6. – С. 270–272.
10. Бакулин В. Н., Гусев Е. Л., Марков В. Г. Методы оптимального проектирования конструкций из композиционных и традиционных материалов // Математическое моделирование. – 2000. – Т. 12, № 5. – С. 28–32.
11. Патент РФ 2596752. Способ получения углеродных волокнистых материалов / Живетин В. В., Зайцев М. В., Артемов А. В. Опубл. 10.09.2016 // БИ № 25.
12. Острик А. В., Слободчиков С. С. Математическая модель разрушения композитных оболочек высокого давления под действием лучистых потоков энергии // Математическое моделирование. – 1995. – Т. 7, № 10. – С. 33–46.
13. Ломазов В. А. Математическая модель тепловой диагностики композитного материала, армированного однонаправленным семейством волокон // Математическое моделирование. – 1990. – Т. 2, № 7. – С. 110–115.
14. Димитриенко Ю. И., Сборщиков С. В., Губарева Е. А. Многомасштабное моделирование высокотемпературных упругопрочностных свойств композиционных материалов на неорганической матрице // Математическое моделирование. – 2015. – Т. 27, № 11. – С. 3–20.
15. Дубовой Е., Левитин В. Композиционный материал // Популярная механика. – 2017. – № 4. – С. 19.
16. Лебедев Н. Н., Манакон М. Н., Швец В. Ф. Теория технологических процессов основного органического и нефтехимического синтеза. – М.: Химия, 1975. – 478 с.
17. Переславцев А. В., Вошинин С. А., Артемов А. В. Плазменная переработка отходов производства и потребления. Технологические процессы и оборудование, физико-химические аспекты переработки, включая опасные и радиоактивные отходы. – LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2020. – 351 с.

УДК 678.067:620.179.17

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СФЕРОПЛАСТИКОВ НА ГИДРОСТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

В. Л. ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук, В. Ю. КОСУЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, П. В. СЕРЫЙ,
С. Н. ТРОШКИН

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

Поступила в редакцию 17.04.2023

После доработки 2.05.2023

Принята к публикации 22.05.2023

Реализована регистрация акустической эмиссии в процессе разрушения сферопластика в гидростатической камере высокого давления. Аппаратное оформление не требует специализированного оборудования и выполнено на основе доступных компонентов. Синхронизация времени на графиках давления и акустической эмиссии обеспечивает фиксацию давлений, при которых начинается образование трещин в образце сферопластика. Показано, что накопление разрушений начинается при давлениях меньших, чем давления, фиксируемые как кратковременная гидростатическая прочность.

Ключевые слова: сферопластики, гидростатическая прочность, акустическая эмиссия

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-136-146

ЛИТЕРАТУРА

1. Бехер С. А., Бобров А. Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2013. – 145 с.
2. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в атомной энергетике / Под ред. К. В. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980.

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
<http://www.crism-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

3. Грешников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
4. Буйло С. И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2017. – 184 с.
5. Барат В. А., Алякритский А. Л. Статистические методы обработки сигналов акустической эмиссии и их параметров для повышения достоверности результатов контроля // Неразрушающий контроль и диагностика: Сб. тр. 17-й Российской научно-техн. конференции. – Екатеринбург, 2005.
6. Быков С. П., Юшин А. В., Скрыбиков И. Н. Вейвлет-анализ акустико-эмиссионных сигналов // Неразрушающий контроль и диагностика: Сб. тр. 17-й Российской научно-техн. конференции. – Екатеринбург, 2005.
7. Быков С. П., Юрайдо Б. Ф., Иванов В. И. О достоверности акустико-эмиссионного контроля // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12. – С. 53–60.
8. Использование метода акустической эмиссии при циклических испытаниях композиционных элементов авиационных конструкций / Л. Н. Степанова, В. Н. Чаплыгин, Е. Ю. Лебедев и др. // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 12. – С. 53–60.
9. Чернова В. В. Разработка методики акустико-эмиссионного контроля дефектов на ранней стадии их развития в изделиях из композиционных материалов / Дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2016.
10. Хорошавина С. Г. Оценка качества композиционных материалов с использованием статистической обработки сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. – 1999. – № 9. – С. 34–38.
11. Карпов Е. В. Разрушение сферопластовых образцов с различными типами концентраторов напряжений // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т. 43, № 4. – С. 170–179.
12. Косульников В. Ю., Лебедев В. Л., Трошкин С. Н., Логунова А. А. Простое аппаратное оформление методики измерения коэффициентов механических потерь // Вопросы материаловедения. – № 2 (86). – 2016. – С. 175–186.

