

ЖУРНАЛ «ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ»,

2019, № 4 (100)

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

- Сыч О. В., Хлусова Е. И., Яшина Е. А., Святышева Е. В., Васильева Е. А.* Структура и свойства высокопрочной экономнолегированной хладостойкой стали после закалки с прокатного и печного нагрева с отпуском 7
- Алиев А. А.* Исследование материала разрушенных поликлиновых шкивов с целью повышения срока службы перспективных автомобильных генераторов 20
- Козлова И. Р., Чудаков Е. В., Третьякова Н. В., Маркова Ю. М., Васильева Е. А.* Влияние термической обработки на формирование структуры и уровень механических свойств высоколегированного титанового сплава 28
- Гюлиханданов Е. Л., Алексеева Е. Л., Шахматов А. В., Лошаченко А. С., Лапеченков А. А.* Структура и свойства сплава ЭП718 на железоникелевой основе в процессе производства полуфабрикатов 42

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Красиков А. В.* Синтез нанокмпозиционного покрытия из электроосажденных аморфных слоев системы Ni–P–W 53
- Марков М. А., Персинин С. А., Красиков А. В., Быкова А. Д., Беляков А. Н., Фадин Ю. А.* Особенности формирования антифрикционных покрытий на титане методом электроискрового легирования с использованием металлокерамических анодов 61
- Николаев Г. И., Анисимов А. В., Михайлова М. А., Уварова Е. А., Сенников А. С.* Этапы создания необрастающего безбицидного покрытия с низкой поверхностной энергией. Предварительные результаты испытаний в натуральных условиях 68
- Тит М. А., Беляев С. Н.* Влияние стехиометрического состава на функциональные характеристики тонкопленочных поверхностных структур на узлах гироскопических приборов 78
- Самоделкин Е. А., Коркина М. А., Фармаковский Б. В., Земляницын Е. Ю.* Получение плакированного порошка на дезинтеграторе с новой конструкцией ротора 91
- Улин И. В., Фармаковский Б. В., Гюлиханданов Е. Л.* Использование интерметаллических соединений системы Ti–Al–Nb для аккумуляции водорода 97

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Жансакова К. С., Еремин Е. Н., Русских Г. С., Кропотин О. В.* Применение нитрида бора для модифицирования резин на основе изопренового каучука 105
- Воейкова Т. А., Журавлева О. А., Кулигин В. С., Иванов Е. В., Кожухова Е. И., Егоров А. С., Чигорина Е. А., Болотин Б. М., Дебабов В. Г.* Природоподобный метод получения полимерных нанокмполитов и изучение их физико-химических свойств 113

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Леонов В. П., Михайлов В. И., Сахаров И. Ю., Кузнецов С. В.* Исследование свариваемости титанового псевдо-β-сплава VST 5553 124
- Леонов В. П., Михайлов В. И.* Особенности защиты сварных соединений от окисления при сварке титановых сплавов 132

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

- Костылев В. И., Марголин Б. З.* Сравнительный анализ и верификация инженерных методов учета эффекта коротких трещин при прогнозировании вязкости разрушения материалов корпусов атомных реакторов 140

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Петровская А. С., Суров С. В., Кладков А. Ю., Цыганов А. Б.</i> Расчет температурных режимов плазменной распылительной ячейки для дезактивации конструкционных элементов ядерных энергетических установок.....	166
<i>Бланк Е. Д., Герасимов В. А., Шарапов М. Г., Водовозов А. Н., Каштанов А. Д., Щуцкий С. Ю., Плакидин А. Н.</i> Разработка технологии изготовления корпусных конструкций главного циркуляционного насоса РУ БРЕСТ.....	179
<i>Александров Н. В., Бланк Е. Д., Каштанов А. Д., Степанов В. В., Лемехов, В. В. Лемехов Ю. В., Мельников А. Н.</i> Создание экспериментальной установки со свинцовым теплоносителем.....	185
ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ	
<i>Смирнов В. И., Минкин А. И., Марголин Б. З., Балакин С. М.</i> Методические особенности исследования кинетики роста коротких и длинных усталостных трещин в облученных реакторных материалах на малоразмерных образцах. Часть 2. Разработка и апробация методики построения полных кинетических диаграмм роста усталостных трещин.....	193
Перечень статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вопросы материаловедения» в 2019 году	206
Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов	210

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ ХЛАДОСТОЙКОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ С ПРОКАТНОГО И ПЕЧНОГО НАГРЕВА С ОТПУСКОМ

О. В. СЫЧ, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук, Е. А. ЯШИНА, Е. В. СВЯТЫШЕВА,
Е. А. ВАСИЛЬЕВА

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

Поступила в редакцию 21.11.2019

После доработки 26.11.2019

Принята к публикации 28.11.2019

Различными методами (оптическая металлография, просвечивающая и растровая электронная микроскопия) проведены сравнительные исследования структуры листового проката из экономнолегированной хладостойкой стали марки 08ХН2МДБ с гарантированным пределом текучести 750 МПа после закалки с печного и прокатного нагрева с последующим высокотемпературным отпуском. Показаны особенности «тонких» параметров бейнитно-мартенситной структуры, определяющих уровень прочности в исходном состоянии (печная закалка и закалка с прокатного нагрева). Исследовано влияние отпуска на структуру и свойства листового проката после закалки с прокатного и печного нагрева.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, закалка с печного нагрева, закалка с прокатного нагрева, отпуск, структура, бейнит, мартенсит, «бывшее» аустенитное зерно, механические свойства

ЛИТЕРАТУРА

1. Effect of microstructure on the impact toughness transition temperature of direct-quenched steels / A. S. Pallaspuuro, A. Kaijalainen, S. Mehtonen, a. e. // *Materials Science & Engineering A*. – 2018. – January. – V. 712. – P. 671–680.
2. Jia T., Zhou Y., Jia X., Wang Z. Effects of microstructure on CVN impact toughness in thermomechanically processed high strength microalloyed steel // *Metall. Mater. Trans.* – 2016. – A. 48. – P. 685–696.
3. Microstructures and hardness of as-quenched martensites (0.1–0.5%С) / B. Hutchinson, J. Hagström, O. Karlsson, a. e. // *Acta Mater.* – 2011. – V. 59. – P. 5845–5858.
4. Термическая обработка в машиностроении // Справочник под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980.
5. 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. 20–31.
6. Сыч О. В., Голубева М. В., Хлусова Е. И. Разработка хладостойкой свариваемой стали категории прочности 690 МПа для тяжелонагруженной техники, работающей в арктических условиях // *Тяжелое машиностроение*. – 2018. – № 4. – С. 17–25.
7. Голосиенко С. А., Сошина Т. В., Хлусова Е. И. Новые высокопрочные хладостойкие стали для арктического применения // *Производство проката*. – 2014. – № 2. – С. 17–24.
8. Хлусова Е. И., Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д. Возможности повышения прочностных характеристик экономнолегированных высокопрочных сталей за счет образования наноразмерных карбидов // *Вопросы материаловедения*. – 2010. – № 3 (59). – С. 52–64.
9. Счастливцев В. М., Табатчикова Т. И., Яковлева И. Л., Егорова Л. Ю., Ватунин К. А., Голосиенко С. А., Круглова А. А., Хлусова Е. И. Влияние термомеханической обработки на структуру и механические свойства судостроительной стали типа 09ХН2МДФ // *Вопросы материаловедения*. – 2008. – № 1(53). – С. 20–32.
10. Akihide N., Takayuki I., Tadashi O. Development of YP 960 and 1100 MPa Class Ultra High Strength Steel Plates with Excellent Toughness and High Resistance to Delayed Fracture for Construction and Industrial Machinery // *JFE Technical Report*. – 2008. – June, N. 11.

11. Muckelroy N. C., Findley K. O., Bodnar R. L. Microstructure and Mechanical Properties of Direct Quenched Versus Conventional Reaustenitized and Quenched Plate // Journal of Materials Engineering and Performance. –2013. – V. 22(2). – P. 512–522.

12. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И., Нестерова Е. В., Орлов В. В., Калинин Г. Ю. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 2 (54). – С. 7–19.

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

14. Takayama N., Miyamoto G., Furuhashi T. Effects of transformation temperature on variant pairing of bainitic ferrite in low carbon steel // Acta Materialia. –2012. – V. 60. – P. 2387–2396.

15. Золоторевский Н. Ю., Зисман А. А., Панпурин С. Н., Титовец Ю. Ф. Влияние размера зерна и деформационной субструктуры аустенита на кристаллогеометрические особенности бейнита и мартенсита низкоуглеродистых сталей // МиТОМ. – 2013. – № 10. – С. 39–48.

16. Сыч О. В., Орлов В. В., Круглова А. А., Хлусова Е. И. Изменение структуры высокопрочной трубной стали класса прочности К70–К80 при варьировании режимов высокотемпературного отпуска после термомеханической обработки // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 1 (65). – С. 89–99.

17. Зисман А. А., Золоторевский Н. Ю., Петров С. Н., Хлусова Е. И., Яшина Е. А. Панорамный кристаллографический анализ эволюции структуры при отпуске низкоуглеродистой мартенситной стали // МиТОМ. – 2018. – № 3. – С. 10–17.

18. Зисман А. А., Петров С. Н., Пташник А. В. Количественная аттестация бейнитно-мартенситных структур высокопрочных легированных сталей методами сканирующей электронной микроскопии // Металлург. – 2014. – № 11. – С. 91–95.

УДК 539.375:621.313.12:629.33

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА РАЗРУШЕННЫХ ПОЛИКЛИНОВЫХ ШКИВОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А. А. АЛИЕВ, канд. техн. наук

ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования», 105187, Москва, ул. Кирпичная, 41

Поступила в редакцию 1.07.2019

После доработки 3.10.2019

Принята к публикации 18.10.2019

При использовании электронной микроскопии с рентгеновским микроанализатором проведены исследования материала разрушенных поликлиновых шкивов автомобильных генераторов, изготовленных из холоднокатаной ленты стали марок 08кп, 08пс, и определены причины их усталостного разрушения. Основными причинами их разрушения являются неоднородная структура и свойства, а также неоптимальный режим межоперационного отжига заготовок, что приводит к пониженной твердости стали в переходной зоне шкива и к усталостному разрушению в процессе эксплуатации. Для решения этой проблемы была разработана холоднокатаная лента из стали 035Ю с однородными структурой и свойствами и выбран режим ее рекристаллизационного отжига, способствующего повышению твердости металла в переходной зоне поликлинового шкива и увеличению срока службы перспективных автомобильных генераторов.

Ключевые слова: шкив, генератор, раскатка, межоперационный отжиг, усталостное разрушение, холоднокатаная лента, однородная структура

ЛИТЕРАТУРА

1. Ютт В. Е. Электрооборудование автомобилей: Учебник для вузов. – М.: ГЛТ, 2016. – 440 с.

2. Vom Problemfall zur Goldader // Automobil Industrie. – 1998.– N 3. – P. 76.
3. Kruse R. Schäfer H., Wähner L. Integrier Starter-Generator für das 42V-Bordnetz // ATZ Automobiltechnische Zeitschrift. – 2002. – N 7–8. – S. 664–674.
4. Набоких В. А. Испытания электрооборудования автомобилей и тракторов. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем». – 2003. – 256 с.
5. Алиев А. А. Использование низкоуглеродистой стали при изготовлении деталей электрооборудования транспортных средств холодной штамповкой // Вестник машиностроения. – 2013. – № 3. – С. 81–83.
6. Алиев А. А. Металловедческие аспекты в производстве автотракторного электрооборудования. – М.: Изд-во МГТУ «МАМИ», 2009. – 267 с.
7. Материаловедение / Под ред. Б. Н. Арзамасова и Г. Г. Мухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 260 с.
8. Уваров В. В., Носова Е. А. Структура и свойства листовых сталей для холодной штамповки. – Самара: Изд-во СГАУ, 2004. – 73 с.
9. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И. Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 480 с.
10. Харсеев В. Е. Совершенствование процессов холодной штамповки на основе оценки использования ресурса пластичности материала заготовки // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М. МГТУ «МАМИ» 2016. .14 с.
11. Алиев А. А. Исследование и разработка низкоуглеродистой стали с заданной структурой и свойствами для статоров автомобильных генераторов с целью повышения их выходных характеристик. // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 4 (92). – С. 22–27.
12. Патент РФ на полезную модель № 118636U1 от 27.07. 2012 / Холоднокатаная лента, выполненная из низкоуглеродистой термически обработанной стали, предназначенная для изготовления деталей электрооборудования транспортных средств / Алиев А. А., Алиев Ак., Алиев Аз. – Оpubл. 27.07. 2012.

