

ЖУРНАЛ «ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ»,
2020, № 3 (103)
СОДЕРЖАНИЕ

Журналу «Вопросы материаловедения» 25 лет	5
МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ	
<i>Зисман А. А., Золоторевский Н. Ю., Петров С. Н., Хлусова Е. И., Яшина Е. А.</i> Локальный текстурный анализ неоднородностей структуры в низкоуглеродистой высокопрочной стали после закалки с прокатного нагрева	9
<i>Иванов Ю. Ф., Кормышев В. Е., Громов В. Е., Юрьев А. А., Глезер А. М., Рубанникова Ю. А.</i> Механизмы упрочнения металла рельсов при длительной эксплуатации	17
<i>Бердник О. Б., Царева И. Н., Кривина Л. А., Кириков С. В., Герасимов С. И., Ерофеев В. И., Чегуров М. К.</i> Влияние структурной неоднородности на стойкость стальных шариков к ударным нагрузкам	29
<i>Леонов В. П., Чудаков Е. В., Малинкина Ю. Ю., Третьякова Н. В., Петров С. Н., Цеменко А. В., Васильева Е. А.</i> Исследование особенностей распределения рутения в титановых α -, псевдо- α - и псевдо- β -сплавах и влияние его на коррозионную стойкость	39
<i>Оленин М. И., Горынин В. И., Туркбоев А., Махорин В. В.</i> Повышение кратковременных механических свойств никелевых сплавов марок СЛЖС5-ВИ и ЖС32-ВИ за счет программного упрочнения, совмещенного с процессом старения	53
<i>Дегтярева С. П.</i> Термоциклические испытания с применением образцов корсетной формы – перспективный метод исследования термической усталости изделий	61
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
<i>Бобкова Т. И., Григорьев А. А., Жиров Д. С.</i> Разработка композиционных порошков и покрытий для защиты и восстановления изделий, претерпевающих существенное температурное воздействие в процессе эксплуатации	70
<i>Медведев Р. П., Скрылёв А. В.</i> Технологические особенности получения люминофорного пигмента для лакокрасочных материалов из фосфогипса	79
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
<i>Валуева М. И., Зеленина И. В., Жаринов М. А., Хасков М. А.</i> Высокотемпературные углепластики на основе термореактивного полиимидного связующего	89
<i>Войнов С. И., Зеленина И. В., Валуева М. И., Гуляев И. Н.</i> Определение метода испытаний на сжатие высокотемпературных углепластиков	103
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ	
<i>Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Мизецкий А. В.</i> О формулировке локального критерия хрупкого разрушения для прогнозирования трещиностойкости высокопрочной стали	114
РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
<i>Марголин Б. З., Варовин А. Я., Минкин А. И., Гурин Д. А., Глухов В. А.</i> Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет. Часть 1. Программа исследований и вырезка трепанов из ВКУ	135
<i>Пирогова Н. Е., Джаландинов А. Д., Марголин Б. З., Деркач Р. В., Минкин А. И.</i> Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет. Часть 2. Расчетно-экспериментальное определение флюенса быстрых нейтронов и повреждающей дозы	144
<i>Кулешова Е. А., Федотова С. В., Гурович Б. А., Фролов А. С., Мальцев Д. А., Марголин Б. З., Минкин А. И., Сорокин А. А.</i> Исследование состояния металла внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР после эксплуатации в течение 45 лет. Часть 3. Микроструктура и фазовый состав	157

Ларионов В. В., Варлачев В. А. Исследование изменения свойств титановых сплавов, подвергнутых нейтронному облучению..... 181

ХРОНИКА

Орыщенко А. С., Цуканов В. В., Савичев С. А., Нигматулин О. Э. Противоснарядная броня для тяжелых танков серии «ИС». Танк ИС-3 188

Памяти Бориса Евгеньевича Патона 201

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов 203

**ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕКСТУРНЫЙ АНАЛИЗ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СТРУКТУРЫ
В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ
ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ С ПРОКАТНОГО НАГРЕВА**

А. А. ЗИСМАН^{1,2}, д-р физ.-мат. наук, Н. Ю. ЗОЛОТОРЕВСКИЙ², канд. физ.-мат. наук,
С. Н. ПЕТРОВ^{1,2}, канд. хим. наук, Е. И. ХЛУСОВА^{1,2}, д-р техн. наук, Е. А. ЯШИНА¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург,
Шпалерная ул., 49, E-mail: npk3@crism.ru

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

Поступила в редакцию 18.06.2020

После доработки 2.07.2020

Принята к публикации 7.07.2020

Ускоренное охлаждение высокопрочных сталей непосредственно после горячей прокатки эффективно с экономической точки зрения, так как позволяет исключить их закалку с печного нагрева. Однако после такой обработки материал обладает структурными особенностями, которые требуют специального анализа. В частности, после закалки с прокатного нагрева (ЗПН) могут наблюдаться полосы грубой бейнитной структуры, вызывающие снижение ударной вязкости. Для выявления зависимости таких эффектов от особенностей деформации аустенита методом EBSD были проанализированы локальные текстуры, которые с учетом межфазных ориентационных соотношений позволяют восстановить исходные текстуры γ -фазы. Согласно полученным результатам, неблагоприятные структурные неоднородности возникают после ЗПН из-за чрезмерного наклепа аустенита на финальной стадии прокатки, но могут быть устранены с помощью печной закалки.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, аустенит, текстура, ориентационное соотношение, EBSD

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-09-16

ЛИТЕРАТУРА

1. Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels / C. Garcia De Andres, M. J. Bartolome, C. Capdevila et al. // *Materials Characterization*. – 2001. – V. 35. – P. 389–398.
2. Cayron C., Artaud B., Briottet L. Reconstruction of parent grains from EBSD data // *Materials Characterization*. – 2006. – V. 57, Is. 4–5. – P. 386–401.
3. Zisman A. A., Kolomoets D. R., Zolotorevsky N. Yu., Petrov S. N. Extraction of prior grain boundaries from interfaces of martensite based on particular statistics for inter-variant disorientations // *Letters on Materials*. – 2018. – V. 8(4). – P. 448–453.
4. Влияние размера зерна и деформационной субструктуры аустенита на кристаллогеометрические особенности бейнита и мартенсита низкоуглеродистых сталей / Н. Ю. Золоторевский, А. А. Зисман, С. Н. Панпурин и др. // *МирТом*. – 2013. – № 10. – С. 39–48.
5. Morris J. W. On the Ductile-Brittle Transition in Lath Martensitic Steel // *ISIJ International*. – 2011. – V. 51(10). – P. 1569–1575.
6. Bernier N., Bracke L., Malet L., Godet S. Crystallographic Reconstruction Study of the Effects of Finish Rolling Temperature on the Variant Selection During Bainite Transformation in C–Mn High-Strength Steels // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2014. – N 45. – P. 5937–5955.
7. Jonas J. J. Transformation Textures Associated With Steel Processing // *Microstructure and Texture in Steels* / Eds. A. Haldar, S. Suwas, D. Bhattacharjee. – Springer, New York, 2009. – P. 3–17.

8. Zolotorevsky N., Kazakova E., Kazakov A., Petrov S., Panpurin S., Investigation of the Origin of Coarse-Grained Bainite in X70 Pipeline Steels by EBSD Technique // Materials Performance and Characterization. – 2017. – V. 6, N 3. – P. 281–291.
9. Bhadeshia H. K. D. H., Honeycombe R. Steel microstructure and properties. – Amsterdam: Elsevier, 2006.
10. Cayron C., Baur A., Loge R. Intricate morphologies of laths and blocks in low-carbon martensitic steels // Materials and Design. – 2018. – V. 154. – P. 81–95.
11. Bain E. C. The Nature of Martensite // Trans. AIME. – 1924. – V. 70. – P. 25–35.
12. Bunge H.-J. Texture Analysis in Materials Science. – Butterworth's, 1982.
13. Bachmann F., Hielscher R., Schaeben H. Grain detection from 2d and 3d EBSD data – Specification of the MTEX algorithm // Ultramicroscopy. – 2011. – V. 111. – P. 1720–1733.

УДК 669.14.018.294.2:539.2:621.787

МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю. Ф. ИВАНОВ¹, д-р физ.-мат. наук, В. Е. КОРМЫШЕВ², канд. техн. наук,
В. Е. ГРОМОВ², д-р физ.-мат. наук, А. А. ЮРЬЕВ³, канд. техн. наук,
А. М. ГЛЕЗЕР⁴, д-р физ.-мат. наук, Ю. А. РУБАННИКОВА²

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

²ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», 654007,
Новокузнецк, ул. Кирова, 42, E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

³АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», 654043,
Новокузнецк, Космическое шоссе, 19

⁴Институт металловедения и физики металлов ГНЦ РФ «ЦНИИ черной металлургии
им. И.П. Бардина», 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 9/23

Поступила в редакцию 24.07.2020

После доработки 28.08.2020

Принята к публикации 31.08.2020

На основании выявленных методами современного физического материаловедения закономерностей формирования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов на различной глубине (до 10 мм): в головке рельсов по центральной оси и по оси симметрии выкружки в исходном состоянии и после различных сроков экстремальной эксплуатации (пропущенный тоннаж 691,8 и 1411 млн. т брутто) выполнен количественный сравнительный анализ механизмов упрочнения поверхностных слоев рельсов. Оценены вклады в упрочнение, обусловленные трением решетки матрицы, внутрифазными границами, дислокационной субструктурой, присутствием карбидных частиц, внутренними полями напряжений, твердорастворным упрочнением перлитной составляющей структуры стали.

Ключевые слова: механизмы упрочнения, структура, фазовый состав, рельсы, эксплуатация

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-17-28

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Gromov V. E., Ivanov Yu. F., Yuriev A. B., Morozov K. V. Microstructure of quenched rails. – Cambridge, CISPLtd, 2016. – 153 p.
3. Природа поверхностного упрочнения дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, А. А. Юрьев и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2018. – № 4. – С. 67–85.