УДК 621.791.46

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЕМ ПРИ ЭЛЕКТРОМУФТОВОЙ СВАРКЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Н. П. СТАРОСТИН, д-р техн. наук, О. А. АММОСОВА, канд. техн. наук

Институт проблем нефти и газа СО РАН – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», 677007, Якутск, ул. Автодорожная, д. 20. E-mail: ammosova_o@mail.ru

Поступила в редакцию 29.05.2023

После доработки 20.06.2023

Принята к публикации 22.06.2023

Разработана методика определения мощности нагревателя на стадии охлаждения при сварке полиэтиленовых труб для газопроводов в условиях низких температур окружающего воздуха (ниже рекомендуемых нормативными документами). Эффективность методики подтверждена исследованиями кинетики кристаллизации материалов зон термического влияния сварных соединений.

Ключевые слова: полиэтилен, сварка, низкие температуры, тепловой процесс, обратная задача, минимизация функционала, термический анализ

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-115-3-147-158

ЛИТЕРАТУРА

1. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Конечно-элементное моделирование теплового процесса и расчет параметров электрофузионной сварки полиэтиленовых труб при низких температурах // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2018. – № 2 (170). – С. 69–75.

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

<http://www.crim-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

2. Васильева М. А., Старостин Н. П. Анализ температурных полей сварки полиэтиленовых распределительных трубопроводов с помощью седлового отвода при температурах воздуха ниже нормативных // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2022. – № 1 (185). – С. 54–58.
3. Старостин Н. П., Аммосова О. А., Петров Д. Д. Управление охлаждением при электромужфтовой сварке полиэтиленовых труб при низких температурах с помощью закладного нагревателя // Сварка и диагностика. – 2022. – № 3. – С. 51–55.
4. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Румянцев С. В. Экстремальные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1988. – 288 с.
5. Алифанов О. М., Ненарокомов А. В., Салосина М. О. Обратные задачи в тепловом проектировании и испытаниях космических аппаратов. – М.: МАИ, 2021. – 158 с.
6. Авдонин Н. А. Математическое описание процессов кристаллизации. – Рига: Зинатне, 1980. – 180 с.
7. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
8. Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes / Z. Chebbo, M. Vincent, A. Boujlal, etc. // Polymer Engineering And Science. – 2015. – V. 55, N 1. – P. 123–131.
9. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука. 1977. – 656 с.
10. Brenner S., Scott L. The Mathematical Theory of Finite Element Methods. — NY: Springer-Verlag, 2008. – 400 p.
11. Алифанов О. М., Будник С. А., Ненарокомов А. В., Титов Д. М. Отработка датчиков тепловых потоков на основе методологии обратных задач // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18, № 4. – С. 7–17.
12. Шурайц А. Л., Каргин В. Ю., Вольнов Ю. Н. Газопроводы из полимерных материалов: Пособие по проектированию, строительству и эксплуатации. – Саратов: Журнал «Волга – XXI век», 2007. – 612 с.
13. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. – 4-е изд. – М.: Научный мир, 2007. – 573 с.

УДК 678.067.5:620.179.111

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКЛО- И УГЛЕВОЛОКНА МЕТОДОМ ВАШБУРНА

Р. К. САЛАХОВА, канд. техн. наук, А. В. ПАНАРИН

*Ульяновский научно-технологический центр НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ,
432010, Ульяновск, ул. Врача Михайлова, д. 34. E-mail: untcviam@viam.ru*

Поступила в редакцию 29.05.2023

После доработки 13.06.2023

Принята к публикации 15.06.2023

Для исследования поверхностных энергетических характеристик стекло- и углеволокна с применением процессорного тензиометра К-100 предложен адсорбционный метод Вашбурна (метод поднятия по капилляру) как альтернатива стандартному методу одиночного волокна. Рассмотрены особенности пробоподготовки волокнистых материалов при измерениях методом Вашбурна: способ заполнения тефлоновой трубки стекло- и углеволокном, плотность упаковки полученного капилляра и метод определения константы капиллярности. Представлены результаты измерений смачиваемости волокон в тестовых жидкостях (вода, гексан) и в растворном эпоксидном связующем УП-2227Н, проведена оценка свободной энергии поверхности (СЭП) стекло- и углеволокна и адгезия материалов к УП-2227Н. Исследовано влияние аппретирования на поверхностные энергетические характеристики стекловолокна и углеволокна, проведен сравнительный анализ полученных величин (краевой угол смачивания, СЭП, адгезия) до и после удаления замасливателей.

Ключевые слова: тензиометр К-100, стекловолокно, углеволокно, связующее, метод Вашбурна, краевого угол смачивания, свободная энергия поверхности, адгезия, аппрет, замасливатель

