

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

- Оленин М. И., Романов О. Н., Бушуев С. В., Каштанов А. Д., Афанасьев С. Ю., Бережко Б. И., Шахьян С. А., Апинов Ж. Э.* Оценка влияния гомогенизационного отжига на критическую температуру хрупкости кованных заготовок из стали марки 15Х2МФА-А..... 5
- Никитина В. Р., Пазилова У. А., Хлусова Е. И.* Влияние ванадия и ниобия на фазовые превращения в хромоникельмолибденовой судостроительной стали 15
- Милюц В. Г., Бадаев А. В., Цуканов В. В., Левагин Е. Ю., Бызов Д. П., Воробьев А. Б.* Влияние расхода и содержания кальция на качество стали 10ХСНД, изготовленной из непрерывно-литых слябов... 27
- Коротковская С. В., Сыч О. В., Хлусова Е. И., Забавичева Е. В.* Влияние содержания хрома в низкоуглеродистых сталях бейнитно-мартенситного класса на характеристики работоспособности. 36
- Овсепян С. В., Ахмедзянов М. В., Лукина Е. А., Расторгуева О. И.* Влияние термической обработки на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава на основе Ni-Fe-Co-Nb-Ti-Ta..... 48
- Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Чабина Е. Б., Раевских А. Н.* Исследование структурно-фазовых превращений в литейном конструкционном сплаве на основе интерметаллида Ni₃Al после высокотемпературных выдержек и в процессе наработки сплава в качестве сопловой лопатки 60
- Иголкин А. И., Лебедева Н. В., Максименко И. А.* Структура и свойства тавровых соединений титанового сплава ВТ6С в процессе диффузионной пайки 71

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Гошкодеря М. Е., Сердюк Н. А., Бобкова Т. И., Каширина А. А., Старицын М. В., Нестерова Е. Д.* Исследование зависимости свойств титановых покрытий от технологических режимов напыления на микроплазменной установке УГНП-7/225054..... 80
- Майоров Д. В., Колкова Е. К.* Влияние замещения магния на цинк в составе слоистых двойных гидроксидов алюминия на их физико-химические свойства..... 87
- Жаров М. В.* Построение математической модели процесса охлаждения и кристаллизации металлических капель при гранулировании центрифугированием расплава 98
- Дорошенко Е. М., Ким Е. Д., Рассказова А. В., Ри Э. Х.* Исследование фазового состава промежуточного продукта обогащения с последующим моделированием составов солей калия и натрия для разложения арсенипирита 113

ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Дворянцев Д. Д., Саргсян А. С., Анисимов А. В., Лишевич И. В.* Получение высокопрочного углепластика на основе полифениленсульфида с помощью метода ATL с лазерным нагревом 125

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

- Марголин Б. З., Гуленко А. Г.* Метод расчета усталостного повреждения при циклическом сложном нагружении с учетом влияния скорости деформирования 136

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

- Мирмухамедов М. М., Джобиров У. Р., Ганиев И. Н., Обидов З. Р.* Анодное поведение и окисление сплава Zn₂₂Al, легированного скандием 147

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Кудрявцев А. С.* О выборе конструкционного материала для парогенератора реакторной установки с натриевым теплоносителем 155
- Марголин Б. З., Юрченко Е. В.* Дозовые зависимости для материалов корпусов реакторов ВВЭР и их опорных конструкций..... 166
- Саркисов С. Э., Юсим В. А.* Радиационные эффекты воздействия γ -облучения на кристаллы флюорита с примесью трехвалентных редкоземельных ионов 195

УДК 669.15–194:621.785.3:621.73

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГОМОГЕНИЗАЦИОННОГО ОТЖИГА НА КРИТИЧЕСКУЮ ТЕМПЕРАТУРУ ХРУПКОСТИ КОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ МАРКИ 15Х2МФА-А

М. И. ОЛЕНИН¹, д-р техн. наук, О. Н. РОМАНОВ¹, канд. техн. наук, С. В. БУШУЕВ¹,
А. Д. КАШТАНОВ¹, д-р техн. наук, С. Ю. АФАНАСЬЕВ², Б. И. БЕРЕЖКО¹, канд. техн. наук,
С. А. ШАХКЯН¹, Ж. Э. АПИНОВ¹

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

²Филиал АО «АЭМ-технологии» «АЭМ-Спецсталь», 196650, Санкт-Петербург, г. Колпино,
Ижорский завод, д. 6/н

Поступила в редакцию 16.01.2023

После доработки 10.03.2023

Принята к публикации 10.03.2023

Исследовано влияние длительности гомогенизационного отжига на критическую температуру хрупкости корпусной реакторной стали марки 15Х2МФА-А. Определен критерий расчета длительности гомогенизационного отжига – суммарная длительность нагрева слитка и поковки перед первым и вторым выносами. Показано, что для достижения $T_{к0}$ не менее минус 50°С при нагреве слитков и поволоков перед первым и вторым выносами требуется суммарная удельная выдержка при температуре 1220±20°С не менее 2,5 мин на 1 мм сечения.

Ключевые слова: корпусная реакторная сталь, кованые заготовки, гомогенизационный отжиг, критическая температура хрупкости

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-05-14

ЛИТЕРАТУРА

1. Стали и сплавы энергетического оборудования. Справочник / Под ред. С. Б. Рыжова. – М.: Машиностроение, 2008. – 960 с.
2. Бескоровайный Н. М., Калинин Б. А., Платонов П. А., Чернов И. И. Конструкционные материалы ядерных реакторов: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 704 с.
3. Азбукин В. Г., Горынин В. И., Павлов В. Н. Перспективные коррозионно-стойкие материалы для оборудования и трубопроводов АЭС. – СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 1997. – 118 с.
4. Марочник сталей и сплавов: 2-е изд., доп. и испр. // А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др. / Под общей ред. А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
5. Онищенко А. К., Беклемищев Н. Н. Теория промышленнойковки стали и сплавов – М.: Спутник, 2011. – 245 с.
6. Кудря А. В., Соколовская Э. А., Нго Х. Н., Кайкибаева А. С. Связь неоднородности свойств крупных поволоков со структурой // Электрометаллургия. – № 5. – 2018. – С. 30–35.
7. Гуляев А. П., Гуляев А. А. Металловедение: Учебник для вузов. – М.: Альянс, 2015. – 644 с.
8. Охрименко Я. М., Тюрин В. А. Теория процессовковки слитков на прессах. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
9. Мовчан Б. А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах. – Киев: Гос. изд-во техн. лит-ры УССР, 1962. – 340 с.
10. Патент РФ № 2415183. Способ производства поволоков из низкоуглеродистых ферритно-перлитных сталей / Оленин М. И., Бережко Б. И., Быковский Н. Г., Романов О. Н., Сергеев Ю. В., Бушуев С. В. Оpubл. 10.03.2011 // Бюл. № 7.
11. Анастасиади Г. П., Сильников М. В. Неоднородность и работоспособность стали. – СПб.: Полигон, 2002. – 624 с.

12. Горынин В. И., Оленин М. И. Пути повышения хладостойкости сталей и сварных соединений. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2017. – 342 с.
13. Харламов А. А. DEFORM – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением [электронный ресурс]. – М., 2003. URL: <https://sapr.ru/article/7481> (дата обращения: 15.02.2022).
14. Оленин М. И., Романов О. Н., Каштанов А. Д. Влияние гомогенизирующего отжига на снижение трещинообразования поковок из стали марки 08X18H10T // Вопросы материаловедения. – № 2 (110). – 2022. – С. 15–27.
15. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
16. Сань Вен Жень, Юаньчунь Хуан, Ю. Лью. Воздействие гомогенизирующего отжига на микроструктуру и свойства листового проката литого Al–Mg–Si сплава // ФМиМ. – Т. 19, № 8. – 2018. – С. 836–843.
17. Вахромов Р. О, Ткаченко Е. А., Лушкина Е. А., Селиванов А. А. Влияние гомогенизационного отжига на структуру и свойства слитков из сплава 1933 системы Al–Zn–Mg–Cu // ВИАМ. – 2015. – № 11. – С. 3–12.
18. Богданова Т. А., Меркулова Г. А, Перебоева А. А, Орелкина Т. А, Копейкин А. Ю. Оптимизация литой структуры сплава Mg–Zn–Zr перед горячей деформацией // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М. Ф. Решетникова. Технологические процессы и материалы. – С. 148–153.
19. Беляков А. Н., Кайбышев Р. О., Янушкевич Ж. Ч., Луговская А. С. Способ деформационно-термической обработки низколегированной стали // Патент РФ № 2631068 от 18.09.2017 г.
20. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г 7-002–86). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 526 с.
21. Теплухина И. В, Грекова И. И., Дюков В. В., Савельева И. Г. Влияние тепловых выдержек на критическую температуру хрупкости сталей Cr–Mo–V и Cr–Ni–Mo–V для корпусов реакторов с водой под давлением // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 2 (50). – С. 19–27.
22. Берштейн М. Л. Структура деформированных сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 330 с.
23. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 480 с.
24. Онищенко А. К. Мегапластическая деформация и оптимальная величина укова слитков // Технология металлов. – № 10. – 2006. – С. 12–15.
25. Голиков И. Н., Масленков С. Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. – М.: Металлургия, 1977. – 224 с.

УДК 669.15'26'24'28–194: 669.785.017.3

ВЛИЯНИЕ ВАНАДИЯ И НИОБИЯ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ХРОМОНИКЕЛЬМОЛИБДЕНОВОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ

В. Р. НИКИТИНА, У. А. ПАЗИЛОВА, канд. техн. наук, Е. И. ХЛУСОВА, д-р техн. наук

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

Поступила в редакцию 1.03.2023

После доработки 15.03.2023

Принята к публикации 21.03.2023

Исследовано влияние микролегирования ниобием и ванадием на фазовые превращения и структуру хромоникельмолибденовой стали при закалке, в том числе после предшествующей горячей пластической деформации. В качестве объекта исследования была выбрана низкоуглеродистая хромоникельмолибденовая сталь с различным содержанием легирующих и микролегирующих элементов. Выполненные исследования позволили установить закономерности влияния микролегирующих добавок, горячей пластической деформации и размера зерна на фазовые превращения и

структурные особенности хромоникельмолибденовой стали. Результаты исследования могут быть использованы при совершенствовании известных или создании новых технологий производства.

Ключевые слова: низкоуглеродистая микролегированная хромоникельмолибденовая сталь, ниобий, ванадий, фазовые превращения, горячая пластическая деформация, структура, термокинетическая диаграмма

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-15-26

ЛИТЕРАТУРА

1. Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Возможности повышения прочностных характеристик экономнолегированных высокопрочных сталей за счет образования наноразмерных карбидов // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 3 (59). – С. 52–64.

2. Пазилова У. А., Хлусова Е. И., Князюк Т. В. Влияние режимов горячей пластической деформации при закалке с прокатного нагрева на структуру и свойства экономнолегированной высокопрочной стали // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 3 (91). – С. 7–19.

3. Сыч О. В., Голубева М. В., Хлусова Е. И. Разработка хладостойкой свариваемой стали категории прочности 690 МПа для тяжело нагруженной техники, работающей в арктических условиях // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 4. – С. 17–25.

4. 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 // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 4 (100). – С. 7–19.

5. Козвонин В. А., Шацов А. А., Ряпосов И. В., Закирова М. Г., Генералова К. Н. Структура, фазовые превращения, механические свойства и хладостойкость низкоуглеродистых мартенситных сталей // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117, № 8. – С. 862–870.

6. Полецков П. П., Гущина М. С., Копцева Н. В., Никитенко О. А., Ефимова Ю. Ю. Исследование влияния никеля на структурно-фазовые превращения и свойства высокопрочной среднеуглеродистой комплексно-легированной стали // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2019. – № 11 (773). – С. 8–13.

7. Золоторевский Н. Ю., Зисман А. А., Панпурин С. Н., Титовец Ю. Ф., Голосиенко С. А., Хлусова Е. И. Влияние размера зерна и деформационной структуры аустенита на кристаллогеометрические особенности бейнита и мартенсита низкоуглеродистых сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 10. – С. 39–48.

8. Голубева М. В. Хладостойкая свариваемая сталь класса прочности 690 МПа для тяжело нагруженной техники // Дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. – Санкт-Петербург, 2019. – 216 с.