УДК 669.295:621.785

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И УРОВЕНЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА

И. Р. КОЗЛОВА, канд. техн. наук, Е. В. ЧУДАКОВ, канд. техн. наук, Н. В. ТРЕТЬЯКОВА,
Ю. М. МАРКОВА, Е. А. ВАСИЛЬЕВА

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

Поступила в редакцию 28.06.2019

После доработки 7.11.2019

Принята к публикации 13.11.2019

Исследована возможность повышения прочности опытного высоколегированного титанового сплава за счет методов термического воздействия, приводящих к изменению его фазового состава и внутризеренного строения. Рассмотрено изменение механических свойств во взаимосвязи с изменением структуры в отожженном, закаленном и термически упрочненном состояниях. Показано, что управление фазовыми превращениями в структуре высоколегированных двухфазных сплавов титана позволяет реализовать высокопрочное состояние с удовлетворительными пластическими характеристиками. Оптимальный комплекс механических свойств обеспечивает термическая обработка, приводящая к созданию двухфазной гетерогенной структуры с развитым бимодальным внутризеренным строением.

Ключевые слова: высоколегированный титановый сплав, термическая обработка, фазовый состав, внутризеренное строение, пластические характеристики

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.
2. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В. К. Александров, Н. Ф. Аношкин, Г. А. Бочвар и др. – М., Металлургия, 1979. – 512 с.
3. Попов А. А., Жилиякова М. А., Зорина М. А. Фазовые и структурные превращения в металлических сплавах. Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 316 с.
4. Илларионов А. Г., Попов А. А., Ледер М. О., Водолазский В. Ф., Жлоба А. В. Формирование структуры, фазового состава и свойств в двухфазном титановом сплаве при варьировании температурно-скоростных параметров термической обработки // МИТОМ. – 2014. – № 9 (711). – С. 43–47.
5. Польшкин И. С. Упрочняющая термическая обработка титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 96 с.
6. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1974. – 544 с.
7. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебное пособие для вузов. 2-е изд. – М., Металлургия, 1981. – 416 с.
8. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
9. Щетников Н. В., Саватеева Г. В., Илларионов А. Г. Распад метастабильного β -твердого раствора в высокопрочном титановом сплаве при старении // Сб. докл. международной конференции «Титан 2006 в СНГ», Россия, Суздаль, 2006. – С. 224–229.
10. Демаков С. Л., Гадеев Д. В., Иларионов А. Г., Ивасишин О. М. Влияние термической обработки на структуру и характер разрушения титанового сплава VST 5553 // МИТОМ. – 2015. – № 8 (722). – С. 26–31.
11. Горынин И. В., Чечулин Б. Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
12. Гриб С.В., Илларионов А.Г., Попов А.А., Ивасишин О.М. Разработка и исследование структуры, физико-механических свойств низкомолекулярных сплавов системы Ti–Zr–Nb // ФММ. – 2014. – Т. 115, № 6. – С. 638–647.
13. Попов А.А., Илларионов А.Г., Степанов С.И., Ивасишин О.М. Влияние температуры закалки на структуру и свойства титанового сплава // Физико-механические свойства. – ФММ. – 2014. – Т. 115, № 5. – С. 549–554.

УДК 669.245

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА ЭП718 НА ЖЕЛЕЗОНИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ

Е. Л. ГЮЛИХАНДАНОВ¹, д-р техн. наук, Е. Л. АЛЕКСЕЕВА¹, А. В. ШАХМАТОВ², канд. техн. наук, А. С. ЛОШАЧЕНКО³, канд. техн. наук, А. А. ЛАПЕЧЕНКОВ¹

¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: alexeeva__el@spbstu.ru

²ООО «Везерфорд», 125047, Москва, 4-й Лесной пер., 4

³ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

Поступила в редакцию 12.11.2019

После доработки 16.12.2019

Принята к публикации 17.12.2019

Исследовано влияние на структуру и коррозионные свойства сплава на железоникелевой основе ЭП718 (ХН45МВТЮБР), используемого в нефтегазодобывающей отрасли в процессе производства полуфабрикатов (ковка, термическая обработка). С помощью гравиметрических и электрохимических методов определены коррозионно-электрохимические свойства сплава, методами оптической и просвечивающей электронной микроскопии исследована структура сплава. Показано,

что наиболее высокой коррозионной стойкостью сплав ЭП718 обладает в состоянии поставки (без термической обработки), при проведении последующей термической обработки происходит деградация его коррозионных свойств.

Ключевые слова: никелевые сплавы, нефтегазодобывающая промышленность, термическая обработка, старение, неметаллические включения, карбиды, коррозионная стойкость

ЛИТЕРАТУРА

1. Klapper H. S., Zadorozne N. S., Rebak R. B. Localized corrosion of nickel alloys: review // *Acta Metall. Sinica*. – 2017. – V. 30, № 4. – P. 296–305. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0553-z>.
2. Corrosion in the Oil Industry / D. Brondel, R. Edwards, A. Hayman e. a. // *Oilfield review*. – 1994. – V. 6, N 2. – P. 6–18.
3. Xu J., John H., Wiese G., Liu X. Oil-grade alloy 718 in oil field drilling application // *Proceed. of the 7th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives*, Wiley, 2010. – P. 923–932. DOI: 10.1002/9781118495223.ch70.
4. Iannuzzi M., Barnoush B., Johnsen R. Materials and corrosion trends in offshore and subsea oil and gas production // *Materials Degradation*. – 2017. – N 1. – P. 1–11. DOI: 10.31224/osf.io/qj65n.
5. Patel S., De Barbadillo J., Coryell S. Superalloy 718: Evolution of the Alloy from High to Low Temperature Application // *Proceed. of the 9th International Symposium on Superalloy 718 & Derivatives*, Springer, Cham. – 2018. – P. 23–49. DOI: 10.1007/978-3-319-89480-5_2.
6. De Barbadillo J. J., Mannan S. K. Alloy 718 for oilfield applications // *JOM*. – 2012. – V. 64, N 2. – P. 265–270. DOI: 10.1007/s11837-012-0238-z.
7. Reed R. C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press. – 2006. – 372 p. DOI:10.1017/S0001924000087509.
8. Chen T., Liu X., John H., Xu J., Hawk J. Effect of aging treatment on pitting corrosion behavior of oil-grade nickel base alloy 718 in 3,5% wt. NaCl Solution // *NACE – International corrosion conference*, 2012.
9. Rebak R. Localized corrosion study of Ni–Cr–Mo alloys for oil and gas application // *NACE – International corrosion conference*, 2015.
10. A new Ni-base superalloy for oil and gas application / R. C. Reed, P. Caron, P. Timothy et al. // *Proc. of the 9th International Symposium on Superalloy 718 & Derivatives: Energy, Aerospace, and Industrial Applications. The Minerals, Metals & Materials Series*. – 2008. – P. 31–39. DOI: 10.7449/2008/Superalloys_2008_31_39.
11. Matsushima I. Effect of alloy composition on corrosion and SSC resistance of high alloy OCTG in sour well environments // *NACE – International corrosion conference*, 1985.
12. Klapper H. S. Effect of Microstructural Particularities on the Corrosion Resistance of Nickel Alloy UNS N07718 – What Really Makes the Difference? // *NACE – International corrosion conference*, 2017.
13. Bhavsar R. B., Collins A., Silverman S. Use of Alloy 718 and 725 in Oil and Gas Industry // *Proc. of the 9th International Symposium on Superalloy 718 & Derivatives: Energy, Aerospace, and Industrial Applications. The Minerals, Metals & Materials Series*. – 2001. – P. 47–55. DOI: 10.7449/2001/Superalloys_2001_47_55.
14. ГОСТ 9013. *Металлы. Методы измерения твердости по Роквеллу*.
15. ASTM E 3. *Стандартная практика подготовки металлографических образцов*.
16. ГОСТ 5639. *Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна*.
17. ASTM E-1245. *Стандартная практика для определения включения или содержания составляющих второй фазы металлов с помощью автоматического анализа изображений*.
18. ASTM G 48. *Стандартные методы испытаний для определения коррозионной стойкости нержавеющей сталей и родственных сплавов к питтинговой и щелевой коррозии с использованием раствора хлорида железа*.
19. ГОСТ 9.905. *Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний. Общие требования*.

20. ASTM G5 Стандартный метод испытаний для измерения потенциодинамической анодной поляризации.

21. ASTM G61 Стандартный метод испытаний для проведения циклических потенциодинамических измерений поляризации для локализованной коррозионной восприимчивости сплавов на основе железа, никеля или кобальта.

22. Харьков А. А., Гюлиханданов Е. Л., Шахматов А. В., Алексеева Е. Л. Сравнительный анализ коррозионной стойкости сплавов Инконель 718 и ЭП718 // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2019. – Т. 54, № 9–10. – С. 771–778. DOI: 10.1007/s10556-019-00546-4.

23. Karasev A., Alekseeva E., Lukianov A., Jönsson P. G. Characterization of non-metallic inclusions in corrosion-resistant nickel-based EP718 and 718 alloys by using electrolytic extraction method // E3S Web. Conf. Proc. of the I International Conference "Corrosion in the Oil and Gas Industry", 2019. V. 121. DOI: 1051/e3sconf/201912104004.

24. Беликов С. В., Жилияков А. Ю., Попов А. А., Карабаналов М. С., Половов И. Б. Особенности образования избыточных фаз в процессе старения высоколегированных аустенитных сплавов на основе Fe и Ni // МИТОМ. – 2014. – № 12 (714). – С. 3–11.

УДК 621.793

СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ АМОРФНЫХ СЛОЕВ СИСТЕМЫ Ni–P–W

А. В. КРАСИКОВ, канд. хим. наук

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

Поступила в редакцию 4.09.2019

После доработки 18.09.2019

Принята к публикации 15.10.2019

Изучены процессы формирования нанокompозитного покрытия Ni–11,5%P–5%W при термической обработке аморфных электроосажденных слоев. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии определена температура начала кристаллизации нанокристаллической фазы Ni₃P. Рентгеноструктурный анализ показал, что при термической обработке образуются фосфиды Ni₃P и, предположительно, Ni₅P₂, размер которых, по данным просвечивающей электронной микроскопии, составляет 5–50 нм. Исследовано влияние длительности термической обработки на фазовый состав и микротвердость покрытий.

Ключевые слова: нанокompозитное покрытие, термическая обработка, микротвердость

ЛИТЕРАТУРА

1. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н. П. Лякишева. Т. 3, кн. 1. – М.: Машиностроение, 2001. – 872 с.

2. Nava D., Davalos C. E., Martinez-Hernandez A., Manriquez F., Meas Y., Ortega-Borges R., Perez-Bueno J. J., Trejo G. Effects of Heat Treatment on the Tribological and Corrosion Properties of Electrodeposited Ni–P Alloys // Int. J. Electrochem. Sci. – 2013. – N. 8. – P. 2670–2681.

3. Fang Z.-H. Electrodeposition of amorphous Ni–P alloy coating // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 1997. – V. 7, N. 3. – P. 148–151.

4. Орлова А. А. Закономерности электроосаждения сплава никель–фосфор из электролитов, содержащих малооновую и глутаровую кислоты // Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – М.: РХТУ, 2013. – 16 с.

5. Lin C. S., Lee C. Y., Chen F. J., Chien C. T., Lin P. L., Chung W. C. Electrodeposition of Nickel-Phosphorus Alloy from Sulfamate Baths with Improved Current Efficiency // Journal of The Electrochemical Society. – 2006. – N 153 (6). – P. C387–C392.

6. Mahalingam T., Raja M., Thanikaikarasan S., Sanjeeviraja C., Velumani S., Moon H., Kim Y. D. Electrochemical deposition and characterization of Ni–P alloy thin films // Materials Characterization. – 2007. – V. 58. – P. 800–804.