DOI: 10.22349/1994-6716-2022-115-3-159-169

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. – 2015. – № 1. – С. 36–39.
2. Каблов Е. Н. К 80-летию ВИАМА // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2012. – Т. 78, № 5. – С. 79–82.
3. Салахова Р. К., Тихообразов А. Б., Смирнова Т. Б., Кирилин С. Г. Химико-гальваническая металлизация угле- и стеклопластика // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 2020. – Т. 28, № 3. – С. 13–21.
4. Мишкин С. И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2022. – № 5 (111). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 16.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
5. Раскутин А. Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 5. – С. 344–348.
6. 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.
7. Салахова Р. К., Тихообразов А. Б., Смирнова Т. Б., Кирилин С. Г. Никелирование угле- и стеклопластика с целью повышения эрозионной стойкости конструкций из ПКМ // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2021. – Т. 17, № 5 (197). – С. 221–227.
8. Баранников А. А., Постнов В. И., Вешкин Е. А., Старостина И. В. Связь энергетических характеристик поверхности стеклопластика марки ВПС-53К с прочностью клеевого соединения на его основе // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2020. – № 10. Ст. 5. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 26.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.
9. Баранников А. А., Сатдинов Р. А., Вешкин Е. А., Куршев Е. В. Влияние плазмы атмосферного давления на прочность клеевого соединения на основе углепластика // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* – 2021. – № 12. Ст. 6 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 11.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-47-54.
10. Углеродные волокна / Под ред. С. М. Симамуры. – М.: Мир, 1987. – 304 с.
11. Плюдеман Э. Поверхности раздела в полимерных композитах. – М.: Мир, 1978. – 296 с.
12. Абдуллин И. Ш., Илюшина С. В. Влияние характеристик синтетических волокон на гидрофильные свойства // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2010. – № 11. – С. 565–566.
13. Воронина С. Ю., Власов А. Ю., Ворончихин В. Д., Белов О. А., Иванов А. В. Определение поверхностных свойств углеволокна в процессе контактного взаимодействия с полимерными связующими // *Журнал прикладной химии*. – 2018. – Т. 91, вып. 8. – С. 1148–1153.
14. Гуляев А. И. Измерение адгезионной прочности «волокно–матрица» с применением нанометрирования (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* – 2019. – № 3 (75). Ст. 7. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 18.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
15. Антипов Ю. В., Кульков А. А., Пименов Н. В. Полимерные композиционные материалы. Технологии и применение // *Высокомолекулярные соединения. Серия С*. – 2016. – Т. 58, № 1. – С. 29–41.
16. Салахова Р. К., Кирилин С. Г., Тихообразов А. Б., Смирнова Т. Б. Скретч-тестирование электролитических никелевых покрытий на углепластиковой подложке // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. – 2021. – Т. 20, № 4. – С. 100–114.
17. Гуляев А. И., Исходжанова И. В., Журавлева П. Л. Применение метода оптической микроскопии для количественного анализа структуры ПКМ // «Труды ВИАМ»: электрон. науч.-техн. журн. – 2014. – № 7. Ст. 7. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 18.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.

18. Достанко А. П., Коробко А. О., Завадский С. М., Кречетов Н. А. Свойства углеродных волокон, модифицированных ионно-лучевой обработкой // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2009. – Серия В, № 8. – С. 2–6.
19. Пономарева М. А., Якутенок В. А. Способ определения коэффициента поверхностного натяжения и угла смачивания по изображению капли // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (3). – С. 1048–1049.
20. Гусев К. В., Ильина И. И., Панькова С. В., Соловьев В. Г. Влияние углеродных нанотрубок на смачиваемость полимерных композитов // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. – 2021. – № 17. – С. 90–97.
21. Джефф Слоан. Аппретирующее волокно, плущение жгута и улучшение инкапсуляции // Мир гальваники. – 2019. – № 3 (45). – С. 42.
22. Abbou S., Tajiri K., Aofari K. T., Medici E. F., Haug A. T., Allen J. S. // Allen Capillary Penetration Method for Measuring Wetting Properties of Carbon Ionomer Films for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Applications // Journal of The Electrochemical Society. – 2019. – N 166 (7). – P. F.3227–F.3233.
23. Данилов В. Е., Королев Е. В., Айзенштадт А. М., Строкова В. В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса – Вендта – Рабеля – Кьельбле // Строительные материалы. – 2019. – № 11. – С. 66.
24. Зинина И. Н., Пиманов М. В. Влияние поверхностной энергии металлических образцов на прочность клеевых соединений // Известия МГТУ «МАМИ». – 2011. – № 2 (12). – С. 127–130.
25. Ершов И. П., Зенитова Л. А., Сергеева Е. А., Абдуллин И. Ш. Избирательное удаление составных компонентов замасливателя с поверхности стекловолокна // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 7. – С.179–180.
26. Курносов А. О., Вавилова М. И, Мельников Д. А. Технологии производства стеклянных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 1 (50). – С. 64–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70.
27. Валуева М. И., Зеленина И. В., Хасков М. А., Гуляев А. И. Подготовка углеродного волокна к нанесению интерфазного покрытия для композиционных материалов с керамической матрицей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2017. – № 10 (58). Ст. 5. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 26.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-9-9.