4. Эволюция структуры и свойств дифференцированно закаленных рельсов в процессе длительной эксплуатации / В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, А. А. Юрьев и др. // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2017. – Т. 39, № 12. – С. 1599–1646.
5. Ivanisenko Yu., Fecht H. J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels // *Steel tech*. – 2008. – V. 3, № 1. – P. 19–23.
6. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Souvage X., Valiev R. Z., Fecht H. J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite // *Acta Mater*. – 2006. – V. 54. – P. 1659–1669.
7. Lewis R., Christoforou P., Wang W. J., Beagles A., Burstow M., Lewis S. R. Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project) // *Wear*. – 2019. – V. 430–431. – P. 383–392.
8. Skrypnik R., Ekh M., Nielsen J. C. O., Pålsson B. A. Prediction of plastic deformation and wear in railway crossings – Comparing the performance of two rail steel grades // *Wear*. – 2019. – V. 428–429. – P. 302–314.
9. Kim D., Quagliato L., Park D., Kim N. Lifetime prediction of linear slide rails based on surface abrasion and rolling contact fatigue-induced damage // *Wear*. – 2019. – V. 420–421. – P. 184–194.
10. Huang Y. B., Shi L. B., Zhao X. J., Cai Z. B., Liu Q. Y., Wang W. J. On the formation and damage mechanism of rolling contact fatigue surface cracks of wheel/rail under the dry condition // *Wear*. – 2018. – V. 400–401. – P. 62–73.
11. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Кормышев В.Е., Глезер А.М. Структура и свойства рельсов после экстремально длительной эксплуатации // *Вопросы материаловедения*. – 2020. – № 2(102) . – С. 30-39.
12. Пикеринг Ф. Б. Физическое материаловедение и обработка сталей. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.
13. Конева Н. А., Киселева С. Ф., Попова Н. А. Эволюция структуры и внутренние поля напряжений. Аустенитная сталь. – Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing. – 2017. – 145 с.
14. Yao M. J., Welsch E., Ponge D., Haghghat S. M. H., Sandlöbes S., Choi P., Herbig M., Bleskov I., Hickel T., Lipinska-Chwalek M., Shantraj P., Scheu C., Zaeferrer S., Gault B., Raabe D. Strengthening and strain hardening mechanisms in a precipitation-hardened high-Mn lightweight steel // *Acta Materialia*. – 2017. – V. 140. – P. 258–273.
15. Тушинский Л. И., Батаев А. А., Тихомирова Л. Б. Структура перлита и конструктивная прочность стали. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. – 280 с.
16. Беленький Б. З., Фарбер Б. М., Гольдштейн М. И. Оценки прочности малоуглеродистых низколегированных сталей по структурным данным // *ФММ*. – 1975. – Т. 39, № 3. – С. 403–409.
17. Sieurin H., Zander J., Sandström R. Modelling solid solution hardening in stainless steels // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2006. – V. 415. – P. 66–71.
18. Прнак Т. Количественные соотношения между параметрами дисперсных выделений и механическими свойствами сталей // *Металловедение и термическая обработка стали*. – 1979. – № 7. – С. 3–8.
19. Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Глезер А.М. Структура дифференцированно закаленных рельсов при интенсивной пластической деформации // *Деформация и разрушение материалов*. – 2020. – № 8. – С. 16–20.
20. Kormyshev V. E., Gromov V. E., Ivanov Yu. F., Glezer A. M., Yuriev A. A., Semin A. P., Sundeev R. V. Structural phase states and properties of rails after long-term operation // *Materials Letters*. – 2020. – V. 268. – P. 127, 499.

21. Кормышев В. Е., Полевой Е. В., Юрьев А. А., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф. Формирование структуры дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при длительной эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 108–115.

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

УДК 669.018.24:539.422.22:620.192

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА СТОЙКОСТЬ СТАЛЬНЫХ ШАРИКОВ К УДАРНЫМ НАГРУЗКАМ

О. Б. БЕРДНИК¹, канд. техн. наук, И. Н. ЦАРЕВА¹, канд. физ.-мат. наук,
Л. А. КРИВИНА¹, канд. физ.-мат. наук, С. В. КИРИКОВ¹, С. И. ГЕРАСИМОВ^{1,2}, д-р физ.-мат. наук,
В. И. ЕРОФЕЕВ¹, д-р физ.-мат. наук, М. К. ЧЕГУРОВ³, канд. техн. наук

¹ФГБУН «Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН)» – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской академии наук» (ФИЦ ИПФ РАН), 603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, E-mail: imsh@sinn.ru

²ФГАОУ ВО «Саровский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (СарФТИ НИЯУ МИФИ), 607186, Нижегородская обл., Саров, ул. Духова, 6, корп. 1

³ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (НГТУ)», 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, корп. 1

Поступила в редакцию 11.08.2020

После доработки 14.08.2020

Принята к публикации 17.08.2020

При проведении ударных испытаний защитных стекол с применением шариков, изготовленных из подшипниковой стали ШХ15, зафиксированы неединичные случаи их разрушения. В работе была решена задача по определению причин их разрушения. Методами фрактографического и металлографического анализов, измерения твердости и микротвердости исследовано состояние материала. В структуре металла всех шариков критических дефектов типа флокенов, раковин и микротрещин обнаружено не было, но выявлено наличие мелкоигольчатого мартенсита с избыточными карбидами. Установлено, что обнаруженные структурные особенности приводят к повышению твердости материала, снижению пластичности и появлению склонности к хрупкому разрушению. По результатам оценочных расчетов коэффициента пластичности, для предотвращения хрупкого разрушения шариков и обеспечения запаса пластичности стали ШХ15 при высоких ударных нагрузках необходимо ограничить максимальную твердость материала HV критическим значением 5,70 ГПа (54 HRC), соответствующим коэффициенту пластичности $\delta_H = 0,8$.

Ключевые слова: шарики из подшипниковой стали ШХ15, ударные испытания, разрушение, трещина, микроструктура, карбидная неоднородность, твердость, микротвердость, коэффициент пластичности

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-29-38

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 801–78. Сталь подшипниковая. Технические условия.
2. ГОСТ 21022–75. Сталь хромистая для прецизионных подшипников. Технические условия.
3. Галлямова Р. Р., Караваева М. В., Зарипов Н. Г. Влияние предварительного отпуска на структуру и свойства подшипниковой стали после равноканального углового прессования // XI Международная научно-техническая уральская школа-семинар молодых ученых-металловедов. – Екатеринбург, 2010. – С. 148–150.
4. Фридман Я. Б. Анализ и строение изломов. – М.: Машгиз, 1960. – 128 с.

5. Чегуров М. К., Сорокина С. А. Основы фрактографического анализа изломов образцов из конструкционных сплавов: учеб. пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2018. – 83 с.

6. Мильман Ю. В., Голованов Б. А., Чугунова С. И. Характеристики пластичности, получаемые при измерении твердости. – Киев, 1992. – 25 с.

7. Мильман Ю. В., Чугунова С. И., Гончарова И. В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – № 4. – С. 182–187.

8. Рудницкий В. А., Крень А. П., Ланцман Г. А. Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования // Литье и металлургия. – 2017. – № 2(87). – С. 81–87.

9. Мильман Ю. В., Чугунова С. И., Гончарова И. В. К вопросу определения пластичности материалов методом индентирования // Электронная микроскопия и прочность материалов. Сер.: Физическое материаловедение, структура и свойства материалов. – 2008. – Вып. 15. – С. 3–10. Режим до-ступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/empm_2008_15_3.

10. Семев К. М., Медведева С. В., Васильев Е. А. Рекомендации по определению дефектов термической обработки подшипникового производства // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 12 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/12/75694> (дата обращения: 02.02.2020).

УДК 669.295:620.193

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РУТЕНИЯ В ТИТАНОВЫХ α -, ПСЕВДО- α - И ПСЕВДО- β -СПЛАВАХ И ВЛИЯНИЕ ЕГО НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, Е. В. ЧУДАКОВ, канд. техн. наук, Ю. Ю. МАЛИНКИНА,
Н. В. ТРЕТЬЯКОВА, С. Н. ПЕТРОВ, канд. техн. наук, А. В. ЦЕМЕНКО, Е. А. ВАСИЛЬЕВА

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

Поступила в редакцию 13.07.2020

После доработки 21.08.2020

Принята к публикации 27.08.2020

Исследована структура деформированных полуфабрикатов (поковок) из титановых сплавов систем Ti–Al–Zr + 0,15%Ru, Ti–Al–V–Mo + 0,15%Ru, Ti–Al–V–Cr–Fe–Mo + 0,15%Ru. Представлены основные механические свойства, микроструктура, результаты локального элементного и фазового анализов, полученных с использованием рентгеноспектрального микроанализа и дифракции обратно рассеянных электронов, а также модель влияния рутения на повышение коррозионной стойкости титановых сплавов различных классов.

Ключевые слова: теплообменное оборудование, титановые сплавы, распределение рутения, коррозионная стойкость, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-39-52

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонов В. П., Копылов В. Н., Лукьянова Т. А., Мартынов К. Г., Ртищева Л. П., Штуца М. Г., Карпов Ю. С. Освоение производства горячедеформированных труб из титановых сплавов в АО «ЧМЗ» // Титан. – 2015. – № 4 (50). – С. 37; С. 52.

2. Орыщенко А. С., Леонов В. П., Копылов В. Н., Ртищева Л. П., Мартынов К. Г. Современное состояние производства и применение труб из титановых сплавов в атомной энергетике и судостроении // Титан. – 2018. – № 3 (61). – С. 21; С. 60.