9. Сошина Т. В. Разработка технологических методов эффективного измельчения зерна аустенита при горячей прокатке хладостойких высокопрочных сталей // Дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. – Санкт-Петербург, 2013. – 214 с.

УДК 669.046.554:669.049.7

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА И СОДЕРЖАНИЯ КАЛЬЦИЯ НА КАЧЕСТВО СТАЛИ 10ХСНД, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ НЕПРЕРЫВНО-ЛИТЫХ СЛЯБОВ

В. Г. МИЛЮЦ¹, А. В. БАДАЕВ¹, В. В. ЦУКАНОВ¹, д-р техн. наук, Е. Ю. ЛЕВАГИН¹, Д. П. БЫЗОВ²,
А. Б. ВОРОБЬЕВ²

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

²АО «Северсталь Менеджмент», 162608, Вологодская обл., г. Череповец, ул. Мира, д. 30.
E-mail: severstal.com

Поступила в редакцию 20.03.2023

После доработки 29.03.2023

Принята к публикации 3.04.2023

Исследовано влияние расхода кальция при внепечной обработке и его содержания в готовом металле на качество листовой стали марки 10ХСНД, полученной из непрерывно-литых слябов. По результатам оценки макроструктуры слябов, полученных из непрерывно-литой заготовки, а также

после проведенных испытаний готового металла по определению ударной вязкости, загрязненности неметаллическими включениями, температуры вязкохрупкого перехода сделаны выводы о влиянии расхода и содержания кальция в металле на его качество.

Ключевые слова: качество листового проката, внепечная обработка, обработка кальцийсодержащими материалами, непрерывно-литая заготовка, макроструктура, ударная вязкость, неметаллические включения, температура вязкохрупкого перехода

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-27-35

ЛИТЕРАТУРА

1. Дюдкин Д. А., Бать С. Ю., Гринберг С. Е., Кисиленко В. В., Онищук В. П. Внепечная обработка расплава порошковыми проволоками. Глава 4. – Донецк: ООО «Юго-Восток», 2002. – 295 с.
2. Пеликани Ф., Дюран Б., Гессье А. и др. Основы обработки стали кальцием и его усвоение // Обработка стали кальцием: Материалы международного симпозиума по обработке стали кальцием (Глазго, 30 июня 1988 г.). – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1989. – С. 45–58.
3. Ицкович Г. М. Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений. – М.: Металлургия, 1981. – 296 с.
4. Милюц В. Г., Малахов Н. В., Владимиров Н. Ф., Батов Ю. М. Влияние алюминия и кальция на пластичность толстолистовой судостроительной стали в Z-направлении // *Металлург*. – 2011. – № 2. – С. 58–60.
5. Дюдкин Д. А. Особенности комплексного воздействия кальция на свойства жидкой и твердой стали // *Сталь*. – 1999. – № 1. – С. 20–25.
6. Туркдоган Е. Т. Металлургические последствия усвоения кальция жидкой и затвердевающей сталью // Материалы международного симпозиума «Обработка стали кальцием», Глазго, 30 июня 1988 г. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1989. – С. 45–58.
7. Дюдкин Д. А. Качество непрерывно-литой стальной заготовки. – Киев: Техника, 1988. – 253 с.
8. Кисиленко В. В., Дюдкин Д. А., Онищук В. П., Сочнев Д. А. Комплексная технология производства качественной стали с использованием порошковых проволок // Труды шестого конгресса сталеплавыльщиков, Череповец, 17–19 октября 2000 г. – М.: АО «Черметинформация», 2001. – С. 369–373.
9. Гателъе С., Гайе Г., Нади М. Прогнозирование состава включений в обработанных кальцием сталях // Материалы международного симпозиума «Обработка стали кальцием», Глазго, 30 июня 1988 г. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1989. – С. 75–86.
10. Дюдкин Д. А., Кисиленко В. В., Смирнов А. Н. Производство стали. Т. 4: Непрерывная разливка металла. – М.: Теплотехник, 2009. – 528 с.
11. Милюц В. Г., Цуканов В. В., Павлова А. Г., Смирнова Д. Л. Исследование качества высокопрочной судостроительной стали с высокой концентрацией кальция // *Вопросы материаловедения*. – 2019. – № 2. – С. 20–26.

УДК 669.14.018.295:621.771.016:669.017.3

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ХРОМА В НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ БЕЙНИТНО-МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

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

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

Поступила в редакцию 27.03.2023

После доработки 11.05.2023

Принята к публикации 15.05.2023

Изучено влияние содержания хрома на фазовые превращения в низкоуглеродистой высокопрочной стали для судостроения. В промышленных условиях были изготовлены два листовых проката толщиной 50 мм из стали с содержанием хрома 1,08 и 0,42% по технологии горячая прокатка с

последующей печной закалкой и высокотемпературным отпуском, определены стандартные механические свойства и характеристики работоспособности. С помощью оптической и просвечивающей электронной микроскопии выявлены структурные особенности стали.

Ключевые слова: экономнолегированная высокопрочная сталь, закалка с печного нагрева, фазовые превращения, листовой прокат, структура, речный мартенсит, гранулярный бейнит, речный бейнит, свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-36-47

ЛИТЕРАТУРА

1. Орыщенко А. С., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Современные конструкционные стали для Арктики // Судостроение. – 2013. – № 3. – С. 46–49.
2. Легостаев Ю. Л. Вклад ЦНИИ КМ «Прометей» в создание морской инженерной техники для разведки и добычи углеводородов на морском шельфе // МиТОМ. – 1987. – № 11. – С. 60–62.
3. Легостаев Ю. Л., Карчевская Н. И., Харчевников В. П. Хладостойкая низколегированная сталь // По пути созидания. – СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ КМ «Прометей», 1999.
4. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Принципы легирования, фазовые превращения, структура и свойства хладостойких свариваемых судостроительных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. – № 1. – С. 9–15.
5. Хлусова Е. И. Фазовые превращения, структура и оценка упрочнения судостроительной стали нормальной, повышенной и высокой прочности // Вопросы материаловедения. – 2004. – № 2 (38). – С. 5–23.
6. Коноплева Е. В., Спасский М. Н., Баязитов В. М. Особенности строения и механические свойства сталей с мартенситно-бейнитной структурой // ФММ. – 1986. – № 3. – С. 67–76.
7. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А., Легостаев Ю. Л., Семичева Т. Г. Основные аспекты создания и применения высокопрочной конструкционной стали // Вопросы материаловедения. – 1999. – № 3. – С. 7–20.
8. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315–750 МПа для Арктики. Часть 1. Принципы легирования и требования к структуре листового проката // Вопросы материаловедения. – 2018. – № 3 (95). – С. 5–23.
9. Гусев М. А., Ильин А. В., Ларионов А. В. Сертификация судостроительных материалов для судов, эксплуатирующихся в условиях Арктики // Судостроение. – 2014. – № 5. – С. 39–43.
10. Солнцев Ю. П. Хладостойкие стали и сплавы: Учебник. – СПб.: Химиздат. – 2005. – 480 с.
11. Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И., Пазилова У. А. Влияние скорости охлаждения при закалке высокопрочной хромоникельмедьмолибденовой стали на изменение структуры и механических свойств в процессе отпуска // Вопросы материаловедения. – 2003. – № 2 (34). – С. 5–13.
12. Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. Влияние структуры, сформированной при закалке, на свойства высокопрочной хладостойкой стали после отпуска // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 1 (53). – С. 32–44.
13. Малышевский В. А., Семичева Т. Г., Хлусова Е. И. Влияние легирующих элементов и структуры на свойства низкоуглеродистой улучшаемой стали // Металловедение и термическая обработка. – 2001. – № 9. – С. 5–9.

УДК 669.245.018.44:621.785

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni-Fe-Co-Nb-Ti-Ta

С. В. ОВСЕПЯН, канд. техн. наук, М. В. АХМЕДЗЯНОВ, Е. А. ЛУКИНА, канд. техн. наук,
О. И. РАСТОРГУЕВА

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17. E-mail: lab3@viam.ru

Поступила в редакцию 31.01.2023

После доработки 10.02.2023

Принята к публикации 21.02.2023

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

Исследовано влияние термической обработки на структуру и свойства нового свариваемого жаропрочного никелевого сплава на основе Ni–Fe–Co–Nb–Ti–Ta с низким термическим коэффициентом линейного расширения, предназначенного для изготовления деталей газотурбинных двигателей. Изучена стабильность интерметаллидной глобулярной фазы при закалке, особенности выделения пластинчатых частиц в процессе отжига после закалки. Показано, что сформированная при термической обработке структура с наноразмерными кубоидными и округлыми частицами γ' -фазы, а также с присутствием небольшого количества пластинчатых выделений η -фазы по границам зерен обеспечивает высокий уровень свойств с превосходством по длительной прочности в сравнении с железоникелевыми серийными сплавами аналогичного назначения. При равномерных выделениях γ' -фазы достигается более высокая прочность при кратковременных испытаниях.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, термическая обработка, термический коэффициент линейного расширения, интерметаллидная фаза, пластинчатая фаза, жаропрочность, прочность, старение

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-48-59

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С., Сидоров В. В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. – 2013. – № 3. – С. 47–54.
3. Lagow D. W. Materials Selection in Gas Turbine Engine Design and the Role of Low Thermal Expansion Materials // *JOM*. – 2016. – N 68. – P. 2770–2775.
4. Smith D. F., Tillack D. J., McGrath J. P. A Low-Expansion Superalloy for Gas-Turbine Applications // *ASME 1985 Beijing International Gas Turbine Symposium and Exposition Beijing, People's Republic of China*. – 1985. – P. 1–9.
5. Симс, Ч. Т., Столофф Н. С., Хагель У. К. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
6. Incoloy 903 // Special Metals Corporation. URL: www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/incoloy/incoloy-alloy-903.pdf (дата обращения 17.01.2023).
7. Incoloy 907 // Special Metals Corporation. URL: www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/incoloy/incoloy-alloy-907.pdf (дата обращения 17.01.2023).
8. Incoloy 909 // Special Metals Corporation. URL: www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/incoloy/incoloy-alloy-909.pdf (дата обращения 17.01.2023).
9. Inconel 718 // Special Metals Corporation. URL: www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718.pdf (дата обращения 17.01.2023).
10. Gialanella S., Malandrucolo A. Aerospace Alloys // *Springer Nature*. – 2019. – P. 570.
11. Finet L., Esin V. A., Maurel V., Nazé L. Composition and Temperature Stability of η and δ Phases for Future Nickel-Base Superalloys for Turbine Disks Application // *Superalloys*. – 2020. – P. 112–121.
12. Reed R. C. The Superalloys: Fundamentals and Applications // NY: Cambridge University Press. – 2008. – 392 p.
13. Antonov S., Huo J., Feng Q., Isheim D., Seidman D. N., Helmink R. C., Sun E., Tin S. σ and η Phase formation in advanced polycrystalline Ni-base superalloys // *Materials Science and Engineering: A687*. – 2017. – P. 232–240.
14. Ernst S. C., Baeslack III W. A., Lippold J. C. Weldability of high-strength, low-expansion superalloys // *Welding Research Supplement*. – 1989. – V. 7, N 4. – P. 418–430.
15. Balachander M. Microstructural characterization and thermal fatigue study of a coated Incoloy 909 superalloy // *A Thesis Submitted to The Faculty of Graduate Studies In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering University of Manitoba Winnipeg, Manitoba*. – 2010. – P. 264.

16. Fencheng Liu, Feiyue Lyu, Fenggang Liu, Xin Lin, Chunping Huang. Laves phase control of Inconel 718 superalloy fabricated by laser direct energy deposition via δ aging and solution treatment // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – V. 9, Is. 5. – P. 9753–9765.

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

18. Каблов Е. Н., Летников М. Н., Оспенникова О. Г., Бакрадзе М. М., Шестакова А. А. Особенности формирования частиц упрочняющей γ' -фазы в процессе старения высоколегированного жаропрочного деформируемого никелевого сплава ВЖ175-ИД // Труды ВИАМ. – 2019. – № 9 (81). – С. 3–14. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 17.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-3-14.