УДК 678.067

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЙ УГЛЕПЛАСТИК НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТОМ

К. А. АНДРИАНОВА, канд. техн. наук, А. А. ХАЛИКОВ, О. Н. БЕЗЗАМЕТНОВ, канд. техн. наук,
Л. М. АМИРОВА, д-р хим. наук

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ», 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10. E-mail: KAAndrianova@kai.ru

Поступила в редакцию 31.05.2023

После доработки 20.06.2023

Принята к публикации 22.06.2023

Для получения функционально-градиентных углепластиков с повышенной ударостойкостью была использована модификация эпоксидных связующих бутадиев-стирольными термоэластопластами. Изготовлены образцы и проведены сравнительные испытания углепластиков на сопротивление ударным нагрузкам, а также на сжатие после удара. Показано, что плавное изменение концентрации модификатора при переходе от внешней поверхности детали к внутренней позволяет эффективно повысить ударную прочность углепластика при сохранении жесткости композиционного материала.

Ключевые слова: эпоксидный полимер, бутадиев-стирольные термоэластопласты, композиционный материал, градиент состава, углепластик, ударная прочность, модификация

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
<http://www.crim-prometey.ru>

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

ЛИТЕРАТУРА

1. Irving P. E., Soutis C. Polymer composites in the aerospace industry. – Woodhead Publishing, 2019.
2. Мостовой А. С. Олигооксипропиленгликоль – эффективный пластификатор для эпоксидных полимеров // Вопросы материаловедения. – 2015. – №4 (84). – С.117–122.
3. Improving the toughness of thermosetting epoxy resins via blending triblock copolymers / Tao Lei, et al. // RSC Advances. – 2020. – N 10. – P. 1603–1612.
4. Водовозов Г. А., Мараховский К. М., Костромина Н. В., Осипчик В. С., Аристов В. М., Кравченко Т. П. Разработка эпокси-каучуковых связующих для создания армированных композиционных материалов // Пластмассы. – 2017. – № 5–6. – С. 9–13.
5. Ricciardi M. R., Papa I., Langella A., Langella T., Lopresto V., Antonucci V. Mechanical properties of glass fibre composites based on nitrile rubber toughened modified epoxy resin // Composites. Part B: Engineering. – 2018. – V. 139. – P. 259–267
6. Maji P., Naskar K. Styrenic block copolymer-based thermoplastic elastomers in smart applications: Advances in synthesis, microstructure, and structure – property relationships: A review // Journal of Applied Polymer Science. – 2022. – T. 139. – №. 39. – С. e52942
7. Handbook of elastomers / Bhowmick A. K., Stephens H. L. eds. – CRC Press, 2000.
8. Phase structure characterization and compatibilization mechanism of epoxy asphalt modified by thermoplastic elastomer (SBS) / Xu P. et al. // Construction and Building Materials. – 2022. – V. 320. – С. 126262.
9. Laboratory evaluation of warm-mix epoxy SBS modified asphalt binders containing / Sasobit Gong J. et al. // Journal of Building Engineering. – 2020. – V. 32. – С. 101550.
10. Chemical modification of SBS star block copolymer for templating nanostructures in epoxy resin blends / Pandit R. et al. // Materials Today: Proceedings. – 2020. – V. 29. – P. 1156–1160.
11. 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges / Saleh B. et al. // Composites Part B: Engineering. – 2020. – V. 201. – С. 108376.
12. Ballistic performance of functionally graded boron carbide reinforced Al–Zn–Mg–Cu alloy / Sharma A. et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – V. 18. – P. 4042–4059.
13. Халиков А. А., Беззаметнов О. Н., Амирова Л. М. Разработка состава ударопрочного связующего для полимерного композиционного материала // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2021. – № 4 (77). – С. 85–89.
14. ГОСТ 33495–2015. Композиты полимерные. Метод испытания на сжатие после удара.

УДК 678.073:678.746.52

**ЛЕГКИЕ ТЕРМО- И ТЕПЛОСТОЙКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ПЕНОПОЛИИМИДОВ**

К. С. ПОЛОТНЯНЩИКОВ, В. Е. ЮДИН, д-р физ.-мат. наук, В. М. СВЕТЛИЧНЫЙ, д-р хим. наук,
Г. В. ВАГАНОВ, канд. техн. наук

ФГБУН «Институт высокомолекулярных соединений РАН», 199004, Санкт-Петербург,
Большой проспект В. О., д. 31. E-mail: konstantin.polotn@gmail.com

Поступила в редакцию 2.06.2023
После доработки 7.06.2023
Принята к публикации 9.06.2023

Предложена форполимерная пенообразующая композиция на основе метилового эфира диангидрида 3,3',4,4'-бензофенонтетракарбоновой кислоты и диаминов: 4,4'-диаминодифенилметан и м-фенилендиамин для получения высокотемпературного пенополиимида. Показана возможность использования пенополиимида в качестве связующего для композиционных материалов (пенокомполитов), армированных углеродными или органическими волокнами, с низкой плотностью (0,4–1,1 г/см³) в результате вспенивания связующего в процессе формирования пенокомполита. Плотность и механические свойства пенокомполита могут варьироваться в относительно широких пределах в зависимости от объемного содержания волокна и воздушных пор. Высокая температура стеклования 260 °С в сочетании с высокой термической стабильностью углеродных или полиимидных волокон способствует сохранению механических свойств таких композитов при повышенных температурах. Температура начала потери массы пенокомполита не ниже 550 °С и зависит от вида волокнистого материала. Сочетание высокого уровня механических свойств и термической стабильности легких пенополиимидных композитов вместе с их исключительной огнестойкостью может обеспечить новые области их применения в перспективных технологиях авиа- и судостроения.