7. Красиков А. В. Влияние концентрации гипофосфита натрия в пирофосфатном электролите на состав и свойства электроосажденных покрытий Ni-P // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 1(89). – С. 123–129.
8. Yamasaki T. High-strength Nanocrystalline Ni-W Alloys Produced by Electrodeposition // Mater. Phys. Mech. – 2000. – V. 1. – P. 127–132.
9. Рыбин В. В., Рубцов А. С., Нестерова Е. В. Метод одиночных рефлексов и его применение для электронно-микроскопического анализа дисперсных фаз // Заводская лаборатория. – 1982. – № 5. – С. 21–26.
10. Ahmad J., Asami K., Takeuchi A., Inoue A. Effect of Sodium Hypophosphite on the Structure and Properties of Electrodeposited Ni-W-P Alloys // Materials transactions. – 2003. – V. 44, N 4. – P. 705–708.

УДК 621.793:621.785.5

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ АНОДОВ

М. А. МАРКОВ¹, канд. техн. наук, С. А. ПЕРСНИН², канд. хим. наук,
А. В. КРАСИКОВ¹, канд. хим. наук, А. Д. БЫКОВА^{1,3}, А. Н. БЕЛЯКОВ^{1,3},
Ю. А. ФАДИН³, д-р техн. наук

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

² ООО НПП «Металлокерамические композиционные материалы» (ООО «МетКом»),
173008, Великий Новгород, Сырковское шоссе, 21

³ ФГБУН «Институт проблем машиноведения РАН», 199178, Санкт-Петербург, Большой пр., 61

Поступила в редакцию 4.09.2019

После доработки 14.10.2019

Принята к публикации 26.10.2019

Приведены результаты экспериментальных исследований в области формирования антифрикционных покрытий на титановом сплаве ВТ1-0 методом электроискрового легирования.

Ключевые слова: трибология, электроискровое легирование, антифрикционное покрытие, титан, параметр шероховатости, карбид вольфрама, карбид титана, карбид кремния

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойцов А. Г., Машков В. Н., Смоленцев В. А., Хворостухин Л. А. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. – М., 1998. – 98 с.
2. Бурумкулов Ф. Х., Лезин П. П., Сенин П. В., Иванов В. И., Величко С. А., Ионов П. А. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика). – Саранск: Красный Октябрь, 2003. – 504 с.
3. Верхотуров А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
4. Бородин И. Ф., Судник Ю. А. Автоматизация технологических процессов. – М.: КолосС, 2004. – 344 с.
5. Давыдов В. М., Якуба Д. Д., Ледков Е. А., Химухин С. Н., Никитенко А. В. Интеллектуальная система управления процессом электроискрового легирования (ЭИЛ) // Вестник ТОГУ. – 2014. – № 2 (33). – С. 55–57.
6. Ivanov V. I., Burumkulov F. Kh., On electrodeposition of thick coatings of increased continuity // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2014. – V. 50, Is. 5. – P. 377–383.
7. Фадин Ю. А., Марков М. А., Орданьян С. С. Оценка износостойкости материалов на основе оксида алюминия // Огнеупоры и техническая керамика. – 2015. – № 4–5. – С. 8–10.

8. Исхакова Г. А., Марусина В. И. Структурное и фазовое состояние частиц карбида вольфрама синтезированных в электроискровом разряде // Порошковая металлургия. – 1989. – № 10. – С. 13–18.

9. Markov M. A., Previslov S. N., Krasikov A. V., Gerashchenkov D. A., Bykova A. D., Fedoseev M. L. Study of the microarc oxidation of aluminum modified with silicon carbide particles // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2018. – V. 91, N 4. – P. 543–549.

10. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Прядко Л. Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. – М.: Наука, 1988. – 224 с.

УДК 620.193.8:666.293.5

**ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ НЕОБРАСТАЮЩЕГО БЕЗБИОЦИДНОГО ПОКРЫТИЯ
С НИЗКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИЕЙ.
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ**

Г. И. НИКОЛАЕВ¹, д-р. хим. наук, А. В. АНИСИМОВ¹, д-р. техн. наук,
М. А. МИХАЙЛОВА¹, канд. техн. наук, Е. А. УВАРОВА¹, А. С. СЕННИКОВ²

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

²АО «Соликамский завод «Урал», 618554, Пермский край, Соликамск, ул. Энергетиков, 19а

Поступила в редакцию 24.09.2019

После доработки 8.11.2019

Принята к публикации 13.11.2019

Рассмотрена технология создания необрастающих покрытий с низкой поверхностной энергией для предотвращения морского биологического обрастания. Безбицидная эмаль была создана на основе эпоксидного пленкообразующего, синтезированного на основе ароматически сопряженного гидроксифенилена, и модифицирована префторполиэфирными жидкостями. Представлены результаты лабораторных и натуральных испытаний, организовано опытно-промышленное производство эмали.

Ключевые слова: необрастающее покрытие, поверхностная энергия, безбицидная эмаль, лабораторные и натуральные испытания

ЛИТЕРАТУРА

1. Nurioglu A. G., Catarina A., Esteves C., De With G. Non-toxic, non-biocide-release antifouling coatings based on molecular structure design for marine applications // Journal of Materials Chemistry. – 2015. – N 3. – P. 6547–6570.

2. Christian M., Moeller P. D. R., Ballard T. E., Richards J. J., Huigens III R. W., Cavanagh J. Evaluation of dihydrouridine as an antifouling additive in marine paint // Biodeterior Biodegradation. – 2009. – Jun., N 63(4) – P. 529–532.

3. Chambers L. D., Stokes K. R., Walsh F. C., Wood R. J. K. Modern approaches to marine antifouling coatings // Surface and Coatings Technology. – 2006. – N 201. – P. 3642–3652.

4. Лакокрасочные материалы для окраски судов и оффшорных сооружений (По материалам журнала “Coatings World”, 2010, May. P. 39–42) // Лакокрасочная промышленность. – 2010. – № 7. – С. 12–14.

5. Новые лакокрасочные материалы для судостроения (По материалам зарубежной печати) // Лакокрасочная промышленность. – 2010. – № 7. – С. 20–23.

6. Миронова Г. А., Ильдарханова Ф. И., Коптева В. В., Богословский К. Г. Пути совершенствования противокоррозионно-противообрастающих покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2010. – № 1–2. – С. 84–86.

7. Миронова Г. А., Ильдарханова Ф. И., Коптева В. В., Богословский К. Г. Повышение гидрофобности противокоррозионных и противообрастающих лакокрасочных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2010. – № 7. – С. 26–29.

8. Бойнович Л. Б., Емельяненко А. М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // Успехи химии. – 2008. – № 77(7). – С. 619–638.
9. Яковлев Д. А., Яковлев С. А. Лакокрасочные покрытия функционального назначения. – СПб.: Химиздат, 2016. – 267 с.
10. Wang X.-M., Wang H.-J., Liu D.-L. Non-toxic low surface energy antifouling coatings // Paint Coat Ind (in Chinese). – 2004. – N 34 (1). – P. 40–43.
11. Харитонов А. П., Логинов Б.А. Прямое фторирование полимерных изделий – от фундаментальных исследований к практическому // Ж. Рос. хим. общества им. Д. И. Менделеева. – 2008. – Т. LII, № 3. – С 106–111.
12. Salta M., Wharton J. A., Stoodley P., Dennington S. P., Goodes L. R., Werwinski S., Mart U., Wood R. J. K., Stokes K. R. Designing biomimetic antifouling surfaces // Philosophical transactions of the royal a society. – 2010. – № 368. –P. 4729–4754.
13. Миронова Г. А., Ильдарханова Ф. И., Коптева В. В., Богословский К. Г. Силикон-эпоксидные смолы – новые пленкообразователи в ЛКМ // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2009. – № 12. – С. 23–25.
14. Квасников М. Ю., Крылова И. А., Пацано А. В. Фторсодержащие эпоксидные композиции, модифицированные перфторуглеродами // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2005. – № 6. – С. 12–16.
15. Ильдарханова Ф. И., Миронова Г. А., Коптева В. В., Богословский К. Г. Создание супергидрофобных наномодифицированных противокоррозионно-противообрастающих лакокрасочных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2010. – № 8. – С. 18–21.
16. Анисимов А. В., Михайлова М. А., Степанова И. П., Уварова Е. А. Влияние модификации эпоксидного олигомера перфторполиэфирными жидкостями на свойства необрастающих покрытий // Вопросы материаловедения. – 2014. – № 4(80) – С. 129–134.
17. Патент № 2602553 РФ, МПК51, C09D 163/00, C09D 5/16/ Необрастающая эмаль «Прогидроф» / Анисимов А.В., Михайлова М.А., Степанова И.П., Уварова Е.А.
18. Yebra D. M., Kiil S., Dam-Johansen K. Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings // Progress in Organic Coatings. – 2004. – N 50 – P. 75–104.

УДК 621.793:539.23:62–752.4

ВЛИЯНИЕ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР НА УЗЛАХ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

М. А. ТИТ, С. Н. БЕЛЯЕВ, канд. техн. наук

АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30,
E-mail: office@eprib.ru

Поступила в редакцию 17.10.2019

После доработки 25.10.2019

Принята к публикации 29.10.2019

Приводятся результаты исследований влияния стехиометрии на свойства тонкопленочных покрытий из нитрида титана на узлах поплавкового и электростатического гироскопов. Представлены результаты исследования механических и оптических характеристик тонкопленочных структур нитрида титана: микротвердость, сопротивление износу и трению, а также контрастность изображения, которая определяется коэффициентами отражения базовой поверхности нитрида титана и растрового рисунка, сформированного методом локального лазерного окисления. Рассматриваются перспективы использования и технологические методы формирования функциональных поверхностных структур карбида и нитрида ниобия при создании ротора криогенного гироскопа. Показано, что для формирования покрытия требуемого состава необходима термодинамическая оценка возможных взаимодействий, при которых осуществляется структурно-фазовая модифика-

ция материала, определяемая комплексом возможных топохимических реакций, приводящих к образованию соединений, в том числе нестехиометрического состава.

Ключевые слова: нитрид титана, карбид ниобия, нитрид ниобия, напыление, стехиометрия, сопротивление износу и трению, растровый рисунок, контрастность, ротор, газовый подшипник, рентгенофазовый анализ

ЛИТЕРАТУРА

1. Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Голиков А.В. Общая и прикладная теория гироскопов с применением компьютерных технологий / Под ред. В. Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – 154 с.
2. Яковлева С. А. Исследование и разработка технологических методов повышения точности и размерной стабильности прецизионных деталей и узлов гироскопических приборов // Автореф. дис. ... к.т.н. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012.
3. Ландау Б. Е. Электростатический гироскоп со сплошным ротором // Гироскопия и навигация. – 1993. – № 1. – С. 6–12.
4. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Исследование процесса формирования светоконтрастного растра посредством лазерного маркирования // Научно-технический вестник ИТМО. – 2010. – № 05. – С. 28–34.
5. Махаев Е. А., Рябова Л. П., Чесноков П. А.. Разработка конструкции и технологии изготовления ротора криогироскопа // Материалы XXX Конференции памяти Н.Н. Острякова, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 4–6 октября 2016. – С. 116–123.
6. Патент РФ № RU 2460971, МПК G01C25, Способ изготовления ротора криогенного гироскопа / Колосов В. Н., Шевырев А. А.– Опубликовано 10.09.2012 г.
7. Сайдахмедов Р. Х. Плазменные покрытия на основе нитридов и карбидов переходных металлов с регулируемой стехиометрией. – Ташкент: Фан, 2005. – 226 с.
8. Панькин Н. А. Влияние условий конденсации ионно-плазменного потока на структуру и свойства покрытий нитрида титана // **Автореф.** дис. ... канд. физ.-мат. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, 2008. – 18 с.
9. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Юльметова Р. Ф., Туманова М. А. Анализ свойств модифицированных тонкопленочных структур, формируемых в процессе лазерной обработки поверхности нитрида титана // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2 (90). – С. 83–91.
10. Патент РФ 2173733, МПК С23С14/35, Способ формирования сверхпроводящего пленочного покрытия из нитрида ниобия и проводника на его основе / Тулеушев А. Ж., Тулеушев Ю. Ж., Володин В. Н., Лисицын В. Н. Ким С. Н., Асанов А. Б.
11. Патент США 4726890, С 23 С 14/34, 88.02.23, Method of producing high Tc superconducting NbN films / Thakoor S., Lamb J. L., Thakoor A. P., Khanna S.K. – Бюлл. № 4, 1988.
12. Матлахов В. П. Зависимость физико-механических свойств нитридтитановых покрытий от давления азота // Вестник Брянского ГТУ. – 2006. – № 2. – С. 93–96.
13. Бериллий. Наука и технология / Пер. с англ. / Под ред. Г.Ф. Тихинского и И. И. Папилова. – М.: Металлургия, 1984. – 624 с.
14. Линчевский Б. В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами. – М.: Металлургия, 1986. – 222 с.
15. Чапланов А. М., Щербакова Е. Н. Структурные и фазовые превращения в тонких пленках титана при облучении азот-водородной плазмой. Журнал технической физики, 1999, том 69, вып. 10, стр. 102–108
16. Yulmetova O. S., Scherbak A. G. Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system / Optics and laser technology. – 2018. – V. 101. – P. 242–247.
17. Yulmetova O. S., Tumanova M. A. Laser marking of contrast images for optical read-out systems. / Journal of Physics: Conference Series. – 2017. –V. 917, N 05. – P. 052007.
18. Webb G. W., Marsiglio F., Hirsch J. E. Superconductivity in the elements, alloys and simple compounds // Physica C: superconductivity and its applications. – 2015. – V. 514. – P. 17–27

19. Туманова М. А., Щербак А. Г. Технологические аспекты формирования функциональных элементов при изготовлении узлов криогенных гироскопических приборов // Материалы XXXI Конференции памяти Н. Н. Острякова, ГНЦ РФ, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2–4 октября 2018 г. – С. 338–344.