19. Ломберг Б. С., Шестакова А. А., Бакрадзе М. М., Карачевцев Ф. Н. Исследование стабильности γ' -фазы размером менее 100 нм в жаропрочном никелевом сплаве ВЖ175-ИД // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 4. – С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-3-10.

20. Шестакова А. А., Карачевцев Ф. Н., Жебелев Н. М. Исследование влияния температуры старения на структурно-фазовые превращения в сплаве ВЖ177 // Труды ВИАМ. – 2018. – № 5. – Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 17.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-3-11.

21. Ломберг Б. С., Шестакова А. А., Летников М. Н., Бакрадзе М. М. Влияние температуры и напряжений на характер наночастиц γ' -фазы в сплаве ВЖ175-ИД // Труды ВИАМ. – 2019. – № 12. – Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 17.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-3-10.

22. Forbes J. R. M., Jackman L. A. The Structural Evolution of Superalloy Ingots during Hot Working // JOM. – 1999. – V. 5, Is. 1. – P. 27–31.

23. Antonov S., Detrois M., Helmink R. C., Tin S. Precipitate phase stability and compositional dependence on alloying additions in γ - γ' - δ - η Ni-base superalloys // Journal of Alloys and Compounds Elsevier. – 2015. – V. 626. – P. 76–86.

24. Жаропрочный деформируемый сплав на основе никеля с низким температурным коэффициентом линейного расширения и изделие, выполненное из него: пат. 2721261 Рос. Федерация. – № 2019140925; заявл. 11.12.19; опубл. 18.05.20 // Бюл. № 14. – 7 с.

25. Babaie Sangetabi S. S., Abbasi S. M., Mahdavi R. Experimental selection of the initial dissolution treatment temperature range for the subsequent cold rolling of IN907 superalloy sheet // Heliyon. – 2022. – V. 8, Is. 8. – e10138.

26. Azadian S., Wei L.-Y., Warren R. Delta phase precipitation in Inconel 718 // Materials Characterization. – 2004. – N 53. – P. 7–16.

27. Boussinot G., Finel A., Le Bouar Y. Phase field modeling of bimodal microstructures in nickel-base superalloys // Acta Mater. – 2009. – N 57. – P. 921–931.

28. Antolovich S. D., Armstrong R. W. Plastic strain localization in metals: origins and consequences // Progress in Materials Science. – 2014. – № 59. – P. 1–160. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.06.001.

29. Zhao L., He J., Tao W., Shuhong F., Yong Z. Microstructure Evolution of GH2909 Low Expansion Superalloy During Heat Treatment // Acta Metall Sin. – 2022. – № 58 (9). – P. 1179–1188.

30. Авиационные материалы: справочник в 13 т. Т. 2: Деформируемые жаропрочные стали и сплавы. 7-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е. Н. Каблова. – М.: ВИАМ. – 2018.

УДК 669.017.165:669.017.3:621.78.013

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ЛИТЕЙНОМ
КОНСТРУКЦИОННОМ СПЛАВЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ni_3Al
ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫДЕРЖЕК
И В ПРОЦЕССЕ НАРАБОТКИ СПЛАВА В КАЧЕСТВЕ СОПЛОВОЙ ЛОПАТКИ**

О. А. БАЗЫЛЕВА, канд. техн. наук, Э. Г. АРГИНБАЕВА, канд. техн. наук,
Е. Б. ЧАБИНА, канд. техн. наук, А. Н. РАЕВСКИХ

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17, E-mail: lab3@viam.ru

Поступила в редакцию 9.02.2023
После доработки 13.02.2023
Принята к публикации 21.02.2023

Представлены исследования структурных и фазовых превращений в интерметаллидных композициях на основе соединения Ni_3Al в зависимости от легирования и высокотемпературных обработок, проведенные в процессе создания литейного конструкционного сплава для эксплуатации в диапазоне температур 900–1200°C. Экспериментально при опробовании разработанного интерметаллидного сплава в качестве сопловых лопаток 1-й ступени турбины высокого давления подтверждено, что сплав термически стабилен при температурах до 1200°C.

Ключевые слова: литейный конструкционный сплав, интерметаллидные сплавы, сопловые лопатки, высокотемпературные выдержки, структурно-фазовые превращения

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-60-70

ЛИТЕРАТУРА

1. Логунов А. В., Шмотин Ю. Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). – М.: Наука и технологии. – 2013. – 256 с.
2. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. – 2016. – № 2 (14). – С. 16–21.
3. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Светлов И. Л. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 2 (47). – С.3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14
4. Трофименко Н. Н., Ефимочкин И. Ю., Большакова А. Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 2. – С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
5. Каблов Е. Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. – 2019. – № 7–8. – С. 54–58.
6. Каблов Е. Н., Бакрадзе М. М., Громов В. И., Вознесенская Н. М., Якушева Н. А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионно-стойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2020. – № 1. – С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
7. Ночовная Н. А., Базылева О. А., Каблов Д. Е., Панин П. В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля // Под общ. ред. акад. РАН, проф. Е. Н. Каблова. – М.: ВИАМ. – 2018. – 303 с.
8. Степанова Н. Н., Ринкевич А. Б., Митрохин Ю. С. Физические свойства Ni_3Al , легированного третьим элементом: эксперимент и моделирование. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2010. – 173 с.
9. Сидоров В. В., Мин П. Г., Каблов Д. Е., Вадеев В. Е., Горюнов А. В. Металлургические основы обеспечения высокого качества жаропрочных никелевых сплавов при плавке в вакууме // Тр. науч.-технич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД». – М.: ВИАМ. – 2017. – С.288–308.
10. Сидоров В. В., Горюнов А. В., Косенков О. М. Основные положения металлургии литейных жаропрочных сплавов // Литейное производство. – 2018. – № 6. – С. 6–11.
11. Фомин А. А. Технологические особенности точного литья деталей ГТД из интерметаллидных сплавов // Литейное производство. – 2009. – № 12. – С.23–24.
12. Базылева О. А., Туренко Е. Ю., Рассохина Л. И., Битюцкая О. Н. и др. Литые блоки соплового аппарата 2-й ступени ТВД из интерметаллидного сплава ВКНА-4-ВИ // Литейное производство. – 2014. – № 10. – С. 7–12
13. Поварова К. Б., Бондаренко Ю. А., Дроздов А. А., Базылева О. А. и др. Влияние направленной кристаллизации на структуру и свойства монокристаллов сплава на основе Ni_3Al , легированного Cr, Mo, W, Ti, Co, Re и PЗМ // Металлы. – 2015. – № 1. – С.50–58.
14. Висик Е. М., Рассохина Л. И., Ечин А. Б., Гамазина М. В. О некоторых аспектах повышения качества литых турбинных лопаток ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // Вопросы материаловедения. – 2021. – Т. 108. – № 4. – С. 82–98.

15. Базылева О. А., Бондаренко Ю. А., Морозова Г. И., Тимофеева О. Б. Структура, химический и фазовый составы интерметаллидного сплава ВКНА-1В после высокотемпературных термических обработок и технологических нагревов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2014. – № 5 (707). – С. 3–6.

16. Лашко Н. Ф., Заславская Л. В., Козлова М. Н., Морозова Г. И. и др. Физико-химический фазовый анализ сталей и сплавов. – М.: *Металлургия*. – 1978. – 336 с.

17. Морозова Г. И. Значение метода физико-химического фазового анализа в развитии авиационного металловедения и создании жаропрочных никелевых сплавов (к 125-летию со дня рождения Н.И. Блок) // *Труды ВИАМ*. – 2016. – № 1 (37). – С. 50–55. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 28.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-50-55.

18. Морозова Г. И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов // *Митом*. – 2012. – № 12. – С. 52–58.

19. Сплав на основе никеля: пат. SU №1607422. приоритет изобретения 11.04.1989 г., зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 10.01.1993г. [ФОВ 1].

20. Пат. 2304179 РФ № 2006115471. Сплав на основе интерметаллида Ni₃Al и изделие, выполненное из него; заяв. 05.05.2006; опубл. 10.08.2007 // *Бюл.* № 22.

УДК 621.791.3:669.295

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6С В ПРОЦЕССЕ ДИФфуЗИОННОЙ ПАЙКИ

А. И. ИГОЛКИН¹, канд. техн. наук, Н. В. ЛЕБЕДЕВА², канд. техн. наук, И. А. МАКСИМЕНКО³

¹ПК «ЦНТУ Прометей», 191144, Санкт-Петербург, пр. Бакунина, 29, литер А, пом. 2н

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

³АО «НПФ Невинтермаш», 197198, Санкт-Петербург, пр. Добролюбова, д. 11Е

Поступила в редакцию 27.02.2023

После доработки 1.03.2023

Принята к публикации 3.03.2023

Исследованы закономерности формирования структуры паяного шва и галтели при диффузионной пайке тавровых соединений титанового сплава ВТ6С аморфным припоем системы Ti–Cu–Ni–Zr в зависимости от длительности процесса при заданной температуре. Показано, что приемлемые механические свойства соединений достигаются при определенных параметрах пайки, обеспечивающих достаточно полное диффузионное удаление из металла шва компонентов припоя и минимальный размер галтели. Дано обоснование предпочтительности пластинчатой структуры основного металла для диффузионно-паяных соединений титанового сплава.

Ключевые слова: титановый сплав, диффузионная пайка, тавровые соединения, структура, механические свойства

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-71-79

ЛИТЕРАТУРА

1. Братухин А. Г., Иванов Ю. Л., Марьин Б. Н. и др. Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиационной промышленности. – М.: *Машиностроение*, 1997. – 600 с.

2. Радзиевский В. Н., Ткаченко Г. Г. Высокотемпературная вакуумная пайка в компрессоростроении. – Киев: *Экотехнология*, 2009. – 397 с.

3. Калинин Ю. Н., Севрюков О. Н., Федотов В. Т., Григорьев А. Е. Пайка тонколистовых конструкций из титановых сплавов аморфными припоями марки СТЕМЕТ // *Сварочное производство*. – 1996. – № 9. – С. 23–24.

4. Shang Lei, Wang Gang, Yang Dachun, Li Yao. Microstructure and performance analysis of vacuum brazing welded titanium joints in honeycomb sandwich panel structure // *Transaction of the Chinese Welding Institution*. – 2017. – N 38(3) – P. 125–128.

© 2023

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

5. Максимова С. В., Хорунов В. Ф., Воронов В. В. Влияние величины зазора и исходного состояния припоя на структурообразование паяных соединений титана и его сплавов // Автоматическая сварка. – 2013. – № 33. – С. 30–35.

6. Поморцев Е. Н., Чигарин В. И., Габдрахманова З. Р. Титановые сплавы в центробежных компрессорах // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. – № 8. – С. 38–41.

7. Ganjeh E., Sarkhosh H., Bajgholi M. E., Khorsand H., Ghaffari M. H. Increasing Ti–6Al–4V brazed joint strength equal to the base metal by Ti and Zr amorphous filler alloy // Materials characterization. – 2012. – N 71. – P. 31–40.

8. Chou-Dian Huang, Jiun-Ren Hwang, Jiun Yuan Huang. Optimization of vacuum brazing process parameters in Ti–6Al–4V alloy // Metals. – 2022. – N 12(6). – P. 974.

9. Shapiro A. E. Brazing of conventional titanium alloys // ASM Handbook. – 2017. – V. 6. – P. 36–43.

10. Борисова Е. А., Скляр Н. М. Пожаробезопасные титановые сплавы // Титан. – 1993. – № 3. – С. 21–24.

11. Корнилов И. И. Титан. Источники, составы, свойства, металлохимия и применение. – М.: Наука, 1975. – 310 с.

12. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.