Ключевые слова: пенополиимид, пенокомполит, термическая стабильность, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-178-187

ЛИТЕРАТУРА

1. Weiser E. S., Johnson T. F., Clair T. L., Echigo Y., Kaneshiro H., Grimsley B. W. Polyimide foams for aerospace vehicles // High Performance Polymers. – 2000. – V. 12, N 1. – P. 1–12. doi.org/10.1088/0954-0083/12/1/301.
2. Li J., Zhang G., Li J., Zhou L., Jing Zh., Ma Zh. Preparation and properties of polyimide/chopped carbon fiber composite foams // Polymers for Advanced Technologies. – 2017. – V. 28, N 1. – P. 28–34. doi:10.1002/pat.3851.
3. Yan L., Fu L., Chen Y., Tian H., Xiang A., Rajulu A.V. Improved thermal stability and flame resistance of flexible polyimide foams by vermiculite reinforcement // Journal of Applied Polymer Science. – 2017. – V. 134, N 20. doi: 10.1002/APP.4482.
4. Бейдер Э. Я., Петрова Г. Н., Изотова Т. Ф., Гуреева Е. В. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды // Труды ВИАМ. – 2013. – № 11. – Ст. 01. http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=450.
5. Артемьева В. Н., Чупанс П. И., Кудрявцев В. В., Кукаркина Н. В., Кукаркин Е. Н. Влияние некоторых технологических факторов на характеристики процесса пенообразования и свойства эластичных пенополиимидов // Пластические массы. – 1995. – № 2. – С. 11–13.
6. Van Krevelen D. W. Properties of polymers. – New York: Elsevier Science Publishing Co., 1990. – 875 p.

УДК 620.193.462.21

СРАВНЕНИЕ АГРЕССИВНОСТИ СЕРОВОДОРОДНЫХ СРЕД ПО ОТНОШЕНИЮ К СТАЛЯМ В ПАРОВОЙ И ВОДНОЙ ФАЗАХ

Р. К. ВАГАПОВ, д-р техн. наук, О. Г. МИХАЛКИНА, канд. хим. наук, В. А. ЛОПАТКИН,
К. А. ИБАТУЛЛИН, канд. хим. наук, К. О. СТРЕЛЬНИКОВА, канд. хим. наук

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 142717, Московская обл., г. о. Ленинский, п. Развилка,
ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1. E-mail: R_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023

После доработки 16.06.2023

Принята к публикации 22.06.2023

Исследована коррозионная стойкость основных конструкционных сталей в сероводородсодержащих средах, применяемых на инфраструктурных объектах газовых месторождений. Определены скорости коррозии и состав образующихся продуктов коррозии, который различается в зависимости от типа среды (водная или паровая). Фазовый состав образующихся продуктов (кристаллических или рентгеноаморфных) влияет на защитную способность сталей и различается в паровой и водной средах. Установлено, что в условиях эксплуатации газового оборудования из-за конденсации влаги под непрочными продуктами коррозии образуются локальные питтинговые поражения. Выявлено, что толщина пленки сульфида железа в паровой фазе ниже, чем в водной среде. На исследованных образцах из углеродистой и низколегированной сталей появляются опасные коррозионные поражения (в виде блистерингов и растрескивания), характерные для процесса наводороживания в условиях сероводородной коррозии.

Ключевые слова: микроструктура стали, наводороживание, сульфид железа, коррозионная агрессивность, продукты коррозии, сероводородное растрескивание