3. Леонов В. П., Копылов В. Н., Ртищева Л. П., Штуца М. Г., Смирнов В. Г., Карпов Ю. С. Разработка и освоение производства холоднодеформированных труб из титановых сплавов в ОАО «ЧМЗ» // Титан. – 2014. – № 3(45). – С. 17–18.
4. Климов Ю. С., Сердюк О. Ф. Повышение надежности паротурбинной установки атомного ледокола при использовании замкнутой водовоздушной системы охлаждения // Судостроение. – 1992. – № 2. – С. 17–18.
5. Пашин В. М. Проблемы, требующие неотложного решения // Судостроение. – 2010. – № 6. – С. 3–8.
6. Кашка М. М., Мантула Н. В., Пономатенко А. В. Опыт и перспективы эксплуатации в Арктике атомного ледокольного флота России // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 3(7). – С. 110.
7. Scherbinin V. F., Leonov V. P., Malinkina Yu. Yu. Increase in corrosion resistance of titanium alloy in concentrated aqueous solutions of chlorides at high temperatures // Inorganic materials: Applied research. – 2013. – V. 4, № 6. – P. 537–541.
8. Leonov V. P., Chudakov E. V., Malinkina Yu. Yu. The influence of micro additives of Ru on the structure, corrosive-mechanical strength and fractography of destruction of pseudo-alpha-Ti alloys // Inorganic materials: Applied research. – 2017. – V. 8, № 4. – P. 556–565.
9. Малинкина Ю. Ю. Использование рутения для повышения коррозионной стойкости в агрессивных средах промышленных сплавов титана // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 1 (65). – С. 162–166.
10. Леонов В. П., Чудаков Е. В., Кулик В. П., Малинкина Ю. Ю., Третьякова Н. В. Влияние коррозионно-активной среды на вязкость разрушения титановых сплавов псевдо- β класса // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 6. – С. 24–33, электронный журнал www.materialsnews.ru
11. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшкин И. С. Титановые сплавы. Состав. Структура. Свойства. Справочник. – М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. – С. 520.
12. Авиационные материалы. Т. 6: Титановые сплавы / Под ред. акад. РАН Е. Н. Каблова. – М.: 2010. – С. 95.
13. Томашов Н. Д. Титан и коррозионно-стойкие сплавы на его основе. – М.: Металлургия, 1985. – С. 80.
14. Раевская М. В., Соколовская Е. М. Физикохимия рутения и его сплавов. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1979. – С. 229.

УДК 669.245:539.389.3:621.785.5

ПОВЫШЕНИЕ КРАТКОВРЕМЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ МАРОК СЛЖС5-ВИ И ЖС32-ВИ ЗА СЧЕТ ПРОГРАММНОГО УПРОЧНЕНИЯ, СОВМЕЩЕННОГО С ПРОЦЕССОМ СТАРЕНИЯ

М. И. ОЛЕНИН, д-р техн. наук, В. И. ГОРЫНИН, д-р техн. наук, А. ТУРКБОЕВ, д-р техн. наук,
В. В. МАХОРИН

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

Поступила в редакцию 10.07.2020

После доработки 27.08.2020

Принята к публикации 28.08.2020

Рассмотрен способ повышения механических свойств никелевых монокристаллических сплавов марок СЛЖС5-ВИ и ЖС32-ВИ, используемых для лопаток газовых турбин, путем программного упрочнения, совмещенного со старением. Определены механические свойства сплавов после гомогенизации, закалки и старения, совмещенного с программным упрочнением.

Ключевые слова: лопатки газовых турбин, никелевые монокристаллические сплавы, механические свойства, программное упрочнение, старение

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-53-60

ЛИТЕРАТУРА

1. Гиндин И. А. Неклюдов И. М. Физика программного упрочнения. – Киев.: Наук. думка, 1979. – 184 с.
2. Кондратов В. К., Скворцов А. И. Зависимость физико-механических свойств мартенситно-старееющих сталей от процесса старения // МиТОМ. – 1975. – № 9. – С. 18–21.
3. Алексеева Л. Е., Суворов С. О. Отпуск под напряжением закаленной стали // Проблемы металлов и физика металлов. – 1972. – № 4. – С. 182–190.
4. Пастухова Ж. В. Применение динамического старения для повышения надежности изделий из коррозионно-стойких мартенситно-старееющих сталей // Методические рекомендации краткосрочного семинара (26–27 ноября 1985 г.). – ЛДНТП, 1987. – С. 15–18.
5. Энтин Р. И., Гиндин И. А., Саррак В. И. Влияние программного нагружения на механические свойства конструкционных сталей // ФММ. – 1970. – Т. 29, № 6. – С. 1215–1220.
6. Бодяко М. Н., Астапчик С. А., Ярошевич Г. Б. Мартенситно-старееющие стали. – Минск: Наука и техника, 1975. – 248 с.
7. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении – М.: Металлургия, 1973. – 534 с.
8. Неклюдов И. М. Камышанченко Н. В. Программное упрочнение материалов // Научные ведомости. – 2005. – № 2, вып. 11. – С. 117–130.
9. Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г., Каплун Ю. А. Динамическое старение сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 223 с.
10. Неклюдов И. М., Стародубцев Я. Д., Соколенко В. И. Влияние магнитных полей на сопротивление пластической деформации кристаллических тел // УФЖ. – 2005. – Т. 50, № 8. – С. 113–121.
11. Гурьянов Г. Н., Смирнов С. В., Зуев Б. М. Влияние методов упрочнения дисперсионно-твердеющего сплава ЭП-543У на основные показатели качества проволочных пружин // Качество и обработка материалов. – 2014. – № 2. – С. 52–57.
12. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. Н. Рентгеноструктурный анализ. – М.: Металлургия, 1970. – 234 с.
13. Лебедев Т. А., Оленин М. И. Термическая правка труб из мартенситно-старееющих сталей // МиТОМ. – № 10. – 1985. – С. 46–47.
14. Оленин М. И. Применение фазовой сверхпластичности для правки тонкостенных изделий из мартенситно-старееющих сталей // Технология машиностроения. – 2012. – № 10 (124). – С. 8–10.
15. Неклюдов И. М., Соколенко В. И., Нетесов В. М. Развитие в ННЦ «ХФТИ» методов направленного изменения структуры и свойств конструкционных материалов при активизации релаксационных процессов. Обзор, посвященный 80-летию Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» // Успехи физики металлов. – 2008. – Т. 9. – С. 171–193.
16. Tien J. K., Copley S. M. The Effect of Uniaxial Stress on the Periodic Morphology of Coherent Gamma Prime Precipitates in Nickel-Base Superalloy Crystals, Metallurgical Transactions // Metallurgical Transactions. – 1971. – V. 2, N 1. – С. 215–219.
17. Tien J. K., Copley S. M. The effect of orientation and sense of applied uniaxial stress on the morphology of coherent gamma prime precipitates in stress annealed nickel-base superalloy crystals // Metallurgical Transactions. – 1971. – V. 2, N 2. – С. 543–553.
18. Старостина Н. В. Влияние внешних упругих нагрузок на кинетику развития микроструктуры монокристаллов дисперсионно-твердеющих сплавов на основе никеля // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – КГТУ, Курск. – 2008.
19. Монастырская Е. В., Морозова Г. И., Власов Ю. Б. Структура, фазовый состав и свойства коррозионно-стойкого жаропрочного сплава ЧС88У // МиТОМ. – 2006. – № 8 – С. 39–44.
20. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. Кн. 1. – Рыбинск: Изд. дом «Газотурбинные технологии», 2010 – 605 с.
21. Оленин М. И., Горынин В. И., Махорин В. В. Повышение хладостойкости стали марки 09Г2С за счет программного упрочнения, совмещенного с дополнительным среднетемпературным отпуском // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 1 (101). – С. 27–34.

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБРАЗЦОВ КОРСЕТНОЙ ФОРМЫ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ ИЗДЕЛИЙ

С. П. ДЕГТЯРЕВА

ОАО «НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова», 191167, Санкт-Петербург, Атаманская ул., 3/б,
E-mail: bulgakova.sf@gmail.com

Поступила в редакцию 17.06.2020

После доработки 4.08.2020

Принята к публикации 10.08.2020

Разрушение изделий вследствие периодически повторяющихся нагревов в процессе эксплуатации – серьезная проблема современной техники. Однако в последние годы исследования этого явления, именуемого термической усталостью материалов практически не проводятся. Роли термической усталости в повреждении изделий стали придавать второстепенное значение. Особенно это относится к металлофизическим исследованиям природы субструктурных изменений на различных этапах процесса, которые в конечном итоге и приводят к разрушению.

Исключение составляют металлографические исследования, которые систематически выполняют в ходе термоциклических испытаний с использованием плоских образцов корсетной формы в НПО «ЦКТИ им. И. И. Ползунова». Исследования термической усталости осуществляют посредством термоциклических испытаний. Они служат для получения исходных данных для последующих расчетов ресурса изделий. Чтобы выяснить пригодность корсетных образцов для исследования термической усталости, был предпринят анализ опубликованных данных, которые содержат информацию о появлении трещин в ходе циклических нагревов. Анализ опубликованных результатов испытаний корсетных образцов представлен на примере данных жаропрочного сплава ЖС32 как наиболее полных среди всех имеющихся. Выявлено, что при использованных термических режимах испытаний трещины, даже магистральные, появляются в первых же циклах испытаний. Это происходит, вероятно, из-за чрезмерно большой пластической деформации в цикле, в результате чего стадия накопления повреждений почти полностью исчезает, а материал оказывается в состоянии, благоприятном для зарождения трещин.

Расчет пластической деформации в цикле подтвердил выдвинутое предположение. При этом было установлено, что деформация центральной части образца осуществляется его же заплечиками, жестко стесненными односторонне захватами. Результаты расчета показали, что испытания корсетных образцов позволяют существенно расширить диапазон варьирования пластической деформации в цикле и приблизиться к происходящему в реальных изделиях. В связи с этим испытания с применением корсетных образцов рекомендуются как метод исследования термической усталости.

Ключевые слова: термическая усталость, термоциклические испытания, пластическая деформация, трещины термической усталости.

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-61-69

ЛИТЕРАТУРА

1. Третьяченко Г. Н., Карпинос Б. С., Барило В. Г. Разрушение материалов при циклических нагревах. 1993, Киев, Наукова думка, 288 с.
2. Дульнев Р. А., Котов П. И. Термическая усталость металлов. М. Машиностроение, 1980, 200 с.
3. Coffin L. F., Schenectady N. Y. A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on Ductile Metal // Trans. ASME. – 1954. – V. 76, № 6. – P. 931–950.
4. Серенсен С. В., Котов П. И. Об оценке сопротивления термической усталости по методу варьируемой жесткости нагружения // Заводская лаборатория. – 1962. – Т.28, №10. – С.1233–1238.
5. Голубовский Е. Р., Бычков Н. Г. Хамидуллин А. Ш., Базылева О. А. Экспериментальная оценка кристаллографической анизотропии термической усталости монокристаллов сплава на основе Ni₃Al для высокотемпературных деталей АГТД // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 244–247.

6. Гугелев Б. М., Гецов Л. Б., Журавлев Ю. А., Новикова Е. Г. Метод микроструктурного исследования повреждений в металлах при термической усталости // Заводская лаборатория. – 1976. – № 1. – С.94–97.