УДК 621.793.7:621.762:669.295

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НАПЫЛЕНИЯ НА МИКРОПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ УГНП-7/2250

М. Е. ГОШКОДЕРЯ, Н. А. СЕРДЮК, канд. техн. наук, Т. И. БОБКОВА, канд. техн. наук,
А. А. КАШИРИНА, М. В. СТАРИЦЫН, Е. Д. НЕСТЕРОВА

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

Поступила в редакцию 17.02.2023

После доработки 6.04.2023

Принята к публикации 10.04.2023

С целью выявления наиболее производительного технологического режима напыления титановых покрытий микроплазменным методом произведена их оптимизация. В качестве переменных параметров использовали значения силы тока электрической дуги, расходы плазмообразующего и транспортирующего газов. Материалом для напыления был принят порошок титана марки ПТОМ-1 различного фракционного состава: 20–32, 32–40 и 40–71 мкм. В результате серии экспериментов были выявлены наиболее оптимальные режимы напыления покрытий, критерием являлась совокупность ряда факторов: толщина покрытия не менее 200 мкм, исключение спекания напыляемого порошка в каналах плазмотрона, низкая пористость покрытия (не более 5%), плотное прилегание покрытия к подложке и отсутствие деламинации покрытия при механической обработке. Для покрытий, которые имеют наименьшие значения пористости (от 1,0 до 1,9 %), при достижении всех перечисленных выше показателей были исследованы морфология и микротвердость.

Ключевые слова: микроплазменное напыление, исследование режимов напыления, порошок титана ПТОМ-1, титановое покрытие, исследование морфологии, пористости и твердости

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-80-86

ЛИТЕРАТУРА

1. Илларионов А. Г., Попов А. А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. – 137 с.

2. Современные технологии производства. Применение порошковой продукции из титана, режим доступа: <https://extxe.com/5921/primenenie-poroshkovo-j-produkcii-iz-titana/>, дата обращения 24.01.2023.

3. Арзамасов Б. Н., Брострем В. А., Буше Н. А. Конструкционные материалы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
4. Логинов П. К., Ретюнский О. Ю. Способы и технологические процессы восстановления изношенных деталей: учебное пособие // Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. – 217 с.
5. Мордвинкин И. П., Репин Ф. Ф., Глебов В. В. Анализ способов восстановления посадочных мест опор скольжения крупногабаритных валов энергетических установок // Вестник Волжского государственного университета водного транспорта. Судовая и промышленная энергетика. – 2009. – С. 72–83.
6. Корнев А. Б., Кулик Ю. Г., Фунтикова Е. В. К вопросу стратегии восстановления деталей газотермическим напылением // Вестник Волжского государственного университета водного транспорта. Судостроение и ремонт. – 2004. – С. 166–174.
7. Лобанов М. Л., Кардонина Н. И., Россина Н. Г., Юровских А. С., Защитные покрытия. Учебное пособие. – Изд-во Уральского ун-та, 2014. – 200 с.
8. Калита В. И., Комлев Д. И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой. – М.: Лидер М, 2008. – 388 с.
9. Псарев А. В., Смирнов В. В., Клубникин В. С. Микроплазменное напыление: общая схема, плазматрон, основы технологии // Материалы межвузовской научной конференции «XXX Юбилейная неделя науки СПбГТУ». – 2002. – Ч. VI. – С. 61–62.
10. Ляшенко Б. А., Подчерняева И. А., Коневцов Л. А., Козырь А. В., Коваленко С. В., Каминский А. В. Материалогия покрытий титановых сплавов методами физикохимии и электроискрового легирования. Ч. 1: Покрытия методами физикохимии. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та. – 2019. – 413 с.
11. Изотова А. Ю., Гришина О. И., Шавнев А. А. Композиционные материалы на основе титана, армированные волокнами (обзор) // Труды ВИАМ. – 2017. – № 5 (53). – С. 42–49.
12. Рудской А. И., Волков К. Н., Кондратьев С. Ю., Соколов Ю. А. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 610 с.
13. Гошкодеря М. Е., Бобкова Т. И., Старицын М. В. Исследование процесса синтеза и свойств полученных металломатричных композиционных порошков системы Ti / TiB₂ // Вопросы материаловедения. – 2021. – № 2 (106). – С. 66–73.

УДК 661.862' 023

ВЛИЯНИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИЯ НА ЦИНК В СОСТАВЕ СЛОИСТЫХ ДВОЙНЫХ ГИДРОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ НА ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Д. В. МАЙОРОВ, канд. техн. наук, Е. К. КОПКОВА, канд. техн. наук

ФГБУН «Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИХТРЭМС КНЦ РАН), 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Академгородок, д. 26а. E-mail: d.maiorov@ksc.ru

Поступила в редакцию 13.02.2023

После доработки 3.04.2023

Принята к публикации 4.04.2023

Твердофазным взаимодействием кристаллогидратов Mg, Zn и Al с (NH₄)₂CO₃ синтезированы и изучены методами химического, рентгенофазового, ВЕТ и ВЖН анализов образцы Mg–Zn–Al слоистых двойных гидроксидов. Представлены результаты исследований структурно-поверхностных свойств (удельные поверхность и объем пор, распределение пор по их диаметру). Установлено, что увеличение степени замещения Mg на Zn приводит к повышению как удельной поверхности, так и удельного объема образцов. При этом распределение мезопор имеет полимодальный характер с преобладанием пор, имеющих $d_{\text{пор}} = 3\text{--}4$ и $25\text{--}50$ нм. Установлено, что замещение Mg на Zn в составе слоистых двойных гидроксидов приводит не только к увеличению удельной емкости мономолекулярного слоя СДГ, но и к более сильному взаимодействию адсорбата (азота) с их поверхностью.

Ключевые слова: синтез, слоистые двойные гидроксиды, магний, цинк, замещение, физико-химические свойства, изотермы сорбции, удельная поверхность, удельный объем пор

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-87-97

ЛИТЕРАТУРА

1. Trifiro F., Vaccari A. Hydrotalcite-like anionic clays (layered double hydroxides). In comprehensive supramolecular chemistry / Pergamon: Oxford. – 1996. – V. 7. – P. 251–291.
2. Cavani F., Trifiro F., Vaccari A. Hydrotalcite-type anionic clays: preparation, properties and applications // *Catalysis Today*. – 1991. – V. 11, N 2. – P. 173–301.
3. Layered double hydroxides: present and future / Ed. by V. Rives. – New York: Nova Publishers, 2001. – 439 p.
4. Forano C., Hibino T., Leroux F., Taviot-Gueho C. Layered double hydroxides // *Handbook of Clay Science*. – 2006. – V. 1, N 13.1. – P. 1021–1095.
5. Синтез и изучение новых слоистых гидроксидов магния–кобальта–железа со структурой гидроталькита / И. Г. Рыльцова, О. В. Нестройная, О. Е. Лебедева и др. // *Журнал неорганической химии*. – 2014. – Т. 59, № 12. – С. 1652–1659.
6. Mg–Al слоистые двойные гидроксиды: получение, строение и каталитический потенциал в конденсации циклогексанона и с ацетонитрилом / В. В. Белов, В. И. Марков, С. Б. Сова и др. // *Журнал прикладной химии*. – 2014. – Т. 87, вып. 8. – С. 1028–1035.
7. Исследование структуры Mg–Al и Ni–Al оксидных носителей катализаторов переработки углеводородов, полученных из слоистых двойных гидроксидов / О. Б. Бельская, Л. Н. Леонтьева, Т. И. Гуляева и др. // *Кинетика и катализ*. – 2016. – Т. 57, № 4. – С. 544–565.
8. Степанова Л. Н., Бельская О. Б., Леонтьева Н. Н. Влияние соотношения Al/Mg в составе слоистых двойных гидроксидов на сорбцию хлоридных комплексов Pt (IV) // *Журнал Сибирского Федерального университета. Сер. Химия*. – 2012. – Т. 5, № 4. – С. 361–375.
9. Sumari S. M., Hamzah Z., Kantasamy N. Adsorption of Anionic Dyes from aqueous Solutions by Calcined and uncalcined Mg/Al Layered Double Hydroxide // *Malaysian Journal of Analytical Sciences*. – 2016. – V. 20, N 4. – P. 777–783.
10. Solin S. A., Hines D. R., Seidler G. T., Treacy M. M. J. Novel structural properties of Ni_{1-x}Al_x layer double hydroxides // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – June–August 1996. – V. 57, Is. 6–8. – P. 1043–1048. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(95\)00393-2](https://doi.org/10.1016/0022-3697(95)00393-2)
11. Leont'eva N. N., Cherepanova S. V., Drozdov V. A. Thermal decomposition of layered double hydroxides Mg–Al, Ni–Al, Mg–Ga: Structural features of hydroxide, dehydrated, and oxide phases // *Journal of Structural Chemistry*. – 2014. – V. 55. – P. 1326–1341. <https://doi.org/10.1134/S0022476614070142>
12. Goswamee R. L., Sengupta P., Bhattacharyya K. G., Dutta D. K. Adsorption of Cr(VI) in layered double hydroxides // *Appl. Clay Sci.* – 1998. – N 13. – P. 21–34.
13. Das N. N., Konar J., Mohanta M. K., Srivastava S. C. Adsorption of Cr(VI) and Se(IV) from their aqueous solutions onto Zr⁴⁺-substituted ZnAl/MgAl-layered double hydroxides: effect of Zr⁴⁺ substitution in the layer // *J. Colloid Interface Sci.* – 2004. – N 270. – P. 1–8.
14. Carriazo D., del Arco M., Martin C., Rives V. A comparative study between chloride and calcined carbonate hydrotalcites as adsorbents for Cr (VI) // *Appl. Clay Sci.* – 2007. – N 37. – P. 231–239.
15. Патент РФ 2678007. Способ получения слоистого гидроксида магния и алюминия / Матвеев В. А., Майоров Д. В. // *Бюл.* № 3. – 2019.
16. Матвеев В. А., Копкова Е. К., Майоров Д. В., Михайлова О. Б. Новый подход к синтезу Mg–Al слоистых гидроксидов // *Химическая технология*. – 2020. – № 2. – С. 57–63. DOI: 10.31044/1684-5811-2020-21-2-57-63.
17. Dudek B., Kuśtrowski P., Białas A., Natkański P., Piwowarska Z., Chmielarz L., Kozak M., Michalik M. Influence of textural and structural properties of Mg–Al and Mg–Zn–Al containing hydrotalcite derived oxides on Cr(VI) adsorption capacity // *Materials Chemistry and Physics*. – 2012. – N 132. – P. 929–936.

18. Загузин А. С., Романенко А. В., Бухтиярова М. В. Синтез оксидов алюминия с контролируемыми текстурными и прочностными характеристиками // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, вып. 8. – С. 1079–1090.
19. Patterson A. The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination // Phys. Rev. – 1939. – V. 56, N 10. – P. 978–982. DOI: 10.1103/PhysRev.56.978.
20. Копкова Е. К., Кондратенко Т. В., Майоров Д. В. Синтез и сорбционные свойства слоистых двойных гидроксидов магния и алюминия по отношению к цианидным комплексным ионам Fe (II, III) // Химическая технология. – 2020. – Т. 21, № 9. – С. 386–394.
21. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие. Изд. 10-е. – М.: Высшая школа. – 2004. – 479 с.
22. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Изд. 2-е / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 306 с.
23. Thommes M., Kaneko K., Neimark A. V., Olivier J. P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K. S. W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // Pure Appl. Chem. – 2015. – V. 87, N 9–10. – P. 1051–1069. DOI 10.1515/pac-2014-1117.
24. Яковлева Н. В. Исследование характеристик пористости объемно-пористых нанокатализаторов на основе оксида алюминия и интерметаллидов системы никель-алюминий // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 1 (73). – С. 95–101.

УДК 621.762.224:669.713

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАПЕЛЬ ПРИ ГРАНУЛИРОВАНИИ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕМ РАСПЛАВА

М. В. ЖАРОВ, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. E-mail: MaximZharov@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2023

После доработки 5.04.2023

Принята к публикации 12.04.2023

Разработана математическая модель процесса кристаллизации гранул алюминиевых сплавов в условиях охлаждения в водной и водно-паровой среде. Практическая значимость математической модели заключается в прогнозировании средней величины дендритного параметра получаемых гранул в зависимости от метода гранулирования, особенностей процесса гранулирования и размера получаемых гранул. Средняя величина дендритного параметра позволяет прогнозировать дисперсность структуры гранул и, следовательно, механические свойства гранулированного материала. Математическая модель позволяет определять скорость движения капли расплава в водной среде и учитывает наличие эффекта паровой рубашки, т. е. паровой прослойки, возникающей между кристаллизующейся каплей и водной средой, которая значительно снижает интенсивность отвода тепла и скорость кристаллизации.