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-188-201

ЛИТЕРАТУРА

1. A Study of the Pitting and Uniform Corrosion Characteristics of X65 Carbon Steel in Different H₂S-CO₂-Containing Environments / Pessu F., Hua Y., Barker R. et al. // Corrosion. – 2018. – V. 74. – P. 886–902. <https://doi.org/10.5006/2537>
2. Nejad A. M. A review of contributing parameters in corrosion of oil and gas wells // Anti-Corrosion Methods and Materials. – 2018. – N 1(65). – P. 73–78. <https://doi.org/10.1108/ACMM-03-2017-1779>
3. Alamri A. H. Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview // Engineering Failure Analysis. – 2020. – V. 116. – Article 104735. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104735>
4. Ибатуллин К. А., Вагапов Р. К. Оценка влияния различных факторов на коррозию сталей при конденсации влаги в условиях транспортировки коррозионно-агрессивного газа // Практика противо-коррозионной защиты. – 2022. – № 3(27). – С. 31–46. doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.105.3-2
5. Corrosion mechanism of X65 steel exposed to H₂S/CO₂ brine and H₂S/CO₂ vapor corrosion environments / Qin M., Liao K., He G. et al. // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2022. – V. 106. – Article 104774. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104774>
6. Кантюков Р. Р., Запечалов Д. Н., Вагапов Р. К. Оценка влияния эксплуатационных условий на стойкость сталей, применяемых в H₂S-содержащих средах на объектах добычи углеводородов // Металлург. – 2021. – № 12. – С. 24–31. DOI: 10.52351/00260827_2021_12_24
7. Вагапов Р. К. Стойкость сталей в эксплуатационных условиях газовых месторождений, содержащих в добываемых средах агрессивный CO₂ // Материаловедение. – 2021. – № 8. – С. 41–47. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-8-41-47
8. Ghosh G., Rostron P., Garg R., Panday A. Hydrogen induced cracking of pipeline and pressure vessel steels: A review // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – V. 199. – P. 609–618. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.06.018>
9. Вагапов Р. К. Исследование наводороживания и коррозии стального оборудования и трубопроводов на объектах добычи H₂S-содержащего углеводородного сырья // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 2(106). – С. 170–181. DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-170-181
10. Effect of interaction between corrosion film and H₂S/CO₂ partial pressure ratio on the hydrogen permeation in X80 pipeline steel / Zhou C., Fang B., Wang J. et al. // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2020. – № 5(55). – P. 392–399. DOI: 10.1080/1478422X.2020.1737384
11. The synergistic effect of temperature, H₂S/CO₂ partial pressure and stress toward corrosion of X80 pipeline steel / Huang X., Zhou L., Li Y. et al. // Engineering Failure Analysis. – 2023. – V. 146. – Article 107079. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107079>
12. In Situ Investigation of Hydrogen-Induced Cracking Behavior in Linepipe Steel Under Different Environments / Yasuda K., Ishikawa N., Fujishiro T. et al. // Corrosion. – 2022. – V. 78. – P. 1117–1125. <https://doi.org/10.5006/4069>
13. ГОСТ 1579–93 Проволока. Метод испытания на перегиб
14. ГОСТ 8233–56 Сталь. Эталоны микроструктуры

15. ГОСТ 5639–82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна
16. ГОСТ 5640–2020 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского
17. ГОСТ 1778–70 Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений
18. Обзор исследований коррозионно-стойких сталей на основе Fe–13%Cr: Термическая обработка, коррозионная и износостойкость / М. В. Костина, Л. Г. Ригина, В. С. Костина и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2023. – № 1 (66). – С. 8–26. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-1-8-26
19. Sensitivity to hydrogen induced cracking, and corrosion performance of an API X65 pipeline steel in H₂S containing environment: influence of heat treatment and its subsequent microstructural changes / Mousavi Anijdan S. H., Arab Gh., Sabzi M. et al. // Journal of materials research and technology. – 2021. – V. 15. – P. 1–16. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.07.118
20. Голубцов В. А., Рябчиков И. В., Мизин В. Г. Влияние химически активных элементов на водородное растрескивание стали для труб // Сталь. – 2016. – № 3. – С. 50–53.
21. Effects of Mn and Microalloying Composition on Corrosion and Hydrogen-Induced Cracking of API 5L X65 Steels / Quispe-Avilés J. M., Pereira Fiori M. A., Hincapie-Ladino D. et al. // Corrosion. – 2022. – V. 78. – P. 765–777. <https://doi.org/10.5006/3876>
22. Амежнов А. В., Родионова И. Г. Влияние химического и фазового состава неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей в водных средах, характерных для условий эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов // Металлург. – 2019. – № 7. – С. 15–30.
23. Corrosion behavior of low alloy steel used for new pipeline exposed to H₂S-saturated solution / Liu Z., Wang Y., Hai Y. et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – N 77(47). – P. 33000–33013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.203>
24. Вагапов Р. К. Анализ влияния агрессивных факторов и условий на состав коррозионных продуктов // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 3(111). – С. 85–97. DOI:10.22349/1994-6716-2022-111-3-85-97
25. Silva S. C., Silva A. B., Ponciano Gomes J. A. C. Hydrogen embrittlement of API 5L X65 pipeline steel in CO₂ containing low H₂S concentration environment // Engineering Failure Analysis. – 2021. – V. 120. – Article 105081. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105081>
26. Использование дифракционного метода анализа для оценки размера и структуры наночастиц на примере GdS / Г. И. Гринь, А. М. Панчева, П. А. Козуб и др. // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – № 4. – С. 149 – 152.
27. Михалкина О. Г., Федоров П. П., Андреев П. О. Получение соединений редкоземельных элементов с использованием сульфидов // Химическая технология. – 2011. – № 12. – С. 706–710.
28. Film former corrosion inhibitors for oil and gas pipelines – A technical review / Askari M., Aliofkhaezrai M., Ghaffari S. et al. // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – V. 58. – P. 92–114. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.07.025
29. Tsygankova L. E., Uryadnikov A. A., Abramov A. E., Semenyuk T. V. Inhibiting formulations against hydrogen sulfide corrosion of carbon steel // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2022. – N 1(11). – P. 102–110. DOI:10.17675/2305-6894-2021-11-1-5
30. Irvani D., Esmaeili N., Guo L., Akbarinezhad E. Experimental and computational study of aromatic ring effects on corrosion inhibition in the H₂S media // Materials Today Communications. – 2023. – V. 35. – Article 105559. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105559>
31. Кузнецов Ю. И., Вагапов Р. К. Об ингибировании сероводородной коррозии стали летучими азотсодержащими основаниями // Защита металлов. – 2002. – № 3(38). – С. 244–249
32. Iron sulphide formation and interaction with corrosion inhibitor in H₂S-containing environments / Pessu F., Barker R., Chang F. et al. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 207. – Article 109152. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109152