7. Гецов Л. Б., Рыбников А. И., Семенов А. С., Григорьев А.В., Тихомирова Е.А. Сопротивление деформированию и разрушению монокристаллических сплавов при статическом и термоциклическом нагружении. / Надежность и безопасность энергетики. 2012, №18, с.53–62.

8. Гецов Л. Б., Рыбников А. И., Семенов А. С. Сопротивление термической усталости жаропрочных сплавов и защитных покрытий. / Надежность и долговечность машин и сооружений. 2015. Вып.40. С. 73–92.

9. Гецов Л. Б., Рыбников А. И., Семенов А. С. Прогрессирующее деформирование материалов при термоциклическом нагружении // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. – СПб., 2009. – С.105–120.

10. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б., Толораия В. Н., Гаврилин О. С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 334 с.

11. Будиновский С. А. Многослойные жаростойкие покрытия для лопаток ГТД из жаропрочных литейных никелевых сплавов на рабочие температуры до 1200°С и ионно-плазменные технологии и оборудование для их нанесения и ремонта // Автореф дис. ... д.т.н., 2011.

УДК 621.793.74: 621.762.2

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ И ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ, ПРЕТЕРПЕВАЮЩИХ СУЩЕСТВЕННОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Т. И. БОБКОВА¹, канд. техн. наук, А. А. ГРИГОРЬЕВ², канд. техн. наук, Д. С. ЖИРОВ¹

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

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, E-mail: grigoriev_aa@spbstu.ru

Поступила в редакцию 25.05.2020

После доработки 11.06.2020

Принята к публикации 29.06.2020

Представлены результаты исследований, направленных на расширение номенклатуры отечественных композиционных порошковых материалов для газотермического напыления покрытий с высоким уровнем эксплуатационных характеристик для работы в энергетической отрасли машиностроения. Приведены экспериментальные данные по синтезу наноструктурированных порошков на основе титановой матрицы, армированных керамическими нанопорошками. Исследованы некоторые свойства напыляемых покрытий.

Ключевые слова: композиционный порошок, газотермическое напыление, композиционное покрытие, защитное покрытие, восстановительное покрытие, термоциклические испытания, микротвердость, износостойкость, нанопорошок диборида ниобия, порошок титановый

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-70-78

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые материалы / Под ред. Ю. С. Карабасова. – М: МИСИС. – 2002 – 736 с.
2. Рогов В. А., Соловьев В. В., Копылов В. В. Новые материалы в машиностроении: Учебное пособие. – М., 2008.
3. Шехтман С. Р. Исследование эксплуатационных свойств материалов лопаток компрессора с вакуумными наноструктурированными ионно-плазменными покрытиями на основе Ti–C–Si // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, № 5(40). – С.75–78.

4. Атаманов М.В., Гусева М.И., Мартыненко Ю.В., Митин А.В., Митин В.С., Московкин П.Г., Ширяев С.А. Структура и адгезия покрытия (TiAl)N на нержавеющей стали // *Металлы*. – 2002. – № 4. – С. 81–88.
5. Koshuro V. A., Fomin A.A. Microtexturing and nanostructuring of the surface of titanium and its alloy using spark alloying with tantalum and subsequent oxidation // *Tenth International Conference (IVESC) «Vacuum Electron Sources»*. – 2014. – IEEE, 2014. – P. 145.
6. Яковчук К. Ю. Теплопроводность и термоциклическая долговечность конденсационных термобарьерных покрытий // *Современная электрометаллургия*. – 2014. – № 4. – С. 25–31.
7. Thermal shock behaviour of toughened gadolinium zirconate / YSZ double-layered thermal barrier coating / X. Zhong, H. Zhao, X Zhou. e. a. // *Journal of Alloy and Compounds*. – 2014. – N 593. – P. 50–55.
8. Slifka A. J., Filla B. J. Thermal conductivity measurement of an electron-beam physical-vapor-deposition coating // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. – 2003. – V. 108. – P. 147–150.
9. Мубояджан С.А. Защитные покрытия для деталей горячего тракта ГТД. – ВИАМ/2010-205674. – 12 с. Режим электронного доступа: <https://www.viam.ru/public/files/2010/2010-205674.pdf>
10. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 538 с.
11. Спектор Ю. Э., Еромасов Р. Г. Технология нанесения покрытий и свойства покрытий. – Красноярск, 2008. – 271 с.
12. Борисов Ю. С., Переверзев Ю. Н., Войнарович С. Г., Бобрик В. Г. Нанесение узкополосных покрытий методом микроплазменного напыления // *Автоматическая сварка*. – 1999. – № 02. – С. 53–55.
13. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Перспективные исследования и разработки научного нанотехнологического центра ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в области наноматериалов // *Вопросы материаловедения*. – 2014. – № 2 (78). – С. 118–126.
14. Бобкова Т. И., Деев А. А., Быстров Р. Ю., Фармаковский Б. В. Нанесение износостойких покрытий с регулируемой твердостью с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления // *Металлообработка*. – 2012. – № 5–6 (71–72). – С. 45–49.
15. Шолкин С. Е., Юрков М. А. Создание управляемой наноструктуры в покрытии, полученном методами газотермического напыления // *Вопросы материаловедения*. – 2010. – № 2 (62). – С. 68–74.

УДК 667.6

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЮМИНОФОРНОГО ПИГМЕНТА ДЛЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ФОСФОГИПСА

Р. П. МЕДВЕДЕВ¹, А. В. СКРЫЛЁВ²

¹ООО «Авангард», 346513, Ростовская обл., Шахты, пер. Якутский, 2, E-mail:
roman.med1989@mail.ru

²ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет, Институт высоких технологий и пьезотехники», 344090, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10

Поступила в редакцию 18.05.2020

После доработки 13.08.2020

Принята к публикации 17.08.2020

В целях обеспечения российской лакокрасочной промышленности экономичным отечественным сырьем проведены исследования для разработки люминофорного пигмента, себестоимость

производства единицы объема которого не должна превышать стоимости аналогичного объема красителей традиционных видов, а для этого пигмент должен производиться исключительно из отечественного сырья. В качестве оптимального сырья были выбраны сульфиды. Выбор обусловлен двумя факторами: достаточно простая технология и возможность использования в качестве сырья отхода химического производства, а именно фосфогипса. Рассмотрены суть и теория метода получения из фосфогипса люминофорного пигмента, а также технологические особенности его получения

Ключевые слова: люминофор, фосфогипс, полимерные материалы, лакокрасочные материалы, пигменты

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-79-88

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент на изобретение RU 2429263 С1. Бесцветные при дневном освещении люминесцентные краски для художественных работ / Болотин Б. М., Кутузова Е. Ю., 20.09.2011. Заявка № 2010113958/05 от 09.04.2010.

2. Патент на изобретение RU 2416529 С1 Способ получения декоративного покрытия, содержащего люминофоры (варианты) / Кутузова Е. Ю., 20.04.2011. Заявка № 2010117271/12 от 30.04.2010.

3. Патент на изобретение RU 2323955 С1. Водостойкий люминесцентный пигмент и люминесцентная печатная краска на его основе / Андриевский А. М., 10.05.2008. Заявка № 2006133093/15 от 15.09.2006.

4. Волкова А. С., Макаренкова Н. В. Люминесцентная краска как альтернатива архитектурному освещению фасадов зданий и сооружений // Экономика и предпринимательство. – 2017. – № 12, Ч.4 (89-4). – С. 825–830.

5. Галерея флуоресцентного дизайна на «Флюре». Режим доступа URL: <http://www.flur.ru/gallery/index/rxp> (дата обращения: 10.05.2020).

6. Авторское свидетельство SU 172437 А1, 29.06.1965. Способ получения пигментных люминесцентных красок / Патрикеев В. В., Шолин А. Ф., Заявка № 787875/23-5 от 20.07.1962.

7. Гончарова М. А., Коста А. А., Корнеев К. А., Анюхина И. О. Исследование физических и светотехнических свойств гидрофобных люминесцентных лакокрасочных материалов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 2. – С. 16–23.

8. Люминесцентные краски. Режим доступа URL: <https://cyberleninka.ru/search?q=люминесцентные%20краски&page=1> (дата обращения 15.05.2020).

9. Шабельская Н. П., Медведев Р. П. Получение люминесцентного неорганического красителя из фосфогипса // Обогащение руд. – 2019. – № 5. – С. 36–40.

УДК 678.067

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРЕАКТИВНОГО ПОЛИИМИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

М. И. ВАЛУЕВА, канд. техн. наук, И. В. ЗЕЛЕНИНА, М. А. ЖАРИНОВ,
М. А. ХАСКОВ, канд. хим. наук

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

Поступила в редакцию 18.06.2020

После доработки 10.08.2020

Принята к публикации 12.08.2020

Представлены результаты исследования экспериментальных углепластиков на основе терморезистивного PMR-полиимидного связующего. Проведены исследования термостойкости уг-

лепластиков и определены их упругопрочностные характеристики при температурах до 320°C. Показана принципиальная возможность изготовления углепластиков из препрегов на PMR-полиимидном связующем, полученных как по расплавной, так и по растворной технологиям. Углепластики, изготовленные из двух типов препрегов, обладают высокой температурой стеклования: 364°C (расплав) и 367°C (раствор) с сохранением этого параметра на уровне 97% после выдержки в кипящей воде, а также примерно одинаковым (86–97%) уровнем сохранения упругопрочностных свойств при температуре 300°C.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, высокотемпературные углепластики, углеродная ткань, полиимидное связующее, препрег, расплавная технология, растворная технология

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-89-102

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. – 2016. – № 2 (14) . – С. 16–21.
2. Каблов Е. Н., Валуева М. И., Зеленина И. В., Хмельницкий В. В., Алексахин В. М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2020. – № 1. – С. 68–77. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 30.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
3. Каблов Е. Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. – 2015. – № 1. – С. 36–39.
4. Бузник В. М., Каблов Е. Н., Кошурина А. А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // Научно-технические проблемы освоения Арктики. – М.: Наука, 2015. – С. 275–285.
5. Каблов Е. Н., Щетанов Б. В., Ивахненко Ю. А., Балинова Ю. А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // Труды ВИАМ: электронный науч.-техн. журн. – 2013. – № 2. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения:10.03.2020).
6. Валуева М. И., Зеленина И. В., Ахмадиева К. Р., Жаринов М. А. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – № 12. – С. 67–79. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 30.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
7. Валуева М. И., Зеленина И. В., Ахмадиева К. Р., Жаринов М. А., Хасков М. А. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области высокотемпературных углепластиков: направления и перспективы // Материалы IV Всероссийской конференции «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий и направлений их переработки на период до 2030 года»» (Москва, 28 июня 2018 г.), [Электронный ресурс]. – М.: ВИАМ, 2018. – С. 71–76.
8. High temperature resins market by resin type (BMI, cyanate ester, polyimide, thermoplastics, and others), by end-use industry type (aerospace & defense, transportation, and others), by manufacturing process type (prepreg layup, RTM, and others), and by region (North America, Europe, Asia-Pacific, and Rest the World), trend, forecast, competitive analysis, and growth opportunity: 2018–2023 // Market-Research.com. URL: <https://www.marketresearch.com/Stratview-Research-v4143/High-Temperature-Composite-Resins-Resin-11797958/> (дата обращения 30.05.2020).
9. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. – СПб.: Научные основы и технологии, 2011. – 416 с.
10. Innovative aircraft polymer matrix composites: Development of high production rate CFRP products for aircraft and quality assurance technology // Japan science and technology agency. URL: https://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/pamph_a_e.pdf (дата обращения 30.05.2020).