Применение математической модели было опробовано на примере получения гранул высоколегированных алюминиевых сплавов (сплавы Д1 и Д16 системы Al–Cu–Mg, сплавы В95 и В96Ц системы Al–Zn–Mg–Cu), получаемых методом центробежного разбрызгивания расплава из перфорированного вращающегося тигля и капельным методом при охлаждении в водной среде. Скорость охлаждения и скорость кристаллизации гранул определяли экспериментальным путем методом измерения дендритного параметра структуры материала. Математическая модель показала высокую степень сходимости результатов моделирования и реальных экспериментов гранулирования алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: гранулирование, капля расплава, скорость движения капли, скорость охлаждения, скорость кристаллизации, размеры гранулы, сферичность гранулы, математическая модель, входные и выходные параметры модели, особенности кристаллизации, водная среда, интенсивность теплоотвода, жидкая фаза, дендритный параметр, дифференциальные уравнения неразрывности, уравнения сохранения импульса, закон сохранения энергии

© 2023

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

ЛИТЕРАТУРА

1. Капуткин Е. Я., Бер Л. Б., Казберович А. М., Мухина Т. А. Морфология и размеры гранул жаропрочных никелевых сплавов, получаемых распылением расплава и методом PREP // Технология легких сплавов. – 2021. – № 4. – С. 79–93. DOI: 10.24412/0321-4664-2021-4-79-93.
2. Волков А. М., Шестакова А. А., Бакрадзе М. М. Сравнение гранул, полученных методами газовой атомизации и центробежного распыления литых заготовок, с точки зрения применения их для изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // Труды ВИАМ. – 2018. – № 11. – С. 12–19. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.
3. Zeoli N., Gu S., Kamnis S. Numerical modelling of metal droplet cooling and solidification // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – N 51 (15–16). – P. 4121–4131. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.044.
4. Mullis A., Farrell L., Cochrane R., Adkins N. J. E. Estimation of cooling rates during close-coupled gas atomization using secondary dendrite arm spacing measurement // Metallurgical and materials transactions. – 2013. – V. 44 (4). DOI: 10.1007/s11663-013-9856-2.
5. Добаткин В. И., Елагин В. И. Гранулируемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1981. – 176 с.
6. Телешов В. В. Фундаментальная закономерность изменения структуры при кристаллизации алюминиевых сплавов с разной скоростью охлаждения // Технология легких сплавов. – 2015. – № 2. – С. 13–18.
7. Жаров М. В. Анализ технологических процессов производства сферических порошков и гранул моноалюминиды никеля NiAl для нужд отечественного двигателестроения // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 3 (111). – С. 29–40. doi: 10.22349/1994-6716-2022-111-3-29-40.
8. Скуратов А. П., Пьяных А. А. Теплообмен при гранулировании свинцовосодержащих алюминиевых сплавов в водной среде // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19, № 2. – С. 155–162.
9. Wang Peng, Li Jing, Wang Xin, Du Bo-rui. Impact mechanism of gas temperature in metal powder production via gas atomization // Chinese Physics B. – 2020. – N 30 (5). DOI: 10.1088/1674-1056/abd75e.
10. Bergmann D., Fritsching U., Bauckhage K. A mathematical model for cooling and rapid solidification of molten metal droplets // International Journal of Thermal Sciences. – 2000. – N 39 (1). – P. 53–62. DOI:10.1016/S1290-0729(00)00195-1
11. Bojarevics V., Roy A., Pericleous K. Numerical model of electrode induction melting for gas atomization // The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2011. – V. 30 (5). – P. 1455–1466.
12. Novel cooling rate correlations in molten metal gas atomization / N. Ciftci, N. Ellendt, G. Coulthard, et al. // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2019. – N 50. – P. 655–677. DOI.org/10.1007/s11663-019-01508-0.
13. Игнатов М. Н., Кулинский А. И., Щепин Л. А. Особенности динамики падения, охлаждения и кристаллизации сферической капли металла в газовой среде // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика и технология материалов и конструкций. – 2002. – № 5. – С. 65–70.
14. Кузьмин Р. Б., Михатулин Д. С., Полежаев Ю. В., Ревизников Д. Л., Русаков В. В. Исследование затвердевания капель расплава в высокоскоростном потоке холодного газа // Теплофизика высоких температур. – 1997. – Т. 35, вып. 3. – С. 504–507.
15. Liu W., Wang G. X., Matthys E. F. Thermal analysis and measurements for a molten metal drop impacting on a substrate: cooling, solidification and heat transfer coefficient // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1995. – V. 38, Is. 8. – P. 1387–1395. DOI:10.1016/0017-9310(94)00262-T.
16. Yi Hao, Qi Lehua, Luo Jun, Zhang Daicong, Li Hejun, Hou Xianghui. Effect of the surface morphology of solidified droplet on remelting between neighboring aluminum droplets // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2018. – V. 130–131. – P. 1–11. DOI:10.1016/j.ijmactools.2018.03.006.

17. Попов В. Н., Черепанов А. Н. Численное моделирование кристаллизации модифицированной металлической капли при растекании на подложке // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2019. – № 6 (87). – С. 18–39. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-6-18-39.
18. Zharov M. V. Investigation of the features of crystallization of granules of high-strength aluminum alloys of the Al–Zn–Mg–Cu system at ultra-high cooling rates // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2021. – N 4. – P. 71–82. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.08.
19. Wang G.-X., Matthys E. F. Numerical modelling of phase change and heat transfer during rapid solidification processes: use of control volume integrals with element subdivision // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1992. – V. 35, Is. 1. – P. 141–153.
20. Zharov M. V. Production of ultrafine granules from high-strength aluminum alloys // Russian Engineering Research. – 2022. – V. 42, No. 11. – P. 1143–1148. DOI: 10.3103/S1068798X22110272.
21. Скуратов А. П., Пьяных А. А. Расчетное исследование скорости охлаждения капли алюминиевого расплава в водной среде // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 233–235.
22. Launder B. E., Spalding D. B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. – London, England: Academic Press. – 1972. – P. 157–162.
23. ГОСТ 4784–2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Издание официальное. – М.: ФГУП «СтандартИнформ», 2019. – 35 с.
24. ОСТ 1.90048-90. Сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Дата введения 1.02.1991. Утвержден и введен в действие распоряжением Министерства авиационной промышленности (МАП) от 26.11.1990 № 080/4. – 6 с.
25. Анкудинов В. Б., Марухин Ю. А. Способ получения сферических гранул. Патент на изобретение № 2032498. – 10 апреля 1995 г. – 3 с.
26. Жаров М. В. Процессы получения гранулированных материалов из алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu по технологии сверхбыстрой кристаллизации гранул // Металлург. – 2022. – № 3. – С. 39–49. DOI: 10.52351/00260827_2022_03_39.
27. Xia Y., Khezzer L., Alshehhi M., Hardalupas Y. Droplet size and velocity characteristics of water-air impinging jet atomizer // International Journal of Multiphase Flow. – 2017. – V. 94. – P. 31–43.
28. Жаров М. В. Разработка технологии производства гранулированных материалов с ультрадисперсной структурой из высокопрочных алюминиевых сплавов // Вестник машиностроения. – 2022. – № 8. – С. 49–55. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-8-49-55

УДК 549.324.62:622.345

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПРОДУКТА ОБОГАЩЕНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ СОСТАВОВ СОЛЕЙ КАЛИЯ И НАТРИЯ ДЛЯ РАЗЛОЖЕНИЯ АРСЕНОПИРИТА

Е. М. ДОРОШЕНКО¹, Е. Д. КИМ¹, канд. техн. наук, А. В. РАССКАЗОВА², канд. техн. наук, Э. Х. РИ¹, д-р техн. наук

¹ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», 680000, Хабаровск, Тихоокеанская ул., 136. E-mail: 2015101237@pnu.edu.ru

²ФГБУН «Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук. Институт горного дела», 680000, Хабаровск, ул. Тургенева, 51

Поступила в редакцию 1.02.2023

После доработки 7.04.2023

Принята к публикации 12.04.2023

Приведены результаты исследования промежуточного продукта обогащения, полезными компонентами в котором являются олово и сопутствующие металлы. Был определен минералогический состав, полученный методом микрорентгеноспектрального анализа, а также проведено термодинамическое моделирование с использованием программного комплекса Thermo-Calc. Целью работы

является комплексное исследование взаимодействия арсенопирита и касситерита с солями щелочноземельных металлов и поиск оптимального состава и соотношения солей для разложения арсенопирита на отдельные легкоудаляемые компоненты. С помощью данных результатов представляются актуальными дальнейшие исследования по разработке комплексной методики по селективному разделению арсенопирита и касситерита и извлечению олова и сопутствующих металлов из промежуточного продукта обогащения.

Ключевые слова: арсенопирит, касситерит, руда, мышьяк, сера, олово, компьютерное моделирование, минералогический состав, микрорентгеноспектральный анализ, рентгенофазовый анализ, пирит

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-113-124

ЛИТЕРАТУРА

1. Sabet H., et al. Tin-Tungsten mineralization in the Central Eastern Desert of Egypt // Ann. Geol. Surv. Egypt. – 1973. – № 3. – P. 75–86.
2. Habashi F. Handbook of Extractive Metallurgy-2. – Weinheim, Chichester, New York, Toronto, Brisbane, Singapoure: WILEY-VCH, 1997. – 2379 p.
3. Пат. РФ № 2333268, МПК С22В 25/02, МПК С22В 5/10. Способ получения олова из касситеритового концентрата / Гостищев В. В., Дорофеев С. В., Комков В. Г., Ри Х., Ри Э. Х.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (RU). – № 2006138534/02; заявл. 31.10.2006; опубл. 10.09.2008 // Бюл. № 25. – 4 с.
4. Рогожников Д. А. Азотнокислотная переработка полиметаллического упорного сульфидного сырья цветных металлов // Дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.16.02 / ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина». – Екатеринбург, 2020. – 311 с.
5. Гуляшинов П. А., Палеев П. Л., Субанакоев А. К., Гуляшинов А. Н. Исследование процесса термического разложения золотосодержащих концентратов с повышенным содержанием мышьяка // Цветные металлы. – 2018. – № 12. – С. 44–48.
6. Игнатов Д. О., Каюмов А. А., Игнаткина В. А. Селективное разделение мышьяк-содержащих сульфидных минералов // Цветные металлы. – 2018. – № 7. – С. 32–38.
7. Комогорцев Б. В., Вареничев А. А. Применение селективных реагентов-собирателей в технологиях флотационного обогащения золотосодержащих сульфидных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 12. – С. 231–242.
8. Молдурушку М. О. Разработка технологии извлечения мышьяка из отходов аммиачно-автоклавного передела кобальтсодержащих руд // Дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.17.01 / Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов (ТувИКОПР). – Кызыл, 2018. – 150 с.
9. Матвеева Т. Н., Ланцова Л. Б., Гладышева О. И. Влияние рудоподготовки на флотацию минералов меди и мышьяка при переработке сульфидных руд // Горная промышленность. – 2021. – № 6. – С. 48.
10. Wright P. A. Extractive Metallurgy of Tin. – London: Elsevier pub. Co., 1982. – 329 p.
11. Лебедев И. С., Дьяков В. Е., Теренин А. Н. Комплексная металлургия олова. – Новосибирск: Новосибирский писатель, 2004. – 548 с.
12. Smith R. An analysis of the process For Smelting Tin // Mining History: The Bulletin of the Peak District Mines Historical Society. – 1996. – № 2. – P. 91–99.
13. Omar A. A. Pyrometallurgical Treatment of Egyptian Cassiterite Concentrate // Bulletin Tims. – 1996. – Vol. 67– P. 26–36.
14. Morsi M., Abdalla F. A. H, El-Barawy K. A., El-Tawil S. Z. Tin recovery from local Cassiterite concentrate // Modelling, measurement and control. – 1993. – № 2. – С. 1328.
15. Van Deventer J. S. J. The Effect of Admixtures on the Reduction of Cassiterite by Graphite // Thermochemica Acta. – 1988. – N 124. – P. 109–118.
16. Гостищев В. В., Бойко В. Ф., Климова Л. А., Метлицкая Л. П. Физико-химические аспекты получения порошка вольфрама восстановлением его соединений алюминием в ионных расплавах // Теоретические основы химической технологии. – 2006. – Т. 40, № 5. – С. 584–587.