УДК 669.14.018.8:621.039.531:620.194.2

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ ОБЛУЧЕННОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 07X12NMФБ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДНОЙ СРЕДЕ. Часть 1. Проведение автоклавных испытаний

Б. З. МАРГОЛИН¹, д-р техн. наук, Н. Е. ПИРОГОВА¹, канд. техн. наук,
А. А. СОРОКИН¹, канд. техн. наук, В. И. КОХОНОВ¹, А. В. ДУБ², д-р техн. наук,
И. А. САФОНОВ², канд. техн. наук

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

²Частное учреждение по обеспечению научного развития атомной отрасли «Наука и инновации», 119017, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 44с4

Поступила в редакцию 4.05.2023

После доработки 20.07.2023

Принята к публикации 23.08.2023

Проведены исследования коррозионного растрескивания облученной до повреждающей дозы нейтронов ~ 12 сна нержавеющей ферритно-мартенситной стали с содержанием хрома 12%, выбранной в качестве кандидатного материала для внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР-СКД. Испытания на коррозионное растрескивание проводили в автоклавах с водой сверхкритических параметров (при температуре 450°C и давлении 250 атм), имитирующей теплоноситель I контура ВВЭР-СКД, на специально разработанных миниатюрных дисковых образцах при постоянной нагрузке. Поддержание нагрузки обеспечивалось посредством разработанных компактных нагружающих устройств. Размеры нагружающих устройств позволяют одновременно размещать в автоклаве до девяти устройств и испытывать в одинаковой среде несколько образцов при разных нагрузках. В первой части настоящей работы рассчитаны нагрузки, обеспечивающие растягивающие напряжения на рабочей поверхности образца в диапазоне $\sim 0,3\sigma_{0,2} - 0,7\sigma_{0,2}$, и проведены автоклавные испытания в воде со сверхкритическими параметрами.

Ключевые слова: ферритно-мартенситная нержавеющая сталь, реактор ВВЭР-СКД, облучение, коррозионное растрескивание, автоклавные испытания

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-202-216

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов П. Л. Сверхкритические параметры – будущее реакторов с водным теплоносителем и АЭС. Обзор // Атомная техника за рубежом. – 2001. – № 6. – С. 3–8.
2. Баранаев Ю. Д., Кириллов П. Л., Поплавский В. М., Шарапов В. Н. Ядерные реакторы на воде сверхкритического давления // Атомная энергия. – 2004. – Т. 94, вып. 5. – С. 374–380.
3. Долгов В. В. Энергоблоки на основе ВВЭР с закритическими параметрами теплоносителя. – Атомная энергия. – 2002. – Т. 92, вып. 4. – С. 277–280.
4. Corrosion and stress corrosion cracking in supercritical water / Was G. S. Ampornrat P., Gupta G. et al. // Journal of Nuclear Materials. – 2007. – V. 371. – P. 176–201.
5. Huang, Y., Zang, J., Kim-Hung Leung, L. Super-Critical Water-Cooled Reactor (SCWR), 2021.
6. Глебов А. П., Клушин А. В. Реактор с быстро-резонансным спектром нейтронов, охлаждаемый водой сверхкритического давления при двухходовой схеме движения теплоносителя // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100, вып. 5. – С. 349–355.
7. Guzonas D., Novotny R., Penttillä S., Toivonen A., Zheng W. Materials and Water Chemistry for Supercritical Water-cooled Reactors. – Elsevier, 2018.
8. Corrosion resistance of candidate cladding materials for supercritical water reactor / Guo Xianglong, Fan Yi, Gao Wenhua et al. // Annals of Nuclear Energy. – 2019. – V. 127. – P. 351–363.
9. Guzonas D., Novotny R. Supercritical water-cooled reactor materials – Summary of research and open issues // Progress in Nuclear Energy. – 2014, V. 77, P. 361–372.
10. SCC and corrosion evaluations of the F/M steels for a supercritical water reactor / Hwang Seong Sik, Lee Byung Hak, Kim Jung Gu et al. // Journal of Nuclear Materials 2008, 372, 177–181.