11. Avimid® // Solvay. URL: <https://www.solvay.com/en/brands/avimid> (дата обращения 30.05.2020).
12. Toray aerospace advanced composite materials selector guide // Toray Advanced Composites. URL: https://www.toraytac.com/media/99290c4d-4856-49e5-8ca7-d338c8f144f5/UvylnA/TAC/Documents/Selector%20Guides/Aerospace%20selector%20guides/Toray_Aerospace-Advanced-Composite-Materials_Selector-Guide.pdf (дата обращения 30.05.2020).
13. Cycom®2237 // Solvay. URL: <https://www.solvay.com/en/product/cycom-2237> (дата обращения 30.05.2020).
14. Polyimide prepregs // Renegade materials Corporation. URL: <http://www.renegade-materials.com/products/prepregs/polyimide-prepregs/> (дата обращения 30.05.2020).
15. Whitley K. S., Collins T. J. Mechanical properties of T650-35/AFR-PE-4 at elevated temperatures for lightweight aeroshell design // American Institute of Aeronautics and Astronautics. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20060013437.pdf> (дата обращения 30.05.2020).
16. Жаринов М. А., Шимкин А. А., Ахмадиева К. Р., Зеленина И. В. Особенности и свойства расплавленного полиимидного связующего полимеризационного типа // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2018. – № 12. – С. 46–53. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
17. Composites // ASM Handbook. – 2001. – V. 21. – P. 1850.
18. Жаринов М. А., Шимкин А. А., Ахмадиева К. Р., Зеленина И. В., Валуева М. И. Расплавленное полиимидное связующее марки ВС-51 для термостойких ПКМ // Материалы III Всероссийской науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения», Москва, 29 ноября 2018 г., ФГУП «ВИАМ» [Электронный ресурс]. – М.: ВИАМ, 2018. – С. 136–146.
19. Жаринов М. А., Валуева М. И., Ахмадиева К. Р., Бабчук И. В., Зеленина И. В. Термореактивные полиимиды: направления исследований и перспективы их применения // Материалы Всероссийской научно-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы для авиакосмической отрасли», Москва, 6 декабря 2019 г., ФГУП «ВИАМ» [Электронный ресурс]. – М.: ВИАМ, 2019. – С. 53–64.
20. Петрова А. П., Мухаметов Р. Р., Шишимиров М. В., Павлюк Б. Ф., Старостина И. В. Методы испытаний и исследований термореактивных связующих для полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2018. – №12. – С. 62–70. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 30.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-62-70.
21. Гусева М. А. Использование реологического метода испытаний при разработке полимерных материалов различного назначения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн., 2018. №11. С. 35–44. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-35-44.
22. Jin F.-L., Park S.-J. Preparation and characterization of carbon fiber-reinforced thermosetting composites: a review // Carbon letters. – 2015. – V. 16, № 2. – P.67–77.
23. Раскутин А. Е., Хрульков А. В., Гирш Р. И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2016. – № 9. – С. 106–118. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12.
24. Хасков М. А. Сравнительное определение температур стеклования полимерных композиционных материалов методами ДСК, ТМА и ДМА // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 3(79). – С. 138–144.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ НА СЖАТИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

С. И. ВОЙНОВ, И. В. ЗЕЛЕНИНА, М. И. ВАЛУЕВА, канд. техн. наук, И. Н. ГУЛЯЕВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 18.06.2020

После доработки 7.08.2020

Принята к публикации 12.08.2020

Представлены результаты испытаний образцов углепластика ВС-51/ВТкУ-2.200 на прочность при сжатии при повышенных температурах по различным стандартам, и проведен анализ полученных результатов. Углепластик показал высокую теплостойкость и сохранение прочности. Оценка влияния толщины образцов и размера рабочей зоны при испытаниях позволила подобрать стандарт, технологическую оснастку и параметры испытаний образцов высокотемпературных углепластиков на сжатие. Углепластик ВС-51/ВТкУ-2.200 представляет интерес для использования в деталях авиационных конструкций с повышенными требованиями к теплостойкости.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, высокотемпературные углепластики, методы исследований, прочность при сжатии

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-103-113

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. – 2012. – №3. – С. 10–15.
2. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. – 2016. – № 2 (14) . – С. 16–21.
3. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1. – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Kablov E. N. Materials and chemical technologies for aircraft engineering // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2012. – Т. 82, N 3. – С. 158–167.
5. Раскутин А. Е. Конструкционные углепластики на основе новых связующих расплавного типа и тканей Porcher // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн. – 2013. – №5. – С. 1–10. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения 29.01.2019).
6. Каблов Е. Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. – 2014. – № 31. – С. 43–47.
7. Гуляев И. Н., Власенко Ф. С., Зеленина И. В., Раскутин А. Е. Направления развития термостойких углепластиков на основе полиимидных и гетероциклических полимеров // Труды ВИАМ. – 2014. – № 1. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 05.02.2020). DOI 10.18577/2307-6046-2014-0-1-4-4.
8. Светличный В. М., Кудрявцев В. В. Полиимиды и проблема создания современных конструкционных композиционных материалов // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2003. – Т. 45, № 6. – С. 984–1036.
9. Раскутин А. Е., Давыдова И. Ф., Мухаметов Р. Р., Минаков В. Т. Новое термостойкое связующее для стекло- и углепластиков // Клеи. Герметики. Технологии. – 2007. – № 11. – С 20–23.

10. Кузнецов А. А., Семенова Г. К. Перспективные высокотемпературные терморезистивные связующие для полимерных композиционных материалов // Российский химический журнал. – 2009. – Т. LIII, № 4. – С. 86–96.
11. Зеленина И. В., Гуляев И. Н., Кучеровский А. И., Мухаметов Р. Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2016. – № 2. Ст.08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 05.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-2.
12. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. – СПб.: Профессия, 2006. – С. 624.
13. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. – СПб.: Научные основы и технологии, 2011. – С. 416.
14. Валуева М. И., Зеленина И. В., Жаринов М. А., Ахмадиева К. Р. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2019. – № 12. Ст.08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 05.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
15. Жаринов М. А., Шимкин А. А., Ахмадиева К. Р., Зеленина И. В. Особенности и свойства расплавленного полиимидного связующего полимеризационного типа // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2018. – № 12. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
16. Адамов А. А., Лаптев М. Ю., Горшкова Е. Г. Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. – 2012. – №2. – С. 72–77.
17. Мельников Д. А., Ильичев А. В., Вавилова М. И. Сравнение стандартов для проведения механических испытаний стеклопластиков на сжатие // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. – № 3. – С. 55–64. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-6-6.
18. Губский Д. В. Методы экспериментальных исследований физико-механических свойств полимерных композиционных материалов // Проблемы современной науки и образования. – 2016. – № 20(62). – С. 25–29.
19. Шершак П. В. Особенности национальной стандартизации методов испытаний полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2019. – № 2. – С. 77-88. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-77-88.
20. Ильичев А. В., Раскутин А. Е., Гуляев И. Н. Сравнение геометрических размеров образцов ПКМ, используемых в международных стандартах ASTM и отечественных ГОСТ // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 4. – С. 33–42.
21. ГОСТ 25.602–80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах.
22. ASTM D 3410/D 3410M–08. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading.
23. ASTM D 6641/D 6641M–09 Standard Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminates Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture.
24. ГОСТ Р 56812–2015 Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при комбинированной сжимающей нагрузке.
25. ГОСТ 33519–2015 Композиты полимерные. Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах.

26. Nisitani H.; Kim Y.-H.; Goto H.; Nishitani H. Effects of gage length and stress concentration on the compressive strength of a unidirectional CFRP // Engineering Fracture Mechanics. – 1994. – V. 49, № 6. – С. 953–961.

27. Савицкий Р. С., Вешкин Е. А. Влияние механической обработки образцов при порезке на испытания композитов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 4(2). – С. 214–219.

28 Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 7–17.

УДК 669.14.018.295:539.422.22

О ФОРМУЛИРОВКЕ ЛОКАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ

А. В. ИЛЬИН, д-р техн. наук, А. А. ЛАВРЕНТЬЕВ, А. В. МИЗЕЦКИЙ

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

Поступила в редакцию 13.05.2020

После доработки 29.06.2020

Принята к публикации 2.07.2020

Применение локальных критериев хрупкого разрушения для прогнозирования трещиностойкости низколегированных сталей является в настоящее время общепризнанным подходом. В работе анализируется возможность их использования для исследования металла листового проката опытных плавок высокопрочной низколегированной стали с пределом текучести около 1000 МПа, структурное состояние которой было исследовано ранее. Испытаны цилиндрические образцы с кольцевым надрезом трех типов, различающихся напряженно-деформированным состоянием в нетто-сечении. Установлено, что использование наиболее простой формулировки такого критерия в виде энергетического условия распространения микротрещины через структурные барьеры – большеугловые границы зерен – дает приемлемые результаты для образцов с надрезом из металла с различным размером зерен и позволяет связать эти результаты с трещиностойкостью исследованных материалов.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, трещиностойкость, хрупкое разрушение, критерий разрушения, микроструктура

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-114-134

ЛИТЕРАТУРА

1. Ritchie R. O., Knott J. F., Rice J. R. On the Relationship between Critical Tensile Stress and Fracture Toughness in Mild Steel // Jnl. Mech. Phys. Solids. – 1973. – V. 21. – P. 395–410.