17. Pyrometallurgical Extraction of Tin Metal from the Egyptian Cassiterite Concentrate / El Deeb A. B., Morsi I M., et al. // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2015. – V. 6, Is. 3. – P. 54–64.

18. Гурман М. А. Использование термохимических методов при переработке золотосодержащих пирит-арсенопиритовых концентратов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 4. – С. 180–186.

19. Корчанова А. П., Галимов Н. А. Совершенствование флотационного обогащения окисленных кварц-арсенопирит-пиритных золотосодержащих руд албазинского месторождения // Вестник ЧитГУ. – 2013 – № 6. – С. 23–29.

20. Пат. РФ № 2393252, МПК С22В 25/02, МПК С22В 5/06. Способ получения олова из касситеритового концентрата / Гостищев В. В., Комков В. Г., Химухин С. Н., Ри Х., Ри Э. Х.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (RU). – №2009125270/02; заявл. 01.07.2009; опубл. 27.06.2010 // Бюл. № 18. – 4 с.

21. Пат. РФ № 2528297, МПК С22В 25/02, МПК С22В 5/10. Способ получения олова из касситеритового концентрата / Ри Х., Гостищев В. В., Ри Э. Х., Комков В. Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (RU). – №2013120565/02; заявл. 06.05.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 25. – 4 с.

22. Дорошенко Е. М., Ниеззода Т. Д., Новиков А. А., Ри Х. С. Термодинамическое моделирование взаимодействия арсенопирита и касситерита с солями калия и натрия // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование (Материалы XX региональной научной конференции). – Хабаровск, 2022. – С. 103–106.

УДК 678.067:621.785

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ATL С ЛАЗЕРНЫМ НАГРЕВОМ

Д. Д. ДВОРЯНЦЕВ, А. С. САРГСЯН, канд. техн. наук, А. В. АНИСИМОВ, д-р техн. наук,
И. В. ЛИШЕВИЧ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 27.01.2023

После доработки 9.03.2023

Принята к публикации 10.03.2023

Рассмотрен метод изготовления высокопрочного конструкционного углепластика из таупрега на основе полифениленсульфида марки PPS-214 (Fortron, Германия) и высокопрочного углеродного волокна AS4 (Hexcel, США) с помощью перспективной технологии переработки таупрегов ATL (Automated Tape Laying) с лазерным нагревом. Проведена адаптация технологии под изучаемый материал, изготовлены лабораторные макеты в виде плит, проведены физико-механические испытания лабораторных образцов. Качество распределения связующего и наличие дефектов оценено с помощью растровой электронной микроскопии. Исследовано влияние схем армирования, прессования и вакуумной термической обработки на повышение механических свойств исследуемого углепластика. Установлено, что образцы, прошедшие вакуумную термообработку, обладают более высоким уровнем механических свойств благодаря увеличению адгезии лент таупрега друг к другу и удалению образующихся при выкладке несплошностей. Значение предела прочности при межслойном сдвиге образцов, изготовленных с применением параллельно-диагональной схемы, увеличивается на 108% при изгибе – на 370% и на 65% при сжатии.

Путем переработки таупрегов методом ATL с лазерным нагревом и последующей термической обработки изделий можно получать высокопрочные конструкционные материалы с повышенными физико-механическими свойствами, а также высокой повторяемостью и равномерным распределением свойств по всей площади изделий даже с применением сложных схем армирования.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, конструкционный углепластик, метод ATL, полифениленсульфид, термопластичная матрица, мультиаксиальная схема армирования, триаксиальная схема армирования, лазерный нагрев

© 2023

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

ЛИТЕРАТУРА

1. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение – М.: Логос, 2006. – 400 с.
2. Бахарева В. Е. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы. Справочник / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2014. – С. 79–133.
3. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. – СПб.: Профессия, 2006. – С. 326–329.
4. Ho K. K. C., Shamsuddin S.-R., Riaz S., Lamorinere S. Wet impregnation as route to unidirectional carbon fibre reinforced thermoplastic composites manufacturing // *Plastics, Rubber and Composites*. – 2011. – N 2, V. 40. – P. 102–103.
5. Jens K., Guglielmo H. Manufacture of high performance fibre-reinforced thermoplastics by aqueous powder impregnation // *Composites Manufacturing*. – 1993. – N 3. – P. 123–132.
6. Yan Y. Developments in fibers for technical nonwovens // *Advances in Technical Nonwovens*. – 2016. – P. 19–96. URL: <http://www.sciencedirect.com/article/pii/B9780081005750000024> (дата обращения 22.02.2022).
7. Саламов А. Х. Полифениленполисульфид: свойства, получение и применение // *Кронос: естественные и технические науки*. – 2019. – № 6(28). – С. 43–44.
8. Di Francesco M., Giddings P. F., Scott M., Goodman E., Dell'Anno G., Potter K. Influence of laser power density on the mesostructure of thermoplastic composite preforms manufactured by Automated Fibre Placement // *International SAMPE Technical Conference, 2016* – P. 1–13.
9. Перепелкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – С. 92.

УДК 539.422.24

МЕТОД РАСЧЕТА УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, А. Г. ГУЛЕНКО, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 09.02.2023

После доработки 27.03.2023

Принята к публикации 03.04.2023

Предложен метод расчета усталостного повреждения при циклическом нагружении, в котором нагружение в полциклах не является простым, т. е. компоненты напряжений в полцикле не изменяются пропорционально одному параметру. Кроме того, предложенный метод учитывает ситуацию, когда скорость деформирования в полцикле влияет на степень повреждения материала (например, в случае деформирования материала в условиях реализации ползучести или воздействия коррозионной среды) и может изменяться в различных полциклах нагружения.

Ключевые слова: усталостное повреждение, циклическая прочность, скорость деформирования, ползучесть, коррозионная среда

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-136-146

ЛИТЕРАТУРА

1. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
2. Manson S. S. The challenge to unity treatment of high temperature fatigue. A partisan proposal based on strain range partitioning // *Fatigue at elevated temperature. ASTM STP 520*. – 1973. – P. 744–782.

3. . Matsuishi M, Endo T. Fatigue of metals subjected to varying stress // Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan, 1968.
4. ГОСТ 25.101–83 Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.
5. Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 344с.
6. Филатов В. М. Предельные состояния по образованию макротрещин при циклическом нагружении // Вопросы атомной науки и техники. – № 1 (21), ч. 2. – М., 1978. – С. 114–123.
7. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
8. ГОСТ Р 59115.9–2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на прочность.
9. ГОСТ Р 59115.10–2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Уточненный поверочный расчет на стадии проектирования.
10. ГОСТ Р 70424–2022 Внутрореакторные устройства реактора с жидкометаллическим натриевым теплоносителем. Расчет на прочность на стадии проектирования.
11. ГОСТ Р 59429–2022 Устройства внутрикорпусные водо-водяного энергетического реактора. Расчет на прочность на стадии проектирования.
12. Марголин Б. З., Бучатский А. А., Гуленко А. Г., Федорова В. А., Филатов В. М. Прогнозирование сопротивления циклическому нагружению аустенитных сталей при упругопластическом деформировании, ползучести и нейтронном облучении // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 3 (55). – С. 72–88.

УДК 669.58' 71:620.193

АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ОКИСЛЕНИЕ СПЛАВА Zn22Al, ЛЕГИРОВАННОГО СКАНДИЕМ

М. М. МИРМУХАМЕДОВ, У. Р. ДЖОБИРОВ, И. Н. ГАНИЕВ, д-р хим. наук,
З. Р. ОБИДОВ, д-р хим. наук

*Институт химии им. В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана,
734063, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2. E-mail: obidovzr@gmail.com*

Поступила в редакцию 08.12.2022

После доработки 14.03.2023

Принята к публикации 15.03.2023

Приведены результаты потенциодинамического и термогравиметрического исследования анодного поведения и окисления сплава Zn22Al, легированного скандием, в различных средах. Установлены анодные, кинетические и энергетические характеристики сплавов в изотермических условиях. Легирование сплава Zn22Al скандием в количестве от 0,1 до 1,0 мас. % способствует повышению его анодной устойчивости к окислению. Скорость окисления и коррозии легированных (0,01–0,1%) скандием сплавов в 1,5–3 раза меньше, чем сплава Zn22Al. Продукты окисления сплавов состоят из смеси защитных пленок ZnO, Sc₂O₃, ZnAl₂O₄ и Al₂O₃·Sc₂O₃.

Ключевые слова: сплав Zn22Al, скандий, кинетика окисления, энергия активации, скорость коррозии, анодное поведение

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-147-154

ЛИТЕРАТУРА

1. Кечин В. А., Люблинский Е. Я. Цинковые сплавы. – М.: Металлургия, 1986. – 247с.
2. Виткин А. И., Тейндл И. И. Металлические покрытия листовой и полосовой стали. – М.: Металлургия, 1971. – 493 с.
3. Lin K. L., Yang C. F., Lee J. T. Correlation of microstructure with corrosion and electrochemical behaviours of the batch-type hot-dip Al–Zn coatings: Part 1. Zn and 5% Al–Zn coatings // Corrosion. – 1991. – V. 47, N 4. – P. 9–13.

© 2023

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

4. Lin K. L., Yang C. F., Lee J. T. Correlation of microstructure with corrosion and electrochemical behaviours of the batch-type hot-dip Al–Zn coatings: Part 2. 55% Al–Zn coatings // *Corrosion*. – 1991. – V. 47, N 4. – P. 17–30.

5. Mazilkin A. A., Straumal B. B., Borodachenkova M. V., Valiev R. Z., Kogtenkova O. A., Baretzky B. Gradual softening of Al–Zn alloys during high-pressure torsion // *Materials Letters*. – 2012. – V. 84. – P. 63–65.

6. Amini R. N., Irani M., Ganiev I. N., Obidov Z. R. Galfan I and Galfan II Doped with Calcium, Corrosion Resistant Alloys // *Oriental Journal of Chemistry*. – 2014. – V. 30, N 3. – P. 969–973.

7. Obidov Z. R. Effect of pH on the Anodic Behavior of Beryllium and Magnesium Doped Alloy Zn55Al // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2015. – V. 88, N 9. – P. 1451–1457.

8. Uesugi T., Takigawa Y., Kawasaki M., Higashi K. Achieving room-temperature superplasticity in an ultrafin-grained Zn–22% Al alloy // *Letters on materials*. – 2015. – N 5 (3). – P. 269–275.

9. Obidov Z. R. Anodic Behavior and Oxidation of Strontium-Doped Zn5Al and Zn55Al Alloys // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2012. – V. 48, N 3. – P. 352–355.

10. Maniram S. G., Singh G. M., Dehiya S., Sharma N. C. Effect of fly ash articles on the mechanical properties of Zn–22% Al alloy via stir casting method // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. – 2013. – V. 10, N 2. – P. 39–42.

11. Obidov Z. R. Thermophysical Properties and Thermodynamic Functions of the Beryllium, Magnesium and Praseodymium Alloyed Zn–55Al Alloy // *High Temperature*. – 2017. – V. 55, N 1. – P. 150–153.

12. Колотыркин Я. М. *Металл и коррозия*. – М.: *Металлургия*, 1985. – 88 с.

УДК 621.039.534:669.15–194.55

О ВЫБОРЕ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

А. С. КУДРЯВЦЕВ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 8.02.2023

После доработки 31.03.2023

Принята к публикации 3.04.2023

Рассмотрены стали и сплавы различного структурного класса с позиции обеспечения требуемого уровня служебных характеристик, необходимых для безопасной эксплуатации и изготовления парогенератора реакторной установки с натриевым теплоносителем. На основании проведенного анализа установлено, что оптимальным конструкционным материалом для парогенератора реакторной установки большой мощности с натриевым теплоносителем является нержавеющая сталь мартенситного класса с содержанием хрома 12 мас. %.

Ключевые слова: реакторная установка с натриевым теплоносителем, парогенератор, выбор конструкционного материала, служебные характеристики, нержавеющая сталь мартенситного класса

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-155-165

ЛИТЕРАТУРА

1. Блохина А. Н., Лякишев С. Л., Соломатина В. А. Перспективный корпусной парогенератор для энергоблока на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС*. – 2012. – № 31. – С. 5–14.