20. Володин В. Н., Тулеушев Ю. Ж., Жаканбаев Е. А. Структура и фазовый состав напыленных пленок системы ниобий–углерод // Физика металлов и металловедение. – 2013. – Т. 114, № 5. – С. 432–436.

21. Dubrovskiy A., Okunev M., Makarova O., Kuznetsov S. Superconducting niobium coatings deposited on spherical substrates in molten salts // Coatings. – 2018 – V. 8 (6) – P. 213.

22. Krasnosvobodtsev S. I., Shabanova N. P., Ekimov E. V., Nozdrin V. S., Pechen E. V. Critical magnetic field of NbC: new data on clean superconductor films // JETP. – 1995. – N 108. – С. 970–976.

23. Патент RU №2678707. Способ изготовления чувствительного элемента криогенного гироскопа / Левин С. Л., Туманова М. А., Юльметова О. С., Святой В. В., Щербак А. Г., Рябова Л. П. – 2019.

УДК 621.763: 621.762.222: 621.926.4

ПОЛУЧЕНИЕ ПЛАКИРОВАННОГО ПОРОШКА НА ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ С НОВОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ РОТОРА

Е. А. САМОДЕЛКИН¹, М. А. КОРКИНА¹, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ¹, канд. техн. наук,
Е. Ю. ЗЕМЛЯНИЦЫН²

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

ООО НИЦ «ИНТЕХ», 197101 Санкт-Петербург, Большая Монетная, 17–19, лит. И

Поступила в редакцию 12.07.2019

После доработки 21.10.2019

Принята к публикации 29.10.2019

Приведены результаты исследования по разработке технологии получения композиционных материалов, в частности плакированных порошковых материалов для нанесения износостойких покрытий. В предлагаемом способе плакированный порошок, частицы которого состоят из твердого ядра-основы микронного размера, окруженные плакирующим слоем мягкой компоненты, получают методом дезинтеграторной обработки с использованием рабочего ротора дезинтегратора новой конструкции. С использованием такого ротора на примере композиции стеллит – алюминий производилась разработка технологий получения плакированного порошка с заданными свойствами и функциональных защитных покрытий. Толщина плакирующего слоя составляет 1,0–2,0 мкм. Подтверждено прочное сцепление твердой и мягкой компонент, необходимое для нанесения покрытия. Получен необходимый для газодинамического напыления размер фракции композитного порошка – 50–60 мкм. Опытная партия плакированного порошка опробована для получения покрытий с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления. Исследования показали, что адгезионная прочность покрытия составила менее 75 МПа, пористость – менее 1%. Покрытие рекомендуется использовать для элементов узлов и деталей прецизионного машиностроения и энергетики.

Ключевые слова: плакированный порошок, композиционный материал, ротор дезинтеграторной установки, микротвердость, адгезия, пористость

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент SU 1503877 A1. Ротор дезинтегратора / Ридали И. А., Аллик А. Э., Йёз А. В., Петерс В. И. – Оpubл. 30.08.1989 // Бюл. № 32.

2. Авторское свидетельство СССР № 990296. Ротор дезинтегратора / Шагарова Б. У., Майтсе О. Ю., Хинт И. А., Рээмет О. Г., Эльманович В. В. – Оpubл. 23.01.1983 // Бюл. № 3.

3. Авторское свидетельство СССР № 403434. Ротор дезинтегратора / Индриксон А. В. – Оpubл. 26.10.1973 // Бюл. № 43.

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. Геращенко 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.

6. Горынин И. В. Размышления с оптимизмом. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 526 с.

7. Перспективные направления развития науки в Петербурге / Отв. ред. Ж. И. Алферов, О. В. Белый, Г. В. Двас, Е. А. Иванова. – СПб.: Изд-во ИП Пермьяков С.А., 2015. – 543 с.

УДК 669.295'71'293:661.961.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМЫ Ti–Al–Nb ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ВОДОРОДА

И. В. УЛИН, канд. техн. наук, Б. В. ФАРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук,
Е. Л. ГЮЛИХАНДАНОВ, д-р техн. наук

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

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

Поступила в редакцию 30.04.2019

После доработки 21.11.2019

Принята к публикации 28.11.2019

Исследованы особенности использования интерметаллических соединений системы титан – алюминий – ниобий в качестве материала-геттера. Установлено, что с ростом содержания ниобия в сплаве от 16 до 40 ат.% происходит увеличение объема поглощенного водорода от 0,47 до 2,2 мас.%. Показано, что максимальное количество поглощенного водорода наблюдается в сплавах с дендритной структурой. Даны рекомендации по продолжению исследований.

Ключевые слова: интерметаллическое соединение, водород, геттер, гидрид

ЛИТЕРАТУРА

1. Вербцкий В. Н., Митрохин С. В. Гидриды интерметаллических соединений – синтез, свойства и применение для аккумуляции водорода // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – № 10. – С. 41–50.

2. Шеляпина М. Г., Сирецкий М. Ю., Харченко К. А., Скрыбина Н. Е., Фрюшар Д. Неэмпирические расчеты стабильности гидридов интерметаллических соединений – материалов для хранения водорода // Вестник СПбГУ. Сер. 4. – 2011. – Вып. 1. – С. 120.

3. Пахомов Н. А. Научные основы приготовления катализаторов: Курс лекций. – Новосибирск: НГУ – 2010. – 278 с.

4. Xuebin Yu, Zhu Wu, Boojia Xia, Taizhong Huang. Hydrogen storage in Ti-based body-centered-cubic phase alloys // J. of Material Research. – 2003. – V.18, Is. 11. – P. 2533–2536.

5. Вербцкий В. Н. Синтез и свойства многокомпонентных гидридов металлов// Дис. ... д-р хим. наук. – М., 1998. – 72 с.

6. Головин П. А., Медведева Н. А., Скрыбина Н. Е. Сорбционная способность сплавов состава Ni_xV_{1-x} по отношению к водороду // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2013. – № 2. – С. 99–105.

7. Zhang L.T., Ito K., Okabe Y., Yamaguchi M. Reversible hydrogen absorption/desorption and related phase transformation in a Ti₃Al alloy with the stoichiometry composition // Acta Material. – 2002. – V. 50. – P. 4901–4912.

8. Ishikawa K., Hashi K., Suzuki K., Aoki K., Effect of substitutional elements on the hydrogen absorption/desorption properties of Ti_3Al compounds // J. Alloys and Compounds. – 2001. – V. 359. – P. 257–261.

9. Kyoï D., Sato T., Ronnebro E., et al. A new ternary magnesium-titanium hydride Mg_7TiH_x with hydrogen desorption properties better than both binary magnesium and titanium hydrides // J. Alloys Compd. – 2004. – V. 372. – P. 213–217.

10. Моделирование процесса диффузии водорода по вакансионному механизму в интерметаллическом гидриде Mg_2NiH_4 / А. А. Кузубов, Н. С. Елисеева, П. О. Краснов и др. // Вестник СибГАУ. – 2013. – № 3(49). – С. 199–203.

11. Каракозов Б. К. Структура и свойства гетерофазных материалов интерметаллоидного класса на основе $Ti-Al-Nb$, полученных SPS спеканием // Автореф. дис. ... канд. наук, 2018.

12. Использование механоактивации для получения гидридов алюминидов титана / Н. В. Казанцева, Н. В. Мушников, А. Г. Попов и др. // ФММ. – 2008. – Т. 105. – С. 492–502.

13. Ulin I. V., Farmakovskiy B. V., Greenberg B.A. Using of titanium aluminides with orthorhombic structure for accumulation and storage of hydrogen // Mat. Int. Conf. "Advanced Processing for Novel Functional Materials", Dresden, 23–25 Jan. 2008.

УДК 678.074

ПРИМЕНЕНИЕ НИТРИДА БОРА ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ РЕЗИН НА ОСНОВЕ ИЗОПРЕНОВОГО КАУЧУКА

К. С. ЖАНСАКОВА, Е. Н. ЕРЕМИН, д-р техн. наук, Г. С. РУССКИХ, канд. техн. наук,
О. В. КРОПОТИН, д-р техн. наук

ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», 644050, Омск, пр. Мира, 11.
E-mail: info@omgtu.ru

Поступила в редакцию 31.07.2019

После доработки 18.10.2019

Принята к публикации 23.10.2019

Исследованы вулканизационные характеристики резин на основе изопренового каучука, наполненных техническим углеродом марки N330 и нитридом бора BN, а также влияние концентрационного состава нитрида бора на изменение технологических, динамических и физико-механических свойств эластомеров. Определена возможность использования нитрида бора для создания резин с улучшенными свойствами. Установлено, что при постепенном увеличении концентрации инертного наполнителя BN до 35% наблюдается снижение скорости вулканизации на 33% и плотности сшивки полимера на 26%. При этом время начала вулканизации увеличивается почти на 300%, оптимальное время вулканизации – на 200%.

Ключевые слова: нитрид бора, каучук, вулканизация, наполнитель, свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дик Дж. С. Технология резины: рецептуростроение и испытания / Пер. с англ. / Под ред. В. А. Шершнева. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 620 с.

2. Синтетический каучук / Под ред. И. В. Гармонова. – Л.: Химия, 1976. – 752 с.

3. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов. – М.: НППА «Истек», 2009. – 504 с.

4. Овчаров В. И., Бурмистр М. В., Тютин В. А. Свойства резиновых смесей и резин: оценка, регулирование, стабилизация. – М.: САНТ-ТМ, 2001. – 400 с.

5. Раздьяконова Г. И., Лихолобов В. А., Моисеевская Г. В., Петин А. А., Караваев М. Ю. Инновационный дисперсный углерод. От идеи до технологии: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 312 с.

6. Srivastava S. K.; Mishra Y. K. Nanocarbon Reinforced Rubber Nanocomposites: Detailed Insights about Mechanical, Dynamical Mechanical Properties, Payne, and Mullin Effects // Nanomaterials. – 2018. – V. 8, N 945. DOI: 10.3390/nano8110945.