11. Progress in corrosion resistant materials for supercritical water reactors / Sun Chunwen, Hui Rob, Qu Wei et al. // *Corrosion Science* 2009, 51, 2508–2523.
12. Teyseyre S. Corrosion issues in supercritical water reactor (SCWR) systems, 2012 https://www.researchgate.net/publication/285986817_Corrosion_issues_in_supercritical_water_reactor_SCWR_systems.
13. Muthukumar, N., Lee, J. H., Kimura A. SCC behavior of austenitic and martensitic steels in supercritical pressurized water // *Journal of Nuclear Materials*. – 2011. – N 417. – P. 1221–1224.
14. Ampornrat Pantip, Gupta Gaurav, Was Gary S. Tensile and stress corrosion cracking behavior of ferritic–martensitic steels in supercritical water // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – V. 395. – P. 30–36.
15. Was G. S., Teyseyre S. Stress Corrosion Cracking and Corrosion of Candidate Alloys for the Supercritical Water Reactor // Final Report to U.S. Department of Energy, Idaho National Laboratory, project #0003852, September 30, 2008.
16. Teyseyre S., Was G. S. Stress Corrosion Cracking of Neutron Irradiated Steel in Supercritical Water // 13th International Conference on Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors / Ed. T. R. Allen, J. Busby and P. J. King. – Toronto, Canadian Nuclear Society, 2007.
17. Zinkle S. J., Was G. S. Materials challenges in nuclear energy // *Acta Materialia*. – 2013. – N 61, P. 735–758.
18. Kofstad P. High temperature corrosion. – Amsterdam, Elsevier, 1988.
19. Margolin B., Sorokin A., Pirogova N. Analysis of mechanisms inducing corrosion cracking of irradiated austenitic steels and development of a model for prediction of crack initiation // *Engineering Failure Analysis*. – 2020. – N 107. – 104235.
20. Arioka K., Yamada T., Terachi T. Influence of Carbide Precipitation and Rolling Direction on Intergranular Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Hydrogenated High-Temperature Water // *Corrosion*. – 2006. – N 62. – P. 568–572.
21. Lozano-Perez S., Yamada T., Terachi T. Multi-scale characterization of stress corrosion cracking of cold-worked stainless steels and the influence of Cr content // *Acta Mater*. – 2009. – N 57. – P. 5361–5381.
22. Nishioka H., Fukuya K., Fujii K., Torimaru T. IASCC Initiation in Highly Irradiated Stainless Steels under Uniaxial Constant Load Conditions // *J. Nucl. Sci. Technol*. – 2008. – V. 45 (10) . – P. 1072–1077.
23. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюрёв В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание под напряжением нержавеющей сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970.
24. Logan H. L. Stress Corrosion of Metals. – John Wiley & Sons Inc., 1967.
25. Was G. S., Farkas D., Robertson I. M. Micromechanics of dislocation channeling in intergranular stress corrosion crack nucleation // *J. Nucl. Mater*. – 2012. – N 16. – P. 134–142.
26. Karlsen W., Diego G., Devrient B. Localized deformation as a key precursor to initiation of intergranular stress corrosion cracking of austenitic stainless steels employed in nuclear power plants // *J. Nucl. Mater*. – 2010. – N 406. – P. 138–151.
27. Jiao Z., Was G. S. Localized deformation and IASCC initiation in austenitic stainless steels // *J. Nucl. Mater*. – 2008. – V. 382. – P. 203–209.
28. Fukuya K. Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials // *J. Nucl. Sci. Technol*. – 2013. – N 50 (3). – P. 213–254.
29. Ernestova M. Influence of the Neutron Spectrum on the Sensitivity to IASCC and Microstructure of CW 316 Material // Proceedings of the 8th International Symposium Fontevraud 8, Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs Safety, Performance and Reliability; SFEN 2014.
30. Hashimoto N., Kasada R., Raj B., Vijayalakshmi M. Radiation Effects in Ferritic Steels and Advanced Ferritic-Martensitic Steels. *Comprehensive Nuclear Materials (Second Edition)*. – 2020. – N 3. – P. 226–254.

31. Takakura K., Nakata K., Fujimoto K., Sakima K., Kubo N. IASCC properties of cold worked 316 stainless steel in PWR primary water // Proc. of 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems. – 2009. – P. 1207–1218.
32. Bosch R.W., Vankeerberghen M., Gérard R. Crack initiation testing of thimble tube material under PWR conditions to determine a stress threshold for IASCC // J. Nucl. Mater, 2015, 461, 112–121.
33. Du D., Sun K., Was G. S. IASCC of neutron irradiated 316 stainless steel to 125 dpa // Materials Characterization. – 2021. – N 173. – 110897.
34. ГОСТ 50753–95. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из специальных сталей и сплавов.
35. Effect of temperature and dissolved oxygen on stress corrosion cracking behavior of P92 ferritic-martensitic steel in supercritical water environment / Zhang Z., Hu Z.F., Zhang L.F. et al. // J. Nucl. Mater. – 2018. – N 498. – P. 89–102.