2. Карзов Г. П., Кудрявцев А. С., Марков В. Г., Гришмановская Р. Н., Трапезников Ю. М., Ананьева М. А. Разработка конструкционных материалов для атомных энергетических установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 2 (82). – С. 23–33.

3. Yvon P., Carré F. Structural materials challenges for advanced reactor systems // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – V. 385. – P. 217–222.

© 2023

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

Научно-технический журнал
«Вопросы материаловедения»

4. Raj B., Rao K. B. S. Building on knowledge base of sodium cooled fast spectrum reactors to develop materials technology for fusion reactors // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – V. 386–388. – P. 935–943.
5. Кудрявцев А. С. Исследование взаимодействия сталей с жидкометаллическими теплоносителями в условиях эксплуатации теплообменного оборудования реакторов на быстрых нейтронах // Дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. – СПб., 2007. – 119 с.
6. Natarajan S. B., Pujar M. G., Das C. R., Philip J., Kal T., Paneerselvi S., Moitra A., Chandramouli S., Karki V., Kannan S. Microstructure, corrosion and mechanical properties characterization of AISI type 316L(N) stainless steel and modified 9Cr–1Mo steel after 40,000 h of dynamic sodium exposure at 525°C // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – V. 516. – P. 84–99.
7. Денисов В. В., Карсонов В. И., Трунов Н. Б. Конструкция, эксплуатация и продление ресурса парогенераторов энергоблока БН-600 // *Атомная энергия*. – 2005. – № 6. – С. 481–488.
8. Горынин И. В., Карзов Г. П., Марков В. Г., Трапезников Ю. М., Гришмановская Р. Н., Ананьева М. А., Бережко Б. И., Терещенко А. Г. Материалы и технологии, обеспечивающие работоспособность оборудования АЭУ с жидкометаллическими теплоносителями // *Вопросы материаловедения*. – 1999. – № 3 (20). – С. 85–105.
9. Выбор конструкционного материала для парогенератора по критериям обеспечения коррозионной стойкости в различных условиях эксплуатации натриевого реактора большой мощности / Д. А. Артемьева, Г. П. Карзов, А. С. Кудрявцев и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС*. – 2014. – № 34. – С. 53–59.
10. ГОСТ 5632–2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные марки. – М.: Стандартинформ, 2015. – 49 с.
11. Schweitzer P. A. *Encyclopedia of Corrosion Technology*. – New York: Marcel Dekker, 2004. – 671 p.
12. Богоявленский В. Л. Коррозия сталей на АЭС с водным теплоносителем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.
13. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюрев В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. – М.: Атомиздат, 1970. – 421 с.
14. Структура и коррозия металлов и сплавов / И. Я. Сокол, Ульянов Е. А., Фельдгандлер Э. Г. и др. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.
15. Улиг Г. Г., Ревы Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Под ред. Сухотина А. М. – Л.: Химия, 1989. – 456 с.
16. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
17. McGuire M. *Stainless steels for design engineers*. – ASM International, 2008. – 304 p.
18. Kain V. *Stress Corrosion Cracking. Theory and Practice* / V.S. Raja, T. Shoji (Ed.) // *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. – 2011. – P. 199–244.
19. Yvon P., Carré F. Structural materials challenges for advanced reactor systems // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – V. 385. – P. 217–222.
20. Klueh R. L., Harries D. R. High-Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications // West Conshohocken, PA, ASTM International. – 2001. – 228 p.
21. Hald J. Microstructure and long-term creep properties of 9–12% Cr steels // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2008. – Is. 1–2, V. 85. – P. 30–37.
22. Gibbons T. B. Recent Advances in Steels for Coal Fired Power Plant: A Review // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2013. – V. 66. – P. 631–640.
23. Fujio A. Research and Development of Heat-Resistant Materials for Advanced USC Power Plants with Steam Temperatures of 700 °C and Above // *Engineering*. – 2015. – Is. 2, V. 1. – P. 211–224.
24. Kimura K., Sawada K., Kushima H., Toda Y. Influence of Chemical Composition and Heat Treatment on Long-term Creep Strength of Grade 91 Steel // *Procedia Engineering 6th International Conference on Creep, Fatigue and Creep-Fatigue Interaction*. – 2013. – V. 55. – P. 2–9.

25. Chakraborty, G. K. J., Vasantharaja P., Das C. R., Albert S. K., Laha K. Effect of Delta Ferrite on Microstructure and Mechanical Properties of High-Chromium Martensitic Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2019. – V. 28. – P. 876–885.
26. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
27. Pettersson N., Wessman S., Thuvander M., Hedström P., Odqvist J., Pettersson R. F. A., Hertzman S. Nanostructure evolution and mechanical property changes during aging of a super duplex stainless steel at 300°C // *Materials Science and Engineering A*. – 2015. – V. 647. – P. 241–248.
28. Tucker J. D, Miller M. K., Young G. A. Assessment of thermal embrittlement in duplex stainless steels 2003 and 2205 for nuclear power applications // *Acta Materialia*. – 2015. – V. 87. – P. 15–24.
29. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд. / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др. / Под общей ред. Зубченко А. С. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
30. Гудремон Э. А. Специальные стали. Изд. 2-е. – М.: Metallurgiya. – 1966. – 1274 с.
31. Rohit Sai Krishna A., Vamshi Krishna B., Sashank T., Harshith D., Subbiah R. Influence and assessment of mechanical properties on treated P91 steel with normalizing processes // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – V. 27, Part 2. – Pp. 1555–1558.
32. Ланская К. А. Высокохромистые жаропрочные стали. – М.: Metallurgiya, 1976. – 216 с.
33. Кудрявцев А. С., Артемьева Д. А., Рейнер П. Я. Влияние фазового состава на деформационную способность стали марки 07X12НМФБ при высоких температурах // *Вопросы материаловедения*. – 2014. – № 3 (79). – С. 34–40.
34. Нестеренко Е. К., Кудрявцев А. С., Аскинази А. Ю., Громова Н. Б., Дроздова Н. Ф. О температуре полиморфного фазового превращения аустенита в δ-феррит 12 %-ной хромистой стали // *Письма о материалах*. – 2020. – Т. 10, № 3. – С. 237–242.
35. Cabet C., Dalle F., Gaganidze E., Henry J., Tanigawa H. Ferritic-martensitic steels for fission and fusion application // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – V. 523. – P. 510–537.
36. Титова Т. И., Ратушев Д. В., Шкляев С. Э., Черняховский С. А., Батов Ю. М., Афанасьев С. Ю., Уткин А. А., Баландин С. Ю. Разработка технологии изготовления высококачественных заготовок для роторов из высокохромистых сталей // *Электрометаллургия*. – 2012. – № 5. – С. 2–7.
37. Скоробогатых В. Н, Щенкова И. А. Разработка и освоение материалов для тепловых блоков на суперсверхкритические параметры // *Энергонадзор и энергобезопасность*. – 2008. – № 1. – С. 46–49.
38. Козлов Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей. – Л.: Машиностроение, 1986. – 160 с.
39. David S. A., Siefert J. A., Feng Z. Welding and weldability of candidate ferritic alloys for future advanced ultrasupercritical fossil power plants // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2013. – V. 18, Is. 8. – P. 631–651.
40. Липпольд Д., Котеки Д. Metallurgiya сварки и свариваемость нержавеющей сталей / Под ред. Н. А. Соснина, А. М. Левченко. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2011. – 467 с.
41. Кудрявцев А. С., Охупкин К. А., Михайлов М. С., Скутин В. С., Зубова Г. Е., Федотов Б. В. Анализ причин ускоренного разрушения при ползучести сварных соединений жаропрочной коррозионно-стойкой 12%-ной хромистой стали // *Физика металлов и материаловедение*. – 2016. – Т. 117, № 6. – С. 623–631.
42. Liu C., Shen T., Yao C., Chang H., Wei K., Niu L., Ma Z., Wang Z. Corrosion behavior of ferritic-martensitic steels SIMP and T91 in fast-flowing steam // *Corrosion Science*. – 2021. – V. 187.
43. Fry A., Osgerby S., Wright M. Oxidation of Alloys in Steam Environments: A Review. – NPL Report MATC (A) 90, 2002. – 39 p.
44. Wright I. G., Dooley R. B. A review of the oxidation behaviour of structural alloys in steam // *International Materials Reviews*. – 2010. – V. 55, N 3. – P. 129–167.

ДОЗОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР И ИХ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Б. З. МАРГОЛИН, д-р техн. наук, Е. В. ЮРЧЕНКО, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 1.03.2023

После доработки 17.03.2023

Принята к публикации 21.03.2023

Представлены основные уравнения для расчета сопротивления хрупкому разрушению материалов КР ВВЭР. Рассмотрены основные механизмы радиационного и теплового охрупчивания материалов, применяемых для корпуса реактора (КР) ВВЭР (стали марок 15Х2МФА, 15Х2НМФА и их металл шва) и для опорных конструкций (ОК) (стали марок СтЗ-сп, 09Г2С и их металл шва). Приведены основные положения для построения дозовых зависимостей и представлены различные виды дозовых зависимостей, позволяющие учитывать основные металлургические и эксплуатационные факторы, такие как содержание легирующих и примесных элементов, флюенс нейтронов, время эксплуатации и температура облучения. Представлен анализ влияния флакса нейтронов при различных доминирующих механизмах охрупчивания материалов корпусов реакторов. Рассмотрено влияние температуры облучения на вклад различных механизмов радиационного охрупчивания, характерных для материалов ОК и КР ВВЭР.

Ключевые слова: металл сварных швов, современные сварочные материалы, сопротивление хрупкому разрушению, механические свойства, анизотропия свойств, масштабный фактор, корреляционная зависимость

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-166-194

ЛИТЕРАТУРА

1. ASTM E 1921-02 2002. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range // Annual Book of ASTM Standards. – 2002. – V. 03.01.
2. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Nikolaev V. A., Ryadkov L. N. A new engineering method for prediction of the fracture toughness temperature dependence for RPV steels // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 2003. – V. 80. – P. 817–829.
3. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Fomenko V. N., Kostylev V. I. Further improvement of the Prometey model and unified curve method. Part 2. Improvement of the unified curve method // Eng. Fracture Mech. – 2018. – V. 191. – P. 383–402.
4. ГОСТ Р 59115.6–2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов.
5. ГОСТ Р 59115.14–2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора.
6. NUREG/CR-6609 U.S. Comparison of Irradiation-Induced Shifts of K_{Jc} and Charpy Impact Toughness for Reactor Pressure Vessel Steels. Nuclear Regulatory Commission FIEN Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001. Oak Ridge National Laboratory.
7. Юрченко Е. В. Исследование и прогнозирование радиационного и теплового охрупчивания материалов эксплуатируемых и перспективных корпусов реакторов ВВЭР // Автореф. дис ... канд. техн. наук, СПб, 2015. – 27 стр.
8. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G. Radiation embrittlement modeling in multi-scale approach to brittle fracture of RPV steels // Int. J. of Fracture. – 2013. – V. 179, is. 1. – P. 87–108.
9. Margolin B. Z., Shvetsova V. A., Gulenko A. G., Kostylev V. I. Prometey local approach to brittle fracture: development and application // Eng. Fracture Mech. – 2008. – V. 75. – P. 3483–3498.