7. Раздьяконова Г. И., Лихолобов В. А., Кохановская О. А. Технологии модификации технического углерода. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. – 160 с.
8. Митряева Н. С., Мышляцев А. В., Стрижак Е. А. Динамические свойства эластомерных композитов, наполненных многостенными углеродными нанотрубками // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3 (95) – С. 137–145.
9. Özdemir T., Yılmaz S. N. Hexagonal boron nitride and polydimethylsiloxane: a ceramic rubber composite material for neutron shielding // Radiat. Phys. Chem. – 2018. – N 152. – P. 93–99. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2018.08.008
10. Gu J. W., Liang C. B., Zhao X. M., Gan B., Qiu H., Guo Y., Yang X. Q., Zhang Q., Wang D.-Y. Highly thermally conductive flame-retardant epoxy nanocomposites with reduced ignitability and excellent electrical conductivities // Compos. Sci. Technol. – 2017. – V. 139. – P. 83–89. DOI.org/10.1016/j.composci-tech.2016.12.015
11. Кандырин Н. Л., Седов А. С. Применение прибора РПА для оценки свойств наполненных резин // Вопросы практической технологии шин. – 2010. – № 1(50). – С. 93–100.
12. Thomas S., Maria H. J. Progress in rubber nanocomposites // 1st edn. Woodhead Publishing, Cambridge, 2016. – 577 p.
13. Усиление эластомеров / Под ред. Дж. Крауса. – М.: Химия, 1968. – 483 с.
14. Frasca D., Schulze D., Wachtendorf V., Krafft B., Rybak T., Schartel B. Multilayer Graphene/Carbon Black/Chlorine Isobutyl Isoprene Rubber Nanocomposites // Polymers. – 2016. – N 8(3). – P. 95. DOI: 10.3390/polym8030095
15. Чиркова Ю. Н., Земский Д. Н. Влияние новых антиоксидантов на технологические свойства резиновых смесей. // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 17 (6). – С. 115–116.
16. Протасов А. В., Корчагин В. И., Михалева Н. А. Использование ультразвука при жидкофазном наполнении активным техуглеродом бутадиенстирольных каучуков // Вестник ВГУИТ. – 2013. – № 4. – С. 165–168.
17. Homkhiew C., Rawangwong S., Boonchouytan W., Ratanawilai T. Composites from Thermoplastic Natural Rubber Reinforced Rubberwood Sawdust: Effects of Sawdust Size and Content on Thermal, Physical, and Mechanical Properties // International Journal of Polymer Science. – 2018. – N 3. – P. 1–11. DOI.org/10.1155/2018/7179527.

УДК 579.66

ПРИРОДОПОДОБНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ И ИЗУЧЕНИЕ ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Т. А. ВОЕЙКОВА¹, канд. биол. наук, О. А. ЖУРАВЛЕВА¹, В. С. КУЛИГИН¹, Е. В. ИВАНОВ²,
Е. И. КОЖУХОВА², А. С. ЕГОРОВ², канд. хим. наук, Е. А. ЧИГОРИНА²,
Б. М. БОЛОТИН², д-р хим. наук, В. Г. ДЕБАБОВ¹, д-р биол. наук

¹НИЦ «Курчатowski институт» – ГосНИИгенетика, 117545, Москва, 1-й Дорожный пр., 1,
voeikova.tatyana@yandex.ru

²НИЦ «Курчатowski институт» – ИРЕА, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, 3

Поступила в редакцию 7.10.2019

После доработки 23.10.2019

Принята к публикации 23.10.2019

В НИЦ «Курчатowski институт» – ГосНИИгенетика методом микробного синтеза получены нанокристаллы NpCdS, стабилизированные белками, состав которых определяется штаммом, используемым для биосинтеза наночастиц. Биогенные наночастицы с использованием методов электронной микроскопии, динамического светорассеяния, спектрофлуориметрии были охарактеризованы по размеру, форме, гидродинамическому диаметру, ζ-потенциалу, уровню люминесценции и определены как квантовые точки. Совместно с НИЦ «Курчатowski институт» – ИРЕА оценено влияние температуры, давления и растворителей на стабильность биогенных наночастиц и ин-

тенсивность люминесценции. В зависимости от диапазона концентраций наночастиц определена интенсивность люминесценции водной суспензии NpCdS . Проведена оценка возможности введения и идентификации NpCdS в эпоксидную смолу, полиимид, поливиниловый спирт. Полимерные нанокомпозиты находят применение в оптоэлектронике, биомедицине и сельском хозяйстве.

Ключевые слова: биогенные NpCdS , белковый слой, квантовые точки, люминесценция, полимерные матрицы, нанокомпозиты

ЛИТЕРАТУРА

1. Chandra B. P., Chandra V. K., Jha P. Luminescence of II-VI Semiconductor Nanoparticles // *Solid State Phenomena*. – 2015. – V. 222. – P. 1–65. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.222.1.
2. Смагин В. П., Еремина Н. С., Скачков А. Г. Люминесценция квантовых точек CdS : Ag в матрице полиметилметакрилата // *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – Т. 24(5). – С. 635–639. DOI: 10.21883/OS.2018.05.45944.292-17-17.
3. Здобнова Т. А., Лебеденко Е. Н., Деев С. М. Квантовые точки для молекулярной диагностики опухолей // *Acta Naturae*. – 2011. – Т. 3, № 1(8). – С. 30–50.
4. Smith A. M., Ruan G., Rhyner M. N., Nie S. Engineering luminescent quantum dots for in vivo molecular and cellular imaging // *Ann. Biomed. Eng.* – 2006. – V. 34. – P. 3-14. DOI: 10.1007/s10439-005-9000-9.
5. Costas-Mora I., Romero V., Lavilla I., Bendicho C. An overview of recent advances in the application of quantum dots as luminescent probes to inorganic-trace analysis // *Trends Anal. Chem.* – 2014. – V. 57. – P. 64–72. DOI: 10.1016/j.trac.2014.02.004
6. Volkov Y. Quantum dots in nanomedicine: recent trends, advances and unresolved issues // *Biochemical and Biophysical Research Communications*. – 2015. – V. 468. – P. 419–427
7. Clifford J. P., Konstantatos G., Johnston K. W., Hoogland S., Levina L., Sargent E. H. Fast, sensitive and spectrally tuneable colloidal-quantum-dot photodetectors // *Nature nanotechnology*. – 2009. – V. 4, N 1. – P. 40–44. DOI: 10.1038/nnano.2008.313.
8. Sargent E. H. Colloidal quantum dots solar cells // *Nature Photonics*. – 2012. – V. 6, N 3. – P. 133–135. DOI: 10.1038/nphoton.2012.33.
9. Мусихин С.Ф., Александрова О.А., Лучинин В.В., Максимов А.И., Матюшкин Л.Б., Мошников В.А. Сенсоры на основе металлических и полупроводниковых коллоидных наночастиц в биомедицине и экологии // *Биотехносфера*. – 2013. – № 2(26) – С. 2–17.
10. Li C., Zhang Y., Wang M., Chen G., Li L., Wu D., Wang Q. In vivo real-time visualization of tissue blood flow and angiogenesis using Ag_2S quantum dots in the NIR-II window // *Biomaterials*. – 2014. – V. 35. – P. 393–400; DOI: 10.1016/j.biomaterials.2013.10.010.
11. Бражник К. И., Барышникова М. А., Соколова З. А., Набиев И. Р., Суханова А. В. Новые направления в исследовании и ранней диагностике рака с применением детекционных систем на основе флуоресцентных нанокристаллов // *Российский биотерапевтический журнал*. – 2013. – Т. 12, № 3. – С. 11–24.
12. Ho M.D., Kim D., Kim N., Cho S.M., Chae H. Polymer and small molecule mixture for organic hole transport layers in quantum dot light-emitting diodes // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2013. – V. 5(23). – P. 12369–12374. DOI: 10.1021/am403173n.
13. Spicer C. D., Jumeaux C., Gupta B., Stevens M. M. Peptide and protein nanoparticle conjugates: versatile platforms for biomedical applications // *Chem. Soc. Rev.* – 2018. – V. 47. – P. 3574–3620. DOI: 10.1039/C7CS00877E
14. Слюсаренко Н. В., Герасимова М. А., Слабко В. В., Слюсарева Е. А. Температурная чувствительность водорастворимых квантовых точек CdTe и CdSe/ZnS , внедренных в биополимерные субмикронные частицы // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2017. – Т. 60, № 3. – С. 88–94.
15. Hosseini M. R., Sarvi M. N. Recent achievements in the microbial synthesis of semiconductor metal sulfide nanoparticles // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2015. – V. 40. – P. 293–301. DOI: 10.1016/j.mssp.2015.06.003.

16. Gahlawat G., Choudhury A.R. A review on the biosynthesis of metal and metal salt nanoparticles by microbes // RSC Adv. – 2019. – V. 9. – P. 12944–12967. DOI: 10.1039/C8RA10483B.
17. Al-Shalabi Z. Biosynthesis of fluorescent CdS nanocrystals with semiconductor properties: comparison of microbial and plant production systems // Journal of Biotechnology. – 2016. – V. 223. – P. 13–23. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2016.02.018.
18. Suresh A. K., Doktycz M. J., Wang W., Moon J.-W. Monodispersed biocompatible silver sulfide nanoparticles: facile extracellular biosynthesis using γ -proteobacterium *Shewanella oneidensis* // Acta Biomaterialia. – 2011. – V. 7. – № 12. – P. 4253–4258. DOI: 10.1016/j.actbio.2011.07.007.
19. Bakhshi M., Hosseini M. R. Synthesis of CdS nanoparticles from cadmium sulfate solutions using the extracellular polymeric substances of *B. licheniformis* as stabilizing agent // Enzyme and Microbial Technology. – 2016. – V. 95. – P. 209–216. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2016.08.011.
20. Sankhla A., Sharma R., Yadav R. S., Kachhwaha S. Biosynthesis and characterization of cadmium sulfide nanoparticles – an emphasis of zeta potential behavior due to capping // Materials Chemistry and Physics. – 2015. – V. 170. – P. 44–51. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2015.12.017.
21. Hiroshi S., Mozhizuki A., Ueda M. Synthesis of aliphatic polyimides containing adamantyl units // Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry. – 1999. – V. 37(18). – P. 3584–3590. DOI: 10.1002/(SICI)1099-0518(19990915)37:18<3584::AID-POLA5>3.0.CO;2-R
22. Журавлева О. А., Воейкова Т. А., Булушова Н. В., Вейко В. П., Исмагулова Т. Т., Лупанова Т. Н., Лобастов С. Л., Ретивов В. М., Дебабов В. Г. Биотехнологический способ получения наночастиц сульфидов серебра (I), кадмия и цинка. Физико-химические свойства. Создание полимерных нанокомпозитов // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 1(97). – С. 110–119. DOI: 10.22349/1994-6716-2019-97-1-110-119.
23. Воейкова Т. А., Журавлева О. А., Булушова Н. В., Вейко В. П., Исмагулова Т. Т., Лупанова Т. Н., Шайтан К. В., Дебабов В. Г. «Белковая корона» наночастиц сульфида серебра, полученных в присутствии грамотрицательных и грамположительных бактерий // Молекулярная генетика, микробиология и вирусология. – 2017. – Т. 35(4). – С. 151–156. DOI: 10.18821/0208-0613-2017-35-4-151-156.
24. Журавлева О. А., Воейкова Т. А., Кедик С. А., Грицкова И. А., Гусев С. А., Ретивов В. М., Кожухова Е. И., Дебабов В. Г. Перспектива применения биогенных квантовых точек наночастиц сульфидов серебра, кадмия и цинка для создания полимерных бионанокомпозитных материалов // Тонкие химические технологии. – 2019. – Т. 14. – № 3. – С. 50–59. DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-3-50-59.

УДК 669.295:621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ ТИТАНОВОГО ПСЕВДО- β -СПЛАВА VST 5553

В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, В. И. МИХАЙЛОВ, д-р техн. наук, И. Ю. САХАРОВ, канд. техн. наук,
С. В. КУЗНЕЦОВ

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

Поступила в редакцию 22.11.2019

После доработки 28.11.2019

Принята к публикации 28.11.2019

Исследованы сварочные свойства при аргонодуговой и электронно-лучевой сварке псевдо- β -сплава титана марки VST 5553. Показано, что для повышения уровня механических свойств сварных соединений необходимо после сварки применять термическую обработку.