2. Beremin F. M. A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel // Metal Trans A. – 1983. – N 14. – P. 2277–2287.

3. Carassou S., Renevey S., Marini B., Pineau A. Modeling of the ductile to brittle transition of a low alloy steel // Fracture from Defects,ESIS/ECF12 / Eds. M. W. Brown, E. R. de los Rios and K. J. Miller. – EMAS, Chameleon Press, London, 2, 1998. – P. 691–696.

4. Kroon M., Faleskog J. A probabilistic model for cleavage fracture with a length scale influence of material parameters and constraint // Int. J. Fract. – 2002. – N 118. – P. 99–118.

5. Chen J. H., Yan C., Sun J. Further study on the mechanism of cleavage fracture at low temperatures // Acta Metall. Mater. – 1994. – N 42. – P. 251–261.

6. Wallin K. and Laukkanen A. Aspects of cleavage fracture initiation – relative influence of stress and strain. Fatigue Fract Eng Mater & Struct. – 2006. – V. 29(9). – P. 788–799.

7. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Швецова В. А. Прогнозирование трещиностойкости реакторных сталей в вероятностной постановке на основе локального подхода // Проблемы прочности. – 1999: № 1 – Сообщ. 1. – С. 5–20; № 2. – Сообщ. 2 – С. 5–22.

8. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И., Швецова В. А. Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 1. Развитие модели Прометей // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 4 (88). – С. 120–150.

9. Pineau A. Development of the local approach to fracture over the past 25 years: theory and application // International Journal of Fracture. – 2006. – V. 138. – P. 139–166.

10. Голосиенко С. А., Ильин А. В., Лаврентьев А. А., Михайлов М. С., Мотовилова Г. Д., Петров С. Н. Сопротивление хрупкому разрушению высокопрочной среднелегированной стали и его связь с параметрами структурного состояния // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 3 (99). – С. 128–147.

11. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

12. Золоторевский Н. Ю., Рыбин В. В. Фрагментация и текстуробразование при деформации металлических материалов. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. – 208 с.

13. Копельман Л. А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с

14. Di Schino A. D., Guarnaschelli C. Effect of microstructure on cleavage resistance of high-strength quenched and tempered steels // Materials letters. – 2009. – V. 63. – P. 1968–1972.

УДК 621.039.531:621.9.02

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРА ВВЭР ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ТЕЧЕНИЕ 45 ЛЕТ.

Часть 1. Программа исследований и вырезка трепанов из ВКУ

Б. З. МАРГОЛИН¹, д-р. техн. наук, А. Я. ВАРОВИН¹, канд. техн. наук, А. И. МИНКИН¹, Д. А. ГУРИН²,
В. А. ГЛУХОВ³

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

²АО «Диаконт», 195274, Санкт-Петербург, ул. Учительская, 2, E-mail: gurin@diakont.com

³АО «Концерн Росэнергоатом», 115432, Москва, Проектируемый 4062-й проезд, 6, строение 25,
E-mail: glukhov@rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию 7.05.2020

После доработки 3.08.2020

Принята к публикации 6.08.2020

Представлена программа исследований металла (сталь 08X18H10T) элементов ВКУ реактора ВВЭР-440 энергоблока № 3 Нововоронежской АЭС, остановленного после 45 лет эксплуатации. Выполнен отбор высокооблученных фрагментов (трепанов) из различных зон выгородки и сегмента корзины реактора.

Ключевые слова: внутрикорпусные устройства, аустенитная сталь, вырезка фрагментов, свойства после эксплуатации

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-135-143

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин А. А., Марголин Б. З., Курсевич И. П., Минкин А. И., Неустроев В. С., Белозеров С. В. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 2 (66). – С. 131–152.

2. Марголин Б. З., Сорокин А. А., Швецова В. А., Минкин А. И., Потапова В. А., Смирнов В. И. Влияние радиационного набухания и особенностей деформирования на процессы разрушения

облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть 1. Пластичность и трещиностойкость // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3(87). – С. 159–191.

3. Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Сорокин А. А., Швецова В. А., Потапова В. А. Влияние радиационного набухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть 2. Скорость роста усталостных трещин // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 3(87). – С. 192–210.

4. Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Федорова В. А., Кохонов В. И., Козлов А. В., Евсеев М. В., Козманов Е. А. Исследование влияния нейтронного облучения на статическую и циклическую трещиностойкость хромоникелевой аустенитной стали // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 1(53). – С. 111–123.

5. Mansur L. K., Lee E. H., Maziasz P. J., Rowcliffe A. P. Control of helium effects in irradiated materials based on theory and experiment // J. of Nucl. Mat. – 1986. – V. 141–143, Part 2. – P. 633–646.

6. Garner F. A. Radiation Damage in Austenitic Steels / Konings R. J. M., (ed.) // Comprehensive Nuclear Materials. – 2012. – V. 4. – P. 33–95.

7. РД ЭО 1.1.2.99.0944–2013 «Методика расчета прочности и остаточного ресурса внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет». – М.: Росэнергоатом, 2013.

8. Карзов Г. П., Марголин Б. З. Механизмы разрушения конструкционных материалов и оценка прочности и работоспособности оборудования АЭС с реакторами различного типа // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 4(80). – С. 162–194.

9. Васина Н. К., Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Курсевич И. П. Радиационное набухание аустенитных сталей: влияние различных факторов. Обработка экспериментальных данных и формулировка определяющих уравнений // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 4(48). – С. 69–88.

10. ASTM E1820–17. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.

11. ASTM E647–13. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.

УДК 621.039.531:539.16

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРА ВВЭР ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ТЕЧЕНИЕ 45 ЛЕТ.

Часть 2. Расчетно-экспериментальное определение флюенса быстрых нейтронов и повреждающей дозы

Н. Е. ПИРОГОВА¹, А. Д. ДЖАЛАНДИНОВ², Б. З. МАРГОЛИН¹, д-р. техн. наук,
Р. В. ДЕРКАЧ¹, А. И. МИНКИН¹

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

**АО ОКБ «Гидропресс», 142103, Подольск, ул. Орджоникидзе, 21,
E-mail: dzhalandinov@grpress.podolsk.ru

Поступила в редакцию 7.05.2020

После доработки 3.08.2020

Принята к публикации 6.08.2020

Для металла (сталь марки 08X18H10T) трепанов, вырезанных из внутрикорпусных устройств энергоблока № 3 НВОАЭС, на основе экспериментально измеренной удельной активности изотопов ⁵⁴Mn и ⁵⁸Co определены параметры радиационной нагрузки: плотность потока и флюенс быстрых нейтронов, а также повреждающая доза. Кроме того, проведена оценка точности расчета этих параметров с использованием программного средства КАТРИН-2.5.

Ключевые слова: внутрикорпусные устройства, флюенс быстрых нейтронов, повреждающая доза, удельная активность

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-144-156

ЛИТЕРАТУРА

1. Dzhalandinov A., Tsofin V., Kochkin V., Panferov P., Timofeev A., Reshetnikov A., Makhotin D., Erak D., Voloschenko A. Validation of 3D Code KATRIN For Fast Neutron Fluence Calculation of VVER-1000 Reactor Pressure Vessel by Ex-Vessel Measurements and Surveillance Specimens Results // Proc. of the European Physical Journal Conferences, January 2016. DOI: 10.1051/epjconf/201610603011.
2. ENDF/B-VII.0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology / M. B. Chadwick e. a. // Nuclear Data Sheets. – 2006. – V. 107. – P. 2931–3060.
3. Laboratoire National Henri Becquerel: Tables de Radionucléides. URL: http://www.lnhb.fr/nuclides/Mn-54_tables.pdf (reference date 21/09/2020).
4. Laboratoire National Henri Becquerel: Tables de Radionucléides. URL: http://www.lnhb.fr/nuclides/Co-58_tables.pdf (reference date 21/09/2020).
5. Камерон И. Ядерные реакторы / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
6. Morgan W.C. Long-term neutron activation products of Nickel-58. – United States: N. p., 1963. DOI: 10.2172/10172408.

621.039.531:620.186

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРА ВВЭР ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ТЕЧЕНИЕ 45 ЛЕТ. Часть 3. Микроструктура и фазовый состав

Е. А. КУЛЕШОВА^{1,2}, д-р техн. наук, С. В. ФЕДОТОВА¹, канд. техн. наук,
Б. А. ГУРОВИЧ¹, д-р техн. наук, А. С. ФРОЛОВ¹, канд. техн. наук, Д. А. МАЛЬЦЕВ¹, канд. техн. наук,
Б. З. МАРГОЛИН³, д-р техн. наук, А. И. МИНКИН³, А. А. СОРОКИН³, канд. техн. наук

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, E-mail: nrcki@nrcki.ru

²НИЯУ «МИФИ», 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, E-mail: info@mephi.ru

³НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, E-mail: mail@crism.ru

Поступила в редакцию 7.05.2020

После доработки 3.08.2020

Принята к публикации 6.08.2020

Методами просвечивающей электронной микроскопии, растровой электронной микроскопии, а также методом атомно-зондовой томографии проведены исследования радиационно-индуцированных составляющих структуры металла (сталь марки 08X18H10T) фрагментов выгорки реактора энергоблока № 3 НВОАЭС после эксплуатации в течение 45 лет. Фрагменты отличались повреждающей дозой (от 14 до 43 сна) и температурой облучения (от 285 до 315°C). Определены плотность и размеры карбидов и карбонитридов титана, дислокационных петель, пор, радиационно-индуцированных сегрегаций и наноразмерных преципитатов. Оценен вклад структурных составляющих в радиационное упрочнение металла.

Ключевые слова: внутрикорпусные устройства реактора, нейтронное облучение, нержавеющая сталь, радиационно-индуцированное изменение структуры.