10. Margolin B., Yurchenko E., Potapova V., Pechenkin V. On the Modelling of Thermal Aging through Neutron Irradiation and Annealing. *Advances in Materials Science and Engineering*, V. 2018, Article ID 7175083: 1–9. <https://doi.org/10.1155/2018/7175083>
11. Alekseenko N. N., Amaev A. D., Gorynin I. V., Nikolaev V. A. Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels. *Am. Nucl. Soc. – La Grange Park, Illin., USA*, 1997.
12. WWER-440-230 Reactor Pressure Vessel Integrity. A publication of the extrabudgetary programme on the safety of WWER and RBMK nuclear power plants. IAEA-EBP-WWER-06. IAEA, Vienna, August, 1996.
13. Ahlstrand R., Margolin B., Akbashev I., Chyrko L., Kostylev V., Yurchenko E., Piminov V., Nikolaev Yu., Koshkin V., Kharchenko V., Bukhanov V. TAREG2.01/00 project // *J. Progress in Nuclear Energy*. – 2012. – V. 58. – P. 52–57.
14. Hawthorne J. R. Radiation embrittlement. In: *Embrittlement of engineering alloys*. – New York: Academic Press, 1983.
15. Margolin B. Z., Yurchenko E. V., Morozov A. M., Pirogova N. E., Brumovsky M.. Analysis of a link of embrittlement mechanisms and neutron flux effect as applied to reactor pressure vessel materials of WWER // *J. Nucl. Mater.* – 2013. – V. 434. – P. 347–356.
16. Марголин Б.З., Юрченко Е.В. Пороговые и предельные значения концентраций примесных элементов в материале корпусов реакторов типа ВВЭР // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 2(86). – С. 152–163.
17. Miller M.K., Russell K.F., Kocik J., Keilova E. Embrittlement of low copper VVER 440 surveillance samples neutron-irradiated to high fluences // *J. Nucl. Mater.* – 2000. – V. 282. – P. 83–88.
18. Pareige P., Stoller R., Russel K., Miller M. Atom probe characterization of the microstructure of nuclear pressure vessel surveillance material after neutron irradiation and after annealing treatments // *J. Nucl. Mater.* – 1997. – V. 249. – P. 165–174.
19. Debarberis L., Kryukov A., Gillemot F., Acosta B., Sevini F. Semi-mechanistic analytical model for radiation embrittlement and re-embrittlement data analysis // *Int J. Pressure Vessels and Piping*. – 2005. – V. 82. – P. 195–200.
20. Integrated analysis of WWER-440 RPV weld re-embrittlement after annealing // L. A. Kryukov, L. Debarberis, A. Ballesteros et al. // *J. Nucl. Mater.* – 2012. – V. 429. – P. 190–200.
21. Ерак Д. Ю. Материаловедческое обоснование эксплуатации корпусов реакторов ВВЭР за пределами проектного срока службы // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2013. – 42 с.
22. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Теплухина И. В., Пиминов В. А. Повышение безопасности эксплуатации энергетических установок типа ВВЭР на основе совершенствования стали для корпусов реакторов // *Вопросы материаловедения*. – 2014. – № 2(78). – С. 184–198.
23. IAEA-TECDOC-1442 / Brumovsky M. et al. Guidelines for prediction of irradiation embrittlement of operating WWER-440 reactor pressure vessels. IAEA, Vienna, 2005.
24. Гурович Б. А., Кулешова Е. А., Фролов А. С., Журко Д. А., Ерак Д. Ю., Мальцев Д. А., Комолов В. М. Структурные исследования сталей корпусов реакторов для нового поколения реакторов типа ВВЭР // *ВАНТ*. – 2013. – № 2(84). – С. 79–84.
25. Утевский Л.М., Гликман Е.Э. Карк Г.С. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. – М.: Металлургия, 1987. – 222 с.
26. Margolin B. Z., Nikolaev V. A., Yurchenko E. V., Nikolaev Yu. A., Erak D. Yu., Nikolaeva A. V.. Analysis of embrittlement of WWER-1000 RPV materials // *Int. J. Pres. Ves. & Piping*. – 2012. – V. 89. – P. 178–186.
27. Miller M. K., Chernobaeva A. A., Shtrombakh Ya. I., Russel K. F., Nanstad R. K., Erak D. Yu., Zabusov O. O. Evolution of the nanostructure of VVER-1000 RPV materials under neutron irradiation and post irradiation annealing // *J. Nucl. Mater.* – 2009. – V. 385. – P. 615–622.
28. IAEA TECDOC-1441. Effects of nickel on irradiation embrittlement of light water reactor pressure vessel steels. – IAEA. VIENNA, 2005.

29. Nikolaev Yu. Radiation Embrittlement of Cr–Ni–Mo and Cr–Mo RPV steels // Journal of ASTM International 20074 N.8, paper ID JAI 100695.
30. Kryukov A., D. Erak et al. 2002. "Extended analysis of VVER-1000 surveillance data". Int. J. Pres. Ves. & Piping 79. – P. 661–664.
31. Williams T. J., Ellis D., English C. F., Hyde J. A model of irradiation damage in high nickel submerged arc welds // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 2002. – N 97. – P. 649–660.
32. Теплова Е. Д., Теплов Н. С., Мироненко Е. А. Влияние никеля и меди на тепловую хрупкость конструкционной хромомолибденовой стали // Металловедение. – № 3. – Л.: Судпромгиз, 1959. – С. 39–50.
33. Margolin B. Z., Yurchenko E. V., Kostylev V. I., Morozov A. M., Varovin A. Ya., Rogozkin S. V., Nikitin A. A. Radiation embrittlement of support structure materials for WWER RPVs // J. Nucl. Mater. – 2018. – N 508. – P. 123–138.
34. Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Морозов А. М., Варовин А. Я. Исследование влияния пострадиационного отжига на восстановление свойств материалов опорных конструкций корпусов реакторов ВВЭР-440. Ч. 1: Постановка задачи и результаты испытаний // Вопросы материаловедения. – 2022. – № 2(110). – С. 184–198.
35. ГОСТ Р 70414–2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Конструкции опорные корпуса водо-водяного энергетического реактора. Расчет на прочность.
36. Николаев В. А., Рядков Л. Н. Роль спектра и плотности нейтронного потока в радиационном охрупчивании стали марки 15Х2МФА и металла ее сварных швов // Юбилейный сборник научных статей «Радиационное материаловедение и конструкционная прочность реакторных материалов». – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2002. – С. 178–199.
37. Stoller R. E. The effect of neutron flux on radiation-induced embrittlement in reactor pressure vessel steels // Journal of ASTM international. – 2004. – V. 1, No 4.
38. Flux effect on neutron radiation embrittlement of reactor pressure vessel steels irradiated to high fluences / N. Soneda, K. Dohi, K. Nishid, A. Nomoto et. al. // International Symposium FONTEVRAUD 7, Avignon, France, 26–30 September, 2010, NO07-A080-T01.
39. Chernobaeva A. A., Kryukov A. M., Amaev A. D., Erak D. Yu., Platonov P. A., Shtrombakh Y. I. The Role of Flux Effect on Radiation Embrittlement of WWER-440 Reactor Pressure Vessel Materials // Proc. Of the IAEA Technical Meeting, Gus Khrustalny, Russia, 2008. – P. 38–53.
40. EUR 21835 EN. 2005. Embrittlement and Mechanistic Interpretation of Reactor Pressure Vessel and Internal Materials, EUR 21835 EN. – P. 38–53.
41. Erak D. Yu., Gurovich B. A., Shtrombakh Y. I., Zhurko D. Degradation and recovery of mechanical properties of WWER-1000 pressure vessel materials // International Symposium FONTEVRAUD 7, Avignon, France, 26–30 September, 2010, NO12-A096-T01.
42. Eason E. D., Odette G. R., Nanstad R. K., Yamamoto T. A Physically Based Correlation of Irradiation-Induced Transition Temperature Shifts for RPV Steels // ORNL/TM-2006/530, Nov 2007.
43. Kirk M. Assessment of flux effect exhibited by IVAR database // Proc. of the IAEA Technical Meeting on Radiation embrittlement and Life Management of Reactor Pressure Vessels, Znojmo, Czech Republic, 18–22 October, 2010.
44. Williams T. On the Differences and Commonalities // Western' RPV steel embrittlement data after MTR or NPP irradiation. PAMELA Workshop, Mol, September 19–21, 2011.
45. Платонов П. А., Штромбах Я. И., Николаев Ю. А. Анализ состояния металла корпусов действующих реакторов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2002. – № 6 (82). – С. 3–12.
46. Кулешова Е. А., Гурович Б. А., Штромбах Я. И., Фролов А. С., Федотова С. В., Мальцев Д. А., Крикун Е. В., Журко Д. А., Чернобаева А. А. Эволюция структуры и свойств стали 15Х2НМФАА КР ВВЭР-1000 под воздействием низкотемпературного облучения // Материалы 14 междунар. конф. «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» – Мейнстрим-2016. 6–10 июня 2016 г., Зеленогорск, Санкт-Петербург.

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ γ -ОБЛУЧЕНИЯ НА КРИСТАЛЛЫ ФЛЮОРИТА С ПРИМЕСЬЮ ТРЕХВАЛЕНТНЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ИОНОВ

С. Э. САРКИСОВ, канд. физ.-мат. наук, В. А. ЮСИМ, канд. техн. наук

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

Поступила в редакцию 21.03.2023

После доработки 6.04.2023

Принята к публикации 12.04.2023

Рассмотрены явления образования центров окрашивания за счет собственных и примесных дефектов в кристаллах флюорита, активированных редкоземельными ионами Pr^{3+} , Nd^{3+} , Yb^{3+} , при воздействии γ - и УФ-излучений. На примере CaF_2 , активированных ионами Yb^{3+} и Pr^{3+} , показано воздействие фотодинамического процесса на фотохимическую устойчивость к образованию центров окрашивания Yb -содержащего кристалла и влияние нагрева на восстановление первоначальной окраски Pr -содержащего кристалла после γ -облучения в результате изменения электронного состояния ионов празеодима. Исследованы и объяснены особенности образования ионов в R^{2+} -состоянии в кристаллах CaF_2 : R^{3+} ($\text{R}^{3+} = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Yb}$) после γ -облучения и даны количественные оценки конверсионных процессов $\text{R}^{3+} \rightarrow \text{R}^{2+}$.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, монокристаллы фторидов, высокотемпературная кристаллизация из расплава, радиационная стойкость

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-195-202

ЛИТЕРАТУРА

1. Sobolev B., Fedorov P. Phase Diagrams of the $\text{CaF}_2-(\text{Y}, \text{Ln})\text{F}_3$ Systems I. Experimental // Journal of the Less Common Metals. – 1978. – V. 60, N 1. – P. 33–46.
2. Fedorov P. Association of point defects in non-stoichiometric $\text{M}_{1-x}\text{RF}_2 + x$ fluorite-type solid solutions // Butlletí de les Societats Catalanes de Física, Química, Matemàtiques i Tecnologia. – 1991. – P. 349–381.
3. Пат. РФ № 2643980 от 06.02.2018. Тепловой узел установки для выращивания галоидных кристаллов методом горизонтально направленной кристаллизации / В. А. Юсим, Р. К. Калиммулин, В. В. Рябченков, С. Э. Саркисов.
4. Yusim V. A., Sarkisov S. E., Ryabchenkov V. V., Kloss Yu. Yu., Govorun I. V., Ivanova L. V., Sakmarov A. V. Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in the graphite thermal unit of the crystallization apparatus for Horizontal directional solidification method // Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – V. 1560.
5. Архангельская В. А., Ерофеичев В. Г., Киселева М. Н. Автолокализованные дырочные центры в кристаллах типа флюорита, активированных редкими землями // ФТТ. – 1969. – Т. 11, № 7. – С. 2008–2010.
6. Arends J. Color Centers in Additively Colored CaF_2 and BaF_2 // Physica Stat. Solidi. – 1964. – V. 7, N 3. – P. 805–815.
7. Dieke G. H., Crosswhite H. M. The spectra of the doubly and triply ionized rare earths // Applied optics. – 1963. – V. 2, N 7. – P. 675–686.
8. Energy level schemes of N electronic configurations for the di-, tri-, and tetravalent lanthanides and actinides in a free state / Ma C.-G., Brik M. G., Liu D.-X., Feng B. et al. // Journal of Luminescence. – 2016. – V. 170. – P. 369–374.
9. Burton M. Effects of High-energy Radiation on Organic Compounds // J. Phys. Colloid. Chem. – 1947. – V. 51. – 611 p.
10. Низамутдинов А. С., Семашко В. В., Наумов А. К., Абдулсабиров Р. Ю., Кораблева С. Л., Марисов М. А. Фотодинамические процессы в кристаллах CaF_2 , активированных ионами Ce^{3+} и Yb^{3+} // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 8. – С. 1403–1405.
11. Родный П. А., Ходюк И. В., Стрыганюк Г. Б. Энергетическое положение редкоземельных ионов в BaF_2 и CdF_2 // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, № 9. – С. 1578–1581.