Ключевые слова: титановые сплавы, сварка, термическая обработка, сварные соединения, механические свойства.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Леонов В. П., Михайлов В. И., Кудрявцев А. С. Высокопрочные титановые сплавы – основа для создания глубоководной техники // Судостроение. – 2014. – № 3 (814). – С. 58–60.
3. Аргодуговая сварка титанового сплава ВТ22 с использованием присадочной порошковой проволоки / В. П. Прилуцкий, С. Л. Шваб, И. К. Петриченко и др. // Автоматическая сварка. – 2016. – № 9 (756). – С. 10–14.
4. Патент РФ № 2169204, Сплав на основе титана и способ термической обработки крупногабаритных полуфабрикатов из этого сплава / Тетюхин В. В., Захаров Ю. И., Левин И. В., 2000.
5. Анохин С. В., Шваб С. Л. Присадочная порошковая проволока для TIG сварки и наплавки титанового сплава ВТ22 // Автоматическая сварка. – 2019. – № 6. – С. 39–43.
6. Исследование фазового состава, структуры и механических свойств титановых псевдо-β-сплавов / А. С. Кудрявцев, В. П. Кулик, Н. В. Третьякова и др. // Титан. – 2014. – № 3(45). – С. 39–44.
7. Сварные соединения титановых сплавов / В. Н. Моисеев, Ф. Р. Куликов, Ю. Г. Каримов и др. – М.: Металлургия, 1979. – 248 с.
8. Сварка высокопрочных титановых сплавов / С. М. Гуревич, Ф. Р. Куликов, В. Н. Замков и др. М.: Машиностроение, 1975. – 150 с.
9. Горынин И. В. Размышления с оптимизмом. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 526 с.
10. Лясоцкая В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. – М.: Экомет, 2003. – 352 с.

УДК 669.295:621.791

ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОТ ОКИСЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В. П. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, В. И. МИХАЙЛОВ, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 5.12.2019

После доработки 6.12.2019

Принята к публикации 6.12.2019

Рассмотрены вопросы защиты сварных соединений от окисления в процессе сварки корпусных конструкций морского назначения из титановых сплавов. Определены требования к сварочному оборудованию и защитным приспособлениям. Рассмотрены технологические мероприятия для обеспечения надежной защиты сварных соединений от окружающего воздуха и соответственно обеспечения высокого качества сварки.

Ключевые слова: титановые сплавы, сварные соединения, газовые примеси, газозащитные приспособления

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В., Чечулин Б. Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990.
2. Бай А. С., Лайнер Д. Н., Сисарева Е. Н., Цыпин М. И. Окисление титана и его сплавов – М.: Металлургия, 1970. – С. 320.
3. Цвиккер У. Титан и его сплавы / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
4. Титан и его сплавы. Т. 1 / Л. С. Мороз, Б. Б. Чечулин, И. В. Полин и др. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 516 с.
5. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, Я. Ю. Компан и др. – Киев: Наукова думка, 1979. – 300 с.
6. Гуревич С. М., Мищенко С. В. Автоматическая электродуговая сварка титана // Автоматическая сварка. – 1956. – № 5.

7. Андронов Е. В., Кириленко А. В., Хинская О. В. Исследование эффективности очистки инертного газа // Судостроительная промышленность. Серия Материаловедение. – 1990. – Вып. 9. – С. 42–47.
8. Руссо В. Л. Дуговая сварка в инертных газах. – Л.: Судостроение, 1984. – 120 с.
9. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Леонов В. П., Михайлов В. И., Кудрявцев А. С. Высокопрочные титановые сплавы – основа для создания глубоководной техники // Судостроение. – 2014. – № 3 (814). – С. 58–60.
10. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Леонов В. П., Кудрявцев А. С., Чудаков Е. В. Морские титановые сплавы: создание, освоение, перспективы // Титан. – 2014. – № 3 (45). – С. 4–11.
11. Исследование фазового состава, структуры и механических свойств титановых псевдо- β -сплавов / А. С. Кудрявцев, В. П. Кулик, Н. В. Третьякова и др. // Титан. – 2014. – № 3 (45). – С. 39–44.

УДК 621.039.536.2:539.421

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ВЕРИФИКАЦИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ МЕТОДОВ УЧЕТА ЭФФЕКТА КОРОТКИХ ТРЕЩИН ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ

В. И. КОСТЫЛЕВ, канд. техн. наук, Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 30.08.2019

После доработки 5.11.2019

Принята к публикации 22.11.2019

Рассмотрены основные особенности разрушения образцов с короткими трещинами и дан краткий анализ основных методов, позволяющих прогнозировать температурную зависимость вязкости разрушения $K_{Jc}(T)$ для коротких трещин. К ним относятся: DA-метод, (J-Q)-метод, (J-T)-метод, «локальные» методы, использующие многопараметрические вероятностные подходы, Gr-метод, использующий детерминистический «энергетический» подход, а также два инженерных метода – RMSC (Russian Method for Shallow Crack) и EMSC (European Method for Shallow Crack). На базе 13 наборов экспериментальных данных для российских и зарубежных сталей проведена детальная верификация и сравнительный анализ этих двух инженерных методов применительно к материалам корпусов атомных реакторов ВВЭР и PWR с учетом эффекта коротких трещин.

Ключевые слова: корпус реактора ВВЭР, вязкость разрушения K_{Jc} , глубокие и короткие трещины, сопротивление хрупкому разрушению, инженерные методы прогнозирования $K_{Jc}(T)$

ЛИТЕРАТУРА

1. Аниковский В. В., Игнатов В. А., Тимофеев Б. Т., Филатов В. М., Чернаенко Т. А. Анализ размеров дефектов в сварных корпусах энергетического оборудования и их влияние на сопротивление разрушению // Вопросы судостроения, серия Сварка. – 1982. – Вып. 34. – С. 17–32.
2. Gorynin I. V., Ignatov V. A., Zvezdin Y. I., Timofeev B. T. Brittle fracture resistance of welded high pressure vessels // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 1988. – V. 33. – P. 317–327.
3. Timofeev B. T., Anikovskiy V. V. Brittle fracture toughness – Experimental estimation of RPV materials and their welds containing shallow cracks // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 1994. – N 57. – P. 297–304.
4. Alekseenko N. N., Amaev A. D., Gorynin I. V., Nikolaev V. A. Radiation damage of nuclear power plant pressure vessel steels. Illinois USA: La Grange Park, 1997.
5. Theiss T. J., Shum D. K. M., Rolf S. T. Experimental and analytical investigation of the shallow-flaw effects in reactor pressure vessels. USNRC Report NUREG/CR-5886 (ORNL/TM-12115), July 1992.
6. Sumpter J. D. G., Forbes A. T. Constraint based analysis of shallow cracks in mild steel // Proceed. of the Intern. Conf. of Shallow Crack Fracture Mechanics, Toughness Tests and Application, TWI, Cambridge, UK, September 1992.

7. Link R. E., Joyce J. A. Application of fracture toughness scaling models to the ductile-to-brittle transition. USNRC Report NUREG/CR-6279, January 1996.
8. McAfee W. J., Bass B. R., Pennell W. E., Bryson J. W. Analyses and evaluation of constraint models // USNRC Report NUREG/CR-4219 (ORNL/TM-9593/V12&N1), 1996. – P. 16–24.
9. Resent R&D on constraint based fracture mechanics: the Vocalist and NESC-IV projects / D. Lidbary e. a. // Proceed. of Intern. Seminar Transferability of Fracture Toughness Data for Integrity of Ferritic Steel Component, November 17–18, 2004, Petten, The Netherlands. EUR 21491 EN. Luxemburg: Office for official Publications of the European Communities, 2004. – P. 38–58.
10. Stumpfrock L. Constraint modified fracture toughness specimens // Proceed. of Intern. Seminar Transferability of Fracture Toughness Data for Integrity of Ferritic Steel Component, November 17–18, 2004, Petten, The Netherlands. EUR 21491 EN. Luxemburg: Office for official Publications of the European Communities. 2004. – P. 59–74.
11. Gilles P. VOCALIST Handbook // Proceed. of Intern. Seminar Transferability of Fracture Toughness Data for Integrity of Ferritic Steel Component, November 17–18, 2004, Petten, The Netherlands. EUR 21491 EN. Luxemburg: Office for official Publications of the European Communities, 2004. – P. 312–324.
12. An investigation of the transferability of Master Curve technology to shallow flaws in reactor pressure vessel applications / N. G. Taylor, K. -F. Nilsson, P. Minnebo, et al. // NESC-IV Project. Final report EUR 21846 EN. European Commission DG-JRC/IE, Petten, The Netherlands, 2005.
13. Yuritzinn T., Ferry L., Chapuliot S., Mongabure P., Moinereau D., Dahl A., Gilles P. Illustration of the WPS benefit through BATMAN test series. Test on large specimens under WPS loading configurations // Eng. Fract. Mech. – 2008. – V. 75. – P. 2191–2207.
14. Wallin K. Fracture toughness of engineering materials – estimation and application. – EMAS Publishing, 2011.
15. Bilby B. A., Cardew G. E., Goldthorpe M. R., Howard I. C. A finite element investigation of the effects of specimen geometry on the fields of stress and strain at the tips of stationary cracks. Size effects in fracture. – Institution of Mechanical Engineers, London, England, 1986. – P. 36–46.
16. РД ЭО 1.1.2.99.0920–2014 Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпусов водо-водяных энергетических реакторов на стадии проектирования. Методика. – М.: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2014.
17. МТ 1.1.4.02.999.1295–2017 Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет. Методика. – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2017.
18. IAEA Guidelines: Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER nuclear power plants. “VERLIFE”, IAEA, 2014.
19. ASTM E 1921–10. Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range // Annual Book of ASTM Standards.
20. Методика определения вязкости разрушения по результатам испытаний образцов-свидетелей для расчета прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР-1000 // РД ЭО 1.1.2.09.0789–2012. – М.: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012.
21. Dodds R. H., Anderson T. L., Kirk M. T. A framework to correlate a/W ratio effects on elastic-plastic fracture toughness (J_c) // Int. J. Fract. – 1991. – V. 48. – P. 1–22.
22. O'Dowd N. P., Shih C. F. Family of crack-tip fields characterized by a triaxiality parameter: Part I. Structure of fields // J. Mech. Phys. Solids. – 1991. – V. 39. – P. 989–1015.
23. O'Dowd N. P., Shih C. F. Family of crack-tip fields characterized by a triaxiality parameter: Part II. Fracture applications // J. Mech. Phys. Solids. – 1992. – V. 40. – P. 939–963.
24. Margolin, B. Z., Shvetsova, V. A., Gulenko A. G. and Kostylev V. I. Prometey local approach to brittle fracture: Development and application // Eng. Frac. Mech. – 2008. – V. 75. – P. 3483–3498.
25. Anderson T. L., Dodds R. H. Jr. Specimen size requirements for fracture toughness testing in the transition region // Journal of Testing and Evaluation. – 1991. – V. 19, N 2. – P. 123–134.