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-157-180

ЛИТЕРАТУРА

1. Investigation of high temperature annealing effectiveness for recovery of radiation-induced structural changes and properties of 18Cr–10Ni–Ti austenitic stainless steels / B. A. Gurovich, E. A. Kuleshova, A. S. Frolov, e. a. // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 465. – P. 565–581.
2. Fujii K., Fukuya K. Irradiation-induced microchemical changes in highly irradiated 316 stainless steel // J. Nucl. Mater. – 2016. – V. 469. – P. 82–88.
3. Jiao Z., Was G. Novel features of radiation-induced segregation and radiation-induced precipitation in austenitic stainless steels // Acta. Mater. – 2011. – V. 59. – P. 1220–1238.
4. Jiao Z., Was G. Precipitate behavior in self-ion irradiated stainless steels at high doses // J. Nucl. Mater. – 2014. – V. 449. – P. 200–206.

5. Tomographic atom probe characterization of the microstructure of a cold worked 316 austenitic stainless steel after neutron irradiation / A. Etienne, B. Radigue, P. Pareige, et al. // *J. Nucl. Mater.* – V. 382. – № 64–69.
6. Margolin B. Z., Kursevich I. P., Sorokin A. A., Neustroev V. S. The relationship of radiation embrittlement and swelling for austenitic steels for WWER internals // *Proc. of the ASME Pressure Vessels and Piping Conf., ASME, Prague T.* – 2010. – P. 939–948.
7. Margolin B. Z., Kursevich I. P., Sorokin A. A., Neustroev V. S. FCC-to-BCC phase transformation in austenitic steels for WWER internals with significant swelling // *Proc. of Int. Conf. Fontevraud 7.* – Avignon, France. – 2010. – Paper Reference A097–T02.
8. Margolin B. Z., Murashova A. I., Neustroev V. S. Analysis of the influence of type of stress state on radiation swelling and radiation creep of austenitic steels // *J. Strength of Materials.* – 2012. – V. 44 (№ 3). – P. 227–240
9. The radiation swelling effect on fracture properties and fracture mechanisms of irradiated austenitic steels. Part I. Ductility and fracture toughness / B. Z. Margolin, A. A. Sorokin, V. A. Shvetsova et al. // *J. of Nucl. Mater.* – 2016. – V. 480.– P. 52–68.
10. Chen Y., Chou P.H., Marquis E.A Quantitative atom probe tomography characterization of microstructures in a proton irradiated 304 stainless steel // *J. Nucl. Mater.* – 2014. – V. 451. – P. 130–136.
11. Grain boundary segregation in neutron-irradiated 304 stainless steel studied by atom probe tomography / T. Toyama, Y. Nozawa, W. Van Renterghem, et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2012. – V. 425. – P. 71–75.
12. Irradiation-induced precipitates in a neutron irradiated 304 stainless steel studied by three-dimensional atom probe / T. Toyama, Y. Nozawa, W. Van Renterghem, et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2011. – V. 418. – P. 62–68.
13. Lee G. G., Jin H. H., Chang K., Kwon J. Atom probe tomography analysis of radiation-induced solute clustering in austenite stainless steels // *Radiat. Eff. Defects Solids.* – 2018. – V. 173. – P. 694–704.
14. Марочник сталей и сплавов. / Под общ. ред. Ю. Г. Драгунова и А. С. Зубченко. – М., 2014. – 1216 с.
15. Handbook of comparative world steel standards / John E. Bringas, ed. – 2nd ed. – ASTM data series; DS67A. – 2002. – 658 p.
16. Kurata H., Isoda S., Kobayashi T. Chemical Mapping by Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy // *J. Electron. Microsc.* – 1996. – V. 45. – P. 317–320.
17. Lavergne J.-L., Martin J.-M., Belin M. Interactive electron energy-loss elemental mapping by the “Imaging-Spectrum” method // *Microscopy Microanalysis Microstructures.* – 1992. – V. 3. – P. 517–528.
18. Williams D. B., Carter C. B. Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science. – Springer, 2009. – 779 p.
19. ICDD (2017). PDF-4+ 2017 (Database), ed. S. Kabekkodu, International Centre for Diffraction Data, Newtown Square, PAUSA, 2017
20. Фролов А. С., Крикун Е. В., Приходько К. Е. Разработка программы DIFFRACALC для анализа фазового состава сплавов // *Кристаллография.* – 2017. – Т. 64, № 5. – С. 842–848.
21. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. – М.: Техносфера, 2006. – 256 с.
22. Malis T., Cheng S. C., Egerton R. F. EELS log-ratio technique for specimen-thickness measurement in the TEM // *J. Electron. Microsc. Tech.* – 1988. – V. 8. – P. 193–200.
23. Yang Y. Y., Egerton R. F. Tests of two alternative methods for measuring specimen thickness in a transmission electron microscope // *Micron.* – 1995, – V. 26, Iss. 1. – P. 1–5.
24. Zhang H.-R., Egerton R. F., Malac M. Local thickness measurement through scattering contrast and electron energy-loss spectroscopy // *Micron.* – 2012, – V. 43, Iss. 1. – P. 8–15.
25. Egerton R. F., Cheng S. C. Measurement of local thickness by electron energy-loss spectroscopy // *Ultramicroscopy.* – 1987. – V. 21, Iss. 3. – P. 231–244.
26. Iakoubovskii K., Mitsuishi K., Nakayama Y., Furuya K. Thickness measurements with electron energy loss spectroscopy // *Microsc. Res. Tech.* – 2008. – V. 71, Iss. 8. – P. 626–631.

27. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Metallurgy, 1976. – 271 с.
28. Miller M. K., Forbes R. G. Atom-Probe Tomography. The Local Electrode Atom Probe. – Springer, 2014. – 423 p.
29. Local Electrode Atom Probe Tomography. A User's Guide / D. J. Larson, T. J. Prosa, R. M. Ulfing e. a. – Springer, 2013. – 318 p.
30. Marquis E. A., Hyde J. M. Applications of atom-probe tomography to the characterisation of solute behaviours // Mater. Sci. Eng.: R: Reports. – 2010. – V. 69, Iss. 4–5. – P. 37–62.
31. Hyde J. M., Marquis E. A., Wilford K. B., Williams T. J. A sensitivity analysis of the maximum separation method for the characterisation of solute clusters // Ultramicroscopy. – 2011. – V. 111, Iss. 6. – P. 440–447.
32. Analysis of Radiation Damage in Light Water Reactors: Comparison of Cluster Analysis Methods for the Analysis of Atom Probe Data / J. M. Hyde, G. DaCosta, C. Hatzoglou e. a. // Microscopy and Microanalysis. – 2017 – V. 23. – P. 366–375.
33. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. – М.: Metallurgy, 1967. – 798 с.
34. Maziasz P.J. Overview of microstructural evolution in neutron-irradiated austenitic stainless steels // J. Nucl. Mater. – 1993. – V. 205 – P. 118–145.
35. Ayanoglu M., Motta A.T. Microstructural evolution of the 21Cr32Ni model alloy under irradiation // J. Nucl. Mater. – 2018. – V. 510. – P. 297–311.
36. Irradiation Microstructure of Austenitic Steels and Cast Steels Irradiated in the BOR-60 Reactor at 320°C / Y. Yang, C. Yiren, H. Yina e. a. // Proc. of 15th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors. – 2012. – P. 2447–2450.
37. Ken H., Yao Z., Morin G., Griffiths M. TEM characterization of in-reactor neutron irradiated CANDU spacer material Inconel X-750 // J. Nucl. Mater. – 2014. – V. 451. – P. 88–96.
38. Boothby R. M. Radiation effects in nickel-based alloys // Comprehensive Nucl. Mater. – 2012. – V. 4. – P. 123–150.
39. Griffiths M., Bickel G., Douglas S. Irradiation-Induced Embrittlement of Inconel 600 Flux Detectors in CANDU Reactors // J. Energy Power Eng. – 2012. – V. 6. – P. 188–194.
40. Intergranular fracture in irradiated Inconel X-750 containing very high concentrations of helium and hydrogen / C.D. Judge, N. Gauquelin, L. Walters et al. // J. Nucl. Mater. – 2015. – V. 457. – P. 165–172.
41. Prediction of swelling of 18Cr10NiTi austenitic steel over a wide range of displacement rates / A. S. Kalchenko, V. V. Bryk, N. P. Lazarev e. a. // J. Nucl. Mater. – 2010. – V. 399. – P. 114–121.
42. Stoller R. E., Maziasz P. J., Rowcliffe A. F., Tanaka M. P. Swelling behavior of austenitic stainless steels in a spectrally tailored reactor experiment: Implications for near-term fusion machines // J. Nucl. Mater. – 1988. – V. 155–157. – P. 1328–1334.
43. Surh M. P., Sturgeon J., Wolfer W. Vacancy cluster evolution and swelling in irradiated 316 stainless steel // J. Nucl. Mater. – 2004. – V. 328. – P. 107–114.
44. Allen T. R., Cole J. I., Kenik E. A., Was G. S. Analyzing the effect of displacement rate on radiation-induced segregation in 304 and 316 stainless steels by examining irradiated EBR-II components and samples irradiated with protons // J. Nucl. Mater. – 2008. – V. 376. – P. 169–173.
45. Kato T., Takahashi H., Izumiya M. Grain boundary segregation under electron irradiation in austenitic stainless steels modified with oversized elements // J. Nucl. Mater. – 1992. – V. 189. – P. 167–174.
46. Was G. S., Bruemmer S.M. Effects of irradiation on intergranular stress corrosion cracking // J. Nucl. Mater. – 1994. – No. 216. – P. 326–347.
47. Kenik E. A., Inazumi T., Bell G.E. Radiation-induced grain boundary segregation and sensitization of a neutron-irradiated austenitic stainless steel // J. Nucl. Mater. – 1991. – V. 183. – P. 145–153.
48. Duh T., Kai J., Chen F. Effects of grain boundary misorientation on solute segregation in thermally sensitized and proton-irradiated 304 stainless steel // J. Nucl. Mater. – 2000. – V. 283–287. – P. 198–204.