26. Leevers P. S., Radon J. C. Inherent stress biaxiality in various fracture specimen geometries // *Int. J. Fracture*. – 1983. – V. 19. – P. 311–325.
27. Larsson S. G., Carlsson A. J. Influence of non-singular stress terms and specimen geometry on small-scale yielding at crack tips in elastic-plastic materials // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1973. – V. 21. – P. 263–277.
28. Betegon C., Hancock J. W. Two-parameter characterization of elastic-plastic crack-tip fields // *J. Appl. Mech.* – 1991. – V. 58. – P. 104–110.
29. Beremin, F. M., A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel // *Met. Trans.* – 1983. – 14A. – P. 2277–87.
30. Gao X., Dodds R. H. Jr. Engineering approach to assess constrain effects on cleavage fracture toughness // *Engng. Frac. Mech.* – 2001. – V. 68. – P. 263–283.
31. Wadier Y., Le H. N., Bargellini R. An approach to predict cleavage fracture under non-proportional loading // *Eng. Fract. Mech.* – 2013. – V. 97. – P. 30–51.
32. Ritchie, R. O., Knott, J. F., Rice, J. R., On the relation between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1973. – V. 21. – P. 395–410.
33. Rice J. R. A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks // *J. Appl. Mech.* – 1968. – V. 35. – P. 379–386.
34. Williams M. L. On the stress distribution at the base of a stationary crack // *J. Applied Mechanics*. – 1957. – V. 24. – P. 109–114.
35. Chen J. H., Cao R. Micromechanism of cleavage fracture of metals: a comprehensive micro-physical model for cleavage cracking in metals. – Elsevier, 2015.
36. Bordet S. R., Karstensen A. D., Knowles D. M., Wiesner C. S. A new statistical local criterion for cleavage fracture in steel. Part I: model presentation // *Engng. Fract. Mech.* – 2005. – V. 72. – P. 435–452.
37. Марголин Б. З., Ривкин Е. Ю., Карзов Г. П., Костылев В. И., Гуленко А. Г. Новые подходы к расчету хрупкой прочности корпусов реакторов // *Вопросы Материаловедения*. – 2000. – Вып. 4 (24). – С. 63–75.
38. Karzov G. P., Margolin B. Z., Rivkin E. Y. Analysis of structure integrity of RPV on the basis of brittle fracture criterion: new approaches // *Int. J. Pres. Ves. & Piping*. – 2004. – V. 81. – P. 651–656.
39. Wallin K. Quantifying T-Stress controlled constraint by the Master Curve transition temperature T_0 // *Eng. Fract. Mech.* – 2001. – V. 68. – P. 303–328.
40. Марголин Б. З., Швецова В. А. Критерий хрупкого разрушения: структурно-механический подход // *Проблемы прочности*. – 1992. – № 2. – С. 3–16.
41. Margolin B. Z., Shvetsova V. A. Local criterion for cleavage fracture: structural and mechanical approach. *J. de Physique IV*. – 1996. – V. 6. – P. C6-225–C6-234.
42. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Karzov G. P. Brittle fracture of nuclear pressure vessel steels. Part I. Local criterion for cleavage fracture // *Int. J. Pres. Ves. & Piping*. – 1997. – V. 72. – P. 73–87.
43. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Application of a new cleavage fracture criterion for fracture toughness prediction for RPV steels // *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* – 2006. – V. 29. – P. 697–713.
44. Sherry A. H., France C. C., Goldthorne M. R. Compendium of T-stress solutions for two and three dimensional cracked geometries // *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* – 1995. – V. 18. – P. 141–156.
45. Anderson T. L. *Fracture mechanics – fundamentals and application*. Third ed. – CRC press, Taylor and Francis Group, Boca Ration, 2005.
46. Karzov G., Margolin B. Fracture Mechanisms and Structural Integrity Assessment of Equipments for NPP with Different Types of Reactors // *Proceed. of 19th European Conference on Fracture “Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety”*, Kazan, Russia, 26–31 August, 2012, ID 445.

УДК 621.039.7

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ДЕЗАКТИВАЦИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А. С. ПЕТРОВСКАЯ¹, канд. физ.-мат. наук, С. В. СУРОВ², А. Ю. КЛАДКОВ²,
А. Б. ЦЫГАНОВ¹, канд. физ.-мат. наук

¹ ООО «Спектр-Микро», 191036, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д.29, лит.А, пом. 12-Н,
E-mail: spectrum-micro@mail.ru

² АО «Наука и Инновации», научный дивизион ГК «Росатом», 115035, Москва,
Кадашевская набережная, дом 32/2, строение 1

Поступила в редакцию 05.09.2019

После доработки 17.09.2019

Принята к публикации 26.09.2019

Разрабатываемая нами технология «сухой» дезактивации конструкций ядерных энергетических установок (ЯЭУ) с помощью ионного распыления микроразмерных радиоактивных загрязнений на очищаемой поверхности осуществляется посредством плазменного разряда специальной конфигурации в среде инертного газа с дальнейшим массопереносом распыленного материала и осаждением его на анодную подложку в режиме диффузии. В отличие от традиционных радиохимических способов в нашей технологии радионуклиды не переходят в жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), а конденсируются в компактной твердой форме, что делает возможным их полезное использование. Поскольку эта технология может использоваться как при выводе ЯЭУ из эксплуатации (в том числе для дезактивации облученного реакторного графита), так и в процессе текущей эксплуатации и плановых ремонтов ядерных реакторов, то становится возможным регулярно извлекать концентрат нужных изотопов в необходимых количествах благодаря интенсивным нейтронным потокам в ЯЭУ. Конструкция плазменной распылительной ячейки для удаления радионуклидов с поверхности облученного графита или конструкций ЯЭУ предусматривает зажигание плазменного разряда постоянного тока в среде инертного газа (например, аргона) при давлении $P \sim 0,1-1$ атм и контроль температурных режимов осаждения распыленного материала. Для этого проведен расчет температур на поверхности катода (распыляемый графит), анода (танталовый коллектор) и в аргоновой плазме в зависимости от вкладываемой мощности в разряд. Данные о температуре поверхности катода и коллектора позволяют управлять элементным составом выделяемых атомов и формировать изделия с наноразмерными слоями концентрата радионуклидов для радиационной медицины и новых бета-вольтаических батарей. Таким образом, технология имеет важное значение не только при выводе ЯЭУ из эксплуатации, но и для формирования наноразмерных слоев бета-активных материалов.

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, дезактивация, ионное распыление, плазменная распылительная ячейка, температурный режим, расчетный метод

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2580818. Способ переработки облученного реакторного графита / Беспала Е. В., Павлюк А. О., Измestьев А. М., Котляревский С. Г., Михайлец А. М. Оpubл. 10.04.2016. Заявка № 2015112630/07.
2. Патент РФ № 2320038. Способ и установка для переработки радиоактивных отходов / Арустамов А. Э., Васендин Д. Р., Горбунов В. А., Дмитриев С. А., Лифанов Ф. А., Кобелев А. П., Полканов М. А., Попков В. Н. Оpubл. 27.05.2007. Заявка № 2005135826/06.
3. Беспала Е. В., Павлюк А. О., Ушаков И. А. Плазменная переработка облученного реакторного графита // Сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2015 г. – С. 110–112.
4. Патент РФ № 2192057. Способ переработки отходов реакторного графита и устройство для его реализации / Климов В. Л., Карлина О. К., Павлова Г. Ю., Ожован М. И., Дмитриев С. А., Соболев И. А. Оpubл. 27.10.2002. Заявка № 2001117621/06.
5. LaBrier D., Duzik-Gougar M. L. Characterization of ¹⁴C in neutron irradiated NBG-25 nuclear graphite // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – V. 448. – P. 113–120.

6. Dunzik-Gougar M. L., Smith T. E. Removal of carbon-14 from irradiated graphite // *Journal of Nuclear Materials*. – 2014. – V. 451. – P. 328–335.
7. LaBrier D., Dunzik-Gougar M. L. Identification and Location of 14 C-Bearing Species in Thermally Treated Neutron Irradiated Graphites NBG-18 & NBG-25: Pre-and Post-Thermal Treatment // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – V. 460. – P. 174–183.
8. Dunzik-Gougar M. L., Cleaver J., LaBrier D., McCrory S., Nelson K., Smith T. E. Chemical Characterization and Removal of Carbon-14 from Irradiated Graphite // Report. International Atomic Energy Agency (IAEA). – 2016. – V. 47. – P. 21–31.
9. LaBrier D., Dunzik-Gougar M. L. Characterization of 14C in neutron irradiated NBG-25 nuclear graphite // *Journal of nuclear materials*. – 2014. – V. 448. – P. 113–120.
10. Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Беспала Е. В., Беспала Ю. Р. Перспективы применения исследовательского реактора типа ИРТ-Т для решения задач в рамках проблемы графитовых радиоактивных отходов // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2008. – № 1. – С. 87–98.
11. Vulpius D., Baginski K., Fischer C., Thomauske B. Location and chemical bond of radionuclides in neutron-irradiated nuclear graphite // *Journal of Nuclear Materials*. – 2013. – V. 438. – P. 163–177.
12. Петровская А. С., Кладков А. Ю., Сузов С. В., Цыганов А. Б. Инновационный метод плазменной дезактивации конструкций ядерных энергетических установок и облученного реакторного графита // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. – 2018. – Вып. 4. – С. 185–197.
13. Petrovskaya A. S., Tsyganov A. B., Kladkov A. Yu., Surov S. V., Stakhiv M. R., Polischuk V. A. Surface deactivation of the nuclear power plants constructions by a new plasma method // *Proc. Int. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (IEEE), Saint-Petersburg, 2018*. – P. 230–232.
14. Способ дезактивации элемента конструкции ядерного реактора / Петровская А. С., Стахив М. Р., Цыганов А. Б. Заявка на изобретение РФ № 2018140999 от 21.11.2018 и международная патентная заявка РСТ/RU2018/000909 от 29.12.2018.
15. Патент РФ № 2668533. Суперконденсатор и способ его изготовления / Рисованный В. Д., Булярский С. В., Марков Д. В., Синельников Л. П., Николкин В. Н., Злоказов С. Б., Джанелидзе А. А., Светухин В. В. опубл. 01.10.2018.
16. Патент РФ № 2670281 Электрод суперконденсатора / Сауров А. Н., Козлов С. Н., Живихин А. В., Павлов А. А., Булярский С. В., Светухин В. В., Рисованный В. Д. Опубл. 22.10.2018. Заявка № 2017135331.
17. Гурская А. В., Долгополов М. В., Чепурнов В. И. ^{14}C – бета-преобразователь // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 2017. – Т. 48, вып. 6. – С. 901–909.
18. Martin P. G., Tomkinson N. G., Scott T. B. The future of nuclear security: commitments and actions – power generation and stewardship in the 21st century // *Energy Policy*. – 2017. – V. 110. – P. 325–330.
19. Honig R. E., Kramer D. A. Vapor pressure data for the solid and liquid elements // *RCA Rev.* – 1969. – V. 30. – P. 285–305.
20. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1005 с.
21. Физические величины: Справочник. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1234 с.
22. Мармер Э. Н. Углеродистые материалы: Справочник. – М.: Металлургия, 1973. – 135 с.
23. Нейнмарк Б. Е., Воронин Л. К. Теплопроводность, удельное электрическое сопротивление и интегральная степень черноты тугоплавких металлов при высоких температурах // *Теплофизика высоких температур*. – 1968. – Т. 6, № 6. – С. 1044–1056.
24. Покровский А. С., Белан Е. П., Харьков Д. В. Теплопроводность графита ГР-280, облученного до высокого флюенса нейтронов // *Технические науки*. – 2015. – № 12. – С. 1126–1133.
25. Проблемы прикладной физики. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бериша. – М.: Мир, 1984. – 335 с.
26. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 536 с.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГЛАВНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА РУ БРЕСТ

Е. Д. БЛАНК¹, канд. техн. наук, В. А. ГЕРАСИМОВ¹, М. Г. ШАРАПОВ¹, д-р техн. наук,
А. Н. ВОДОВОЗОВ¹, А. Д. КАШТАНОВ¹, канд. техн. наук, С. Ю. ЩУЦКИЙ², канд. техн. наук,
А. Н. ПЛАКИДИН²

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

²АО ЦКБМ, 190020 Санкт-Петербург наб. Обводного канала, 138, к.1, лит. Б.
E-mail: postbox@ckbm.ru

Поступила в редакцию 24.10.2019

После доработки 12.11.2019

Принята к публикации 15.11.2019

Одним из узлов реакторной установки на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем является главный циркуляционный насос (ГЦНА). Была отработана технология изготовления наиболее трудоемкого узла ГЦНА – напорной камеры – сложной сварной конструкции из листовой стали 10X15H9C3БЗ (ЭП-302Ш), а также разработаны и изготовлены приспособления и оснастка, в результате чего резко снизилась металлоемкость конструкции. Разработана технологическая документация на гибку, штамповку деталей напорной камеры, на сварку узлов и деталей, их термообработку, механическую обработку и сборку. По результатам изготовления данной конструкции существующая технологическая документация была откорректирована применительно к напорной камере ГЦНА.