49. Renault A.-E., Pokor C., Garnier J., Malaplate J. Microstructure and Grain Boundary Chemistry Evolution in Austenitic Stainless Steels Irradiated in the BOR-60 Reactor up to 120 dpa // Proc. of 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors. – 2009. – P. 1324–1334.
50. Grain boundary character dependence of radiation-induced segregation in a model Ni–Cr alloy / C. M. Barr, L. Barnard, J. E. Nathaniel e. a. // J. Mater. Res. – 2015. – V. 30. – P. 1290–1299.
51. Zinkle S. J., Maziasz P. J., Stoller R. E. Dose dependence of the microstructural evolution in neutron-irradiated austenitic stainless steel // J. Nucl. Mater. – 1993. – V. 206. – P. 266–286.
52. Radiation-induced material changes and susceptibility to intergranular failure of light-water-reactor core internals / S. M. Bruemmer, E. P. Simonen, P. M. Scott e. a. // J. Nucl. Mater. – 1999. – V. 274. – pp. 299–314.
53. Hojou K., Kenik E. A. Radiation-induced segregation in FFTF-irradiated austenitic stainless steels // J. Nucl. Mater. – 1992. – V. 191–194. – P. 1331–1335.
54. Van Renterghem W, Al Mazouzi A, Van Dyck S (2011) Influence of post irradiation annealing on the mechanical properties and defect structure of AISI 304 steel. J Nucl Mater 413:95–102. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.04.006>
55. First-principles investigation on the composition of Ni–Si precipitates formed in irradiated stainless steels / D. Chen, K. Murakami, K. Dohi e. a. // J. Nucl. Mater. – 2017. – V. 494. – P. 354–360.
56. Tan L., Busby J. T. Alloying effect of Ni and Cr on irradiated microstructural evolution of type 304 stainless steels // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 443. – P. 351–358.
57. Microstructure and mechanical properties of austenitic stainless steel 12X18H9T after neutron irradiation in the pressure vessel of BR-10 fast reactor at very low dose rates / S. I. Porollo, A. M. Dvoriashin, Y. V. Konobeev e. a. // J. Nucl. Mater. – 2006. – V. 359. – P. 41–49.
58. Mamivand M., Yang Y., Busby J., Morgan D. Integrated modeling of second phase precipitation in cold-worked 316 stainless steels under irradiation // Acta Mater. – 2017. – V. 130. – P. 94–110.
59. Neustroev V. S., Garner F. A. Very high swelling and embrittlement observed in a Fe–18Cr–10Ni–Ti hexagonal fuel wrapper irradiated in the BOR-60 fast reactor // J. Nucl. Mater. – 2008. – V. 378. – P. 327–332.
60. Kozlov A. V., Portnykh I. A., Bryushkova S. V., Kinev E. A. Effect of vacancy porosity on the strength characteristics of austenitic steel ChS-68 // Phys. Metals Metallogr. – 2003. – № 95(4). – P. 379–389.
61. РД ЭО 1.1.2.99.0944–2013 Методика расчета прочности и остаточного ресурса внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет/
62. Determination of In-Service Change in the Geometry of WWER-1000 Core Baffle: Calculations and Measurements / B. Z. Margolin, A. Ya. Varovin, A. J. Minkin e. a. // Proc. of Int. Conf. Fontevraud 8. – Avignon, France, 2013.
63. Воеводин В. Н., Неклюдов И. М. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов. – Киев: Наукова думка, 2006. – 374 с.
64. Porter D. L. Ferrite formation in neutron-irradiated type 304L stainless steel // J. Nucl. Mater. – 1979. – V. 79. – P. 406–411.
65. Porter D. L., Wood E. L. Reactor Precipitation and Ferritic Transformation in Neutron-Irradiated Stainless Steels // J. Nucl. Mater. – 1979. – V. 83. – P. 90–97.
66. On the correlation between irradiation-induced microstructural features and the hardening of reactor pressure vessel steels // M. Lambrecht, E. Meslin, L. Malerba e. a. // J. Nucl. Mater. – 2010. – V. 406. – P. 84–89.
67. Lucas G.E. The evolution of mechanical property change in irradiated austenitic stainless steels // J. Nucl. Mater. – 1993. – V. 206. – P. 287–305.
68. Влияние плотности дислокации на сопротивление высокоскоростной деформации и разрушению в меди М1 и аустенитной нержавеющей стали / С. В. Разоренов, Г. В. Гаркушин, Е. Г. Астафурова и др. // Физическая мезомеханика. – 2017. – № 20 (4). – С. 43–51.
69. Kocks U.F. The relation between polycrystal deformation and single-crystal deformation // Metall. Mater. Trans. – 1970. – V. 1. – P. 1121–1143.

70. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

71. Fujii K., Fukuya K. Atom Probe Tomography Analysis of Cold-Worked 316 Stainless Steels Irradiated in PWR // Proc. of Int. Conf., Fontevraud 7, Avignon, France, 2018.

УДК 669.295:621.039.531

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ НЕЙТРОННОМУ ОБЛУЧЕНИЮ*

В. В. ЛАРИОНОВ, канд. физ.-мат. наук, В. А. ВАРЛАЧЕВ, д-р техн. наук

ФГАОУ ВО «Томский национальный исследовательский политехнический университет»,
634050, Томск, пр. Ленина, д. 30, E-mail: lvv@tpu.ru

Поступила в редакцию 7.05.2020

После доработки 3.08.2020

Принята к публикации 17.08.2020

Исследовано изменение природного состава титана под влиянием облучения нейтронами энергией 0,1 МэВ. Процесс облучения сопровождается образованием водорода, радиоактивного скандия и гамма-квантов с энергией 889 и 1120 кэВ. Изменение природного состава титана, образование водорода и наличие гамма-квантов следует учитывать при создании конструктивных изделий и защитных экранов на основе титана.

Ключевые слова: титан, облучение нейтронами, наводороживание, радиационная безопасность

DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-181-187

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбин В. В., Ушаков С. С., Кожевников О. А. Сплавы на основе титана –перспективный материал для атомной энергетики // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1 (45). – С. 159–168.

2. Ушаков С. С., Кудрявцев А. С., Карасев Э. А. Становление и развитие производства титановых полуфабрикатов для судостроения // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1 (45) – С. 68–78.

3. Gusev M. N.; Maksimkin O. P., Garner F. A. Peculiarities of plastic flow involving “deformation waves” observed during low-temperature tensile tests of highly irradiated 12Cr18Ni10Ti and 08Cr16Ni11Mo3 steels // J. Nucl. Mater. – 2010. – V. 403. – P. 121–125.

4. Ушков С. С., Кожевников О. А. Опыт применения и значение титановых сплавов для развития атомной энергетики России // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3(59). – С. 172–187.

5. Ночовная Н. А. Перспективы и проблемы применения титановых сплавов // Авиационные материалы и технологии, Сб. статей, Вып.: Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов. – М.: ВИАМ, 2007. – С. 4–8.

6. Bauer P. Development of HTS Current Leads for the ITER Project // ITER Technical Project. – Report N ITR-18-001. 28 February 2018.

7. Улин И. В., Фармаковский Б. В., Гюлиханданов Е. Л. Использование интерметаллических соединений системы Ti–Al–Nb для аккумуляции водорода // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 4 (100). – С. 97–104.

8. Куприева О. В. Физико-химические основы формирования боросиликатного покрытия на дробы гидроксида титана // Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Белгород, 2015.

* Статья публикуется в порядке обсуждения

9. Власенко Н. И., Коротченко Н. М., Литвиненко С. Л. Нейтронно-защитные свойства гидридов титана и циркония с повышенным содержанием водорода // Ядерная и радиационная безопасность. – 2009. – № 4. – С. 33–35.
10. Важенин А. В. Радиационная онкология. Организация, тактика, пути развития. – М.: Изд-во РАН, 2003. – 236 с.
11. Кашапов О. С., Павлова Т. В., Калашников В. С., Попов И. П. О влиянии добавок углерода на механические свойства титанового псевдо- α -сплава // Вопросы материаловедения. – 2019 – № 2 (98). – С. 27–38.
12. Медведев П. Н., Наприенко С. А., Кашапов О. С., Шпагин А. С., Попов И. П. Исследование неоднородности структуры заготовки титанового сплава ВТ41 после термомеханической обработки // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 1 (97). – С. 36–46.
13. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшкин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – М.: ВИЛС–МАТИ. – 2009. – 520 с.
14. Хлыбов А. А., Рябов Д. А., Пичков С. Н., Шишулин Д. Н., Захаров Д. А. Разработка акустического метода определения степени наводороживания в конструкциях из титановых сплавов // Дефектоскопия. – 2019. – № 4. – С. 8–14.
15. Begrambekov L. B., Evsin A. E., Grunin A. V., Kaplevsky A. S., Gumarov A. I., Kashapov N. F., Luchkin A. G., Vakhitov I. R., Yanilkin I. V., Tagirov L. R. Irradiation with hydrogen atoms and ions as an accelerated hydrogenation test of zirconium alloys and protective coating // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44 – N31. – P. 17154–17162 DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.198
16. Dalkarov O. D., Negodaev M. A., Rusetskii A. S., Tsechosh V. I., Lyakhov B. F., Saunin E. I., Bolotokov A. A., Kudryashov I. A. Studying the emission of X-rays quanta, neutrons and charged particles from deuterated structures irradiated with X-rays // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2019. – T. 13, N 2. – С. 272–279.
17. Tyurin Y. I., Sypchenko V. S., Nikitenkov N. N., Zhang H., Chernov I. P. Comparatives study of hydrogen isotopes yield from Ti, Zr, Ni, PD, Pt during thermal, electric current and radiation heating // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44. – N 36. – P. 20223–20238.
18. Moriani A., Tosti S., Santucci A., Palumbo O., Trequattrini F., Paolone A., Pozio A. Innovative procedure to evaluate the hydrogen diffusion coefficient in metals from absorption-measurements // Energies. – 2019. – V. 12, N 9. – P. 1652.
19. Tyurin Y. I., Larionov V. V. Hydrogen Removal from Welded Joints by Electron Irradiation // Metal Science and Heat Treatment. – 2018 – V., N. 5–6. – P. 403–406. DOI: 10.1007/s11041-018-0291-5
20. Меднис И. В. Сечение ядерных реакций, применяемых в нейтронно-активационном анализе: Справочник. Рига, 1991. – 119 с.
21. Nuclear Wallet Cards. United States National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indx_sigma.jsp.