Ключевые слова: реакторная установка, главный циркуляционный насос, напорная камера, гибка, штамповка, сварка, сборка

ЛИТЕРАТУРА

1. Conceptual Design of Brest-300 Lead-Cooled Fast Reactor / E. O. Adamov, V. V. Orlov, A. T. Filin e. a. // Proc. Int. Topical Meeting on Advanced Reactor Safety, Pittsburg. U.1. – P. 509–515.
2. Ковка и штамповка. Справочник / Под ред. Е. И. Семенова. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 63.
3. Сидельников С. Б., Девженко Н. Н., Константинов И. Л. Теория процессовковки и штамповки. – Красноярск, СФУ, 2017. – С. 11–18.
4. Карзов Г. П., Марков В. Г., Яковлев В. А. Совместимость конструкционных материалов на основе свинца и его сплавов // Прогрессивные материалы и технологии. – 1999. – С. 51–56.
5. Змиенко Д. С., Носов С. И., Алексеенок П. А. Исследование микроструктуры кремней содержащих аустенитно-ферритных Cr–Ni–Nb сварных швов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6.
6. Немчинский А. Л. Об одном источнике управления швов при сварке высокопрочных сталей // Сварка. Сб. статей. – Л.: Судпромгиз, 1968.
7. Барышников А. П., Шарапов М. Г. Сварка корпусных сталей для судостроения и морской техники. – СПб.: Изд-во СПбГПУ. – 2016. – С. 64.
8. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавка. Правила контроля. ПН АЭ Г-7-010-89 (п.9.11.7). Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 238.
9. Белая книга ядерной энергетики / Адамов Е. О., Большов Л. А., Ганев И. Х. и др. / Под ред. Е. О. Адамова. – М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2001. – 270 с.

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Н. В. АЛЕКСАНДРОВ¹, канд. техн. наук, Е. Д. БЛАНК¹, канд. техн. наук,
А. Д. КАШТАНОВ¹, канд. техн. наук, В. В. СТЕПАНОВ¹, В. В. ЛЕМЕХОВ², Ю. В. ЛЕМЕХОВ²,
А. Н. МЕЛЬНИКОВ³

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

² АО «НИКИЭТ», 107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, E-mail: nikiet@nikiet.ru

³ ООО «Мелком-НВ», 121096, Москва, Кастанаевская ул., д. 3–1, E-mail: info@melkom-nv.ru

Поступила в редакцию 29.08.2019

После доработки 18.12.2019

Принята к публикации 18.12.2019

Опыт эксплуатации атомных станций показал, что наиболее перспективными являются быстрые реакторы с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями, в частности с теплоносителями на основе жидкого свинца. В России в последнее время уделяют особое внимание созданию быстрых реакторов, обладающих естественной безопасностью. На этапе испытаний материалов для компонентов реакторных установок возник ряд задач, для решения которых была разработана экспериментальная установка со свинцовым теплоносителем. Установка предназначена для испытания крупногабаритных конструкций и узлов с непрерывным контролем и поддержанием заданных технических параметров. Для надежной циркуляции теплоносителя (скорость циркуляции свинцового теплоносителя до 200 кг/с) был разработан магнитно-гидродинамический насос (МГД-насос), обладающий высоким КПД, надежностью и простотой в эксплуатации и обслуживании. В настоящее время экспериментальная установка успешно используется в научных исследованиях материалов. Все ее системы показали высокую надежность работы, ремонтпригодность и возможность дальнейшей модернизации.

Ключевые слова: атомная энергетика, свинец, установка, жидкометаллический теплоноситель, МГД-насос, безопасность, надежность, перспективность

ЛИТЕРАТУРА

1. Красин В. П., Крылова Е. В., Музыка А. Ю. Жидкометаллические теплоносители с точки зрения их совместимости с конструкционными материалами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – № 3. – С. 77–82.
2. Боришанский В. М., Кутателадзе С. С., Новиков И. И., Федьинский О. С. Жидкометаллические теплоносители. Изд. 2. – М., Атомиздат, 1967.
3. Реактор БРЕСТ с пристанционным ЯТЦ / А. Г. Глазов, В. Н. Леонов и др. // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103, вып. 1. – С. 15–20.
4. Патент РФ № 188786. Электрическая плавильная печь сопротивления / Каштанов А. Д., Шаратов М. Г., Александров Н. В., Бланк Е. Д., Строганова Н. Н., Степанов В. В. // Бюл. – 2019. – № 12.
5. Баранов Г. А., Глухих В. А., Кириллов И. Р. Расчет и проектирование индукционных МГД-машин с жидкометаллическим рабочим телом. – М.: Атомиздат, 1979, 248 с.
6. Волчек Б. Б., Дроник Л. М., Реуцкий С. Ю., Толмач И. М. О поперечном краевом эффекте в плоских индукционных насосах с большой подачей // Магнитная гидродинамика. – 1981. – № 4. – С. 93–100.
7. Патент РФ № 188739. Труба с электроподогревом / Каштанов А. Д., Бланк Е. Д., Александров Н. В., Степанов В. В. // Бюл. – 2019. – № 12.
8. Аснович Э. З., Забырина К. И., Колганова В. А., Тареев Б. М. Электроизоляционные материалы высокой нагревостойкости. – М.: Энергия, 1979. – 239 с.

УДК 669.15–194.56: 621.039.531:539.421

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РОСТА КОРОТКИХ И ДЛИННЫХ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ОБЛУЧЕННЫХ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗЦАХ.

Часть 2. Разработка и апробация методики построения полных кинетических диаграмм роста усталостных трещин

В. И. СМИРНОВ¹, канд. техн. наук, А. И. МИНКИН¹, Б. З. МАРГОЛИН¹, д-р техн. наук,
С. М. БАЛАКИН²

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

²НАО «Компрессорный комплекс», 192029, Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 51,
E-mail: okid@mbfkk.ru

Поступила в редакцию 23.08.2019

После доработки 2.10.2019

Принята к публикации 9.10.2019

Выполнены расчеты коэффициента интенсивности напряжений методом конечных элементов для образца типа SE(B), определена весовая функция для этого типа образца, позволяющая вычислять КИН для изгибных образцов с надрезом разной геометрии (от полукруглого до острого U-образного) при известном распределении напряжений в вершине надреза. Апробирована методика построения полных кинетических диаграмм роста коротких и длинных усталостных трещин, инициированных из острого надреза, с учетом особенностей роста коротких усталостных трещин в зоне влияния исходного надреза. Построены полные кинетические диаграммы роста усталостных трещин (коротких и длинных) в стали 08X18H10T и в металле сварного шва в исходном и облученном до 40 сна состояниях.

Ключевые слова: кинетика роста коротких и длинных усталостных трещин, аустенитная сталь, нейтронное облучение, циклическая трещиностойкость

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. 111–122.
2. Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Сорокин А. А., Кохонов В. И. Влияние нейтронного облучения на скорость роста усталостных трещин в аустенитной стали 08X18H10T и металле ее сварных соединений // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 2(74). – С. 123–138.
3. Смирнов В. И., Минкин А. И., Марголин Б. З., Кохонов В. И. Методические особенности исследования кинетики роста коротких и длинных усталостных трещин в облученных реакторных материалах на малоразмерных образцах. Часть 1. Постановка задачи. Исследование влияния остроты исходного надреза на кинетические диаграммы роста усталостных трещин в образцах // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 2(98). – С. 191–202.
4. Jergeus H. A. A simple formula for the stress intensity factors of cracks in side notches // Int. J. of Fract. – 1972. – V.14, Is. 3. – P. 113–116.
5. Harkegard G. An effective stress intensity factor and the determination of the notched fatigue limit // Fatigue Thresholds: Fundamentals and Engineering Applications. V. 2 / J. Backlund, A. F. Blom, C. J. Beevers (eds.). – London: Chameleon Press Ltd., 1981. – P. 867–879.
6. Wormsen A., Fjeldstad A., Härkegård G. The application of asymptotic solutions to a semi-elliptical crack at the root of a notch // Eng. Fract. Mech. – 2006. – V. 73, Is. 13. – P. 1899–1912.
7. Fjeldstad A. Modeling of Fatigue Crack Growth at Notches and Other Stress Raisers // Thesis for the degree philosoph. doctor. Norwegian University of Science and Technology. – Trondheim, 2007.
8. McDowell D. L. Basic issues in the mechanics of high cycle metal fatigue // Int. J. of Fract. – 1996. – V. 80. – P. 80–103
9. Ritchie R.O., Lankford J. Small fatigue cracks: a statement of the problem and potential solutions // Material Science and Engineering. – 1996. – vol. 84, – pp.11-16.
10. Tanaka K., Nakai Y. Propagation and non-propagation of short fatigue cracks at a sharp notch // Fatigue and Fracture Engineering Material and Structure. – 1983. – V. 6, N 4. – P. 315–327.

11. Shin C.S., Smith R.A. Fatigue crack growth at stress concentrations: stress concentrations: the role of notch plasticity and crack closure // *Eng. Fract. Mech.* – 1988. – V. 29, Is. 3. – P. 301–315.
12. ASTM E1820-13. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
13. Fett T. Stress Intensity Factors. T-Stresses. Weight Functions. – Institute of Ceramics in Mechanical Engineering, University of Karlsruhe, 2008. – 362 p.
14. Aratania M., Knott J. F. The growth of short fatigue cracks ahead of a notch in high strength steel // *Eng. Failure Analysis.* – 2010. – V. 17, Is. 1. – P. 200–207.
15. Weight functions, CTOD, and related solutions for cracks at notches / Jones et al. // *Eng. Failure Analysis.* – 2004. – V. 11, Is. 1. – P. 79–114.
16. Shen G. and Glinka G. Determination of weight functions from reference stress intensity factors // *Theoretical and Applied Fract. Mech.* – 1991. – V. 15. – P. 237–245.
17. Glinka G., Newport A. Universal features of elastic notch tip stress fields // *Int. J. of Fatig.* – 1987. – V. 9, N 3. – P. 143–150.
18. ASTM STP 1149. Small-Crack Test Methods / Larsen, J. M. and Allison J. E. Eds., ASTM – 1992. – 356 p.
19. ASTM E647-13. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.
20. RCC-MR, Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands, Appendix A16, Edition 2002, AFCEN, France, 2002.
21. ISO 12108:2002. Metallic materials. Fatigue testing. Fatigue crack growth method.
22. Larsen J. M., Jira J. R., Ravichandran K. S. Measurement of Small Cracks by Photomicroscopy: Experiments and Analysis // ASTM STP 1149. – P. 57–80.
23. Davidson D., Chan K., McClung R., Hudak S. Small fatigue cracks // *Comprehensive structural integrity*. Eds. R. O. Ritchie, Y. Murakami. V. 4. – Elsevier, 2003. – P. 129–164.
24. Zerbst U., Vormwald M., Pippan R., Gänser Hans-Peter, Sarrazin-Baudoux C., Madia M. About the fatigue crack propagation threshold of metals as a design criterion. A review // *Eng. Fract. Mech.* – 2016. – V. 153. – P. 190–243.
25. Kendall J. M., King J. E. Short Fatigue Crack Growth Behaviour: Data Analysis Effects // *Int. J. of Fatigue.* – 1988. – V. 10. – P. 163–170.
26. Hudak S. J. Jr, Saxena A., Bucci R. J., Malcolm R. C. Development of standard methods of testing and analyzing fatigue crack growth rate data // *Tech. Report AFML-TR-78-40.* – Westinghouse R & D Center, 1978.
27. Херцберг П. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. – М.: Металлургия, 1989. – 575 с.
28. Smith R. A., Miller K. J. Prediction of fatigue regimes in notched component // *Int. J. of Mech. Sc.* – 1978. – V. 20. – P. 201–206.
29. Hammouda M. M., Smith R. A., Miller K. J. Elastic plastic fracture mechanics for initiation and propagation of notch fatigue cracks // *Fat. and Fract. Eng. Material and Structure.* – 1979. – V. 2. – P. 139–154.
30. Смирнов В.И., Марголин Б.З., Лапин А.Н., Кохонов В.И., Сорокин А.А. Исследование влияния нейтронного облучения на вязкость разрушения стали 08X18H10T и металла ее сварных швов // *Вопросы материаловедения.* – 2011. – № 1(65). – С. 167–183.
31. Hussain K., De los Rios, E. R., Navarro A. A two-stage micromechanics model for short fatigue cracks // *Eng. Fract. Mech.* – 1993. – V. 44, N 3. – P. 425–436.
32. Кишкина С.И. Структурные особенности роста коротких трещин в высокопрочной стали // *Физико-химическая механика материалов.* – 1991. – Т. 27, № 5. – С. 48–52.
33. Dong P., Hong J.K., Cao Z. Stresses and stress intensities at notches: 'anomalous crack growth' revisited // *Int. J. of Fatig.*, – 2003. – V. 25, N. 9–11. – P. 811–825.