

А. Ю. Приймак, М. Ю. Сербиновский

ВЫБОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК ВПРЫСКИВАЮЩИХ ПАРООХЛАДИТЕЛЕЙ

Аннотация. По результатам анализа информации о разрушениях и дефектах центробежных форсунок впрыскивающих парохладителей (ВПО) была выявлена потребность в выборе перспективного материала для их изготовления с целью повышения ресурса работы. С учетом анализа был разработан и описан принципиальный подход к проведению натурных испытаний образцов, максимально приближенный к режимам работы центробежных форсунок во впрыскивающих парохладителях, включающий циклический нагрев и охлаждение, определены критерии для выбора перспективного материала для изготовления центробежных форсунок, а именно: структура материала и изменение его твердости, а также склонность к трещинообразованию.

Ключевые слова: впрыскивающий парохладитель, центробежная форсунка, материал, паровой котёл, регулирование температуры пара.

Для цитирования: Приймак, А. Ю. Выбор перспективных материалов центробежных форсунок впрыскивающих парохладителей / А. Ю. Приймак, М. Ю. Сербиновский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 240–247. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_240.

Введение

Форсунки впрыскивающего парохладителя (ВПО) обеспечивают распыл воды в паровой тракт энергетического котла и напрямую влияют на качество регулирования параметров пара, уходящего из котла в турбину энергоблока ТЭС, манёвренные характеристики последнего. С другой стороны, форсунки в процессе эксплуатации подвергаются высоким напряжениям вследствие больших температурных градиентов и эрозии, вызванных скоростным турбулентным потоком воды и пара, поэтому их надёжность и ресурс работы определяет надёжность и межремонтный ресурс котла в целом. Об этом свидетельствуют статистические данные аварий на энергоблоках ТЭС [1–4]. Требования по повышению надёжности и ресурса форсунок и ВПО в целом приводят к необходимости постоянного совершенствования их конструкции [4–7].

Основанная часть

Материалы форсунок ВПО должны обеспечивать надёжную работу при температуре 545 °С и выше, быть стойкими к эрозионному износу, не склонными к образованию трещин при больших градиентах температуры (термошоку), быть технологичными и относительно недорогими в условиях котлостроительного производства, поэтому выбор материала для изготовления форсунок остается серьезной и сложной задачей. В настоящее время для изготовления форсунок используется довольно широкий круг материалов, однако, нет достаточно полных и глубоких исследований, связанных с выбором материалов форсунок, которые соответствовали бы противоречивым требованиям, предъявляемым к ним. Требуются дальнейшие исследования по выбору материалов форсунок, при этом необходимо наиболее полно учитывать условия их работы при различных эксплуатационных режимах котлоагрегата, кроме этого, требуется установить, на каких этапах изготовления и эксплуатации появляются и развиваются дефекты, которые приводят к разрушению форсунок.

Форсунка ВПО (рис. 1 [2]) включает в себя корпус, состоящий из цилиндрической и полусферической частей, полусферическое доньшко. Корпус форсунки имеет тангенциальные каналы и сопло, а со стороны потока пара он защищён кожухом. Корпус форсунки, доньшко изготавливают из металла стойкого к эрозии.

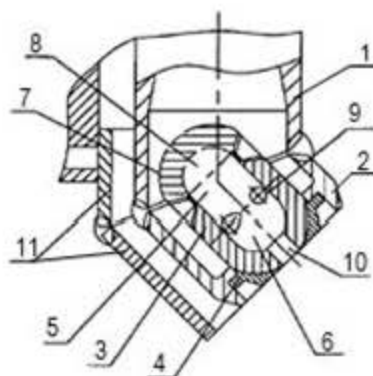


Рис. 1. Конструкция центр обожной форсунки

1 – водоподводящая труба, 2 – втулка форсунки, 3 – корпус форсунки, 4 – венец,
5 – внутренняя полость корпуса, 6 – цилиндрическая часть полости, 7 – доньшко корпуса,
8 – полусферическая часть внутренней полости, 9 – тангенциальные каналы, 10 – сопло,
11 – защитный кожух

В рамках исследования были определены следующие основные мероприятия по определению оптимального материала для изготовления центр обожных форсунок и, соответственно, методы исследования 1) сбор и анализ исходных данных, 2) разработка программы испытаний, 3) определение формы и параметров образца, 4) разработка конструкторской документации на образцы, 5) изготовление и контроль образцов, 6) проведение испытаний, 7) анализ результатов и формулирование выводов.

Остановимся на основных.

Определение формы и параметров образца производили с учетом специфики работы форсунки, а именно резкой смены температуры: от температуры пара (max 570 °С), до температуры впрыскиваемой воды (min 60 °С). Максимальный градиент температур наблюдается в пусковых парохладителях прямоточных котлов и порой достигает более 400 °С.

Разработанный образец представляет собой плоскую шайбу, диаметр которой был выбран, соответствующим расстоянию между соседними входными отверстиями в форсунке, в середине шайбы расположено одиночное отверстие диаметром 5 мм, который соответствует размеру входных отверстий в форсунке. С одной стороны отверстие имеет фаску размером 1×45°, с другой – фаска отсутствует. Толщина шайбы соответствует толщине стенки форсунки, а ее края, с целью исключения локальной концентрации напряжений, выполнены радиусом 4 мм. Параметр шероховатости поверхности готовой шайбы после механической обработки соответствует шероховатости поверхности форсунки и составляет Ra 20.

Образцы данной конструкции были изготовлены из пяти марок электродов, которые выбраны с учетом специфики режимов работы форсунки, а также технологических возможностей ПАО ТКЗ «Красный котельщик», данные по ним приведены в табл. 1. Каждый образец имел специальную маркировку, отражающую материал и порядковый номер.

Таблица 1

Выбранные материалы для изготовления образцов

№ поз.	№ образца	Марка (тип) электрода	Тип электрода с указанием химического состава
1	11-16	ВПН-1	Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ
2	21-26	ЭА-400/10Т	Э-07Х19Н11М3Г2Ф
3	31-36	ЭА-395/9	Э-11Х15Н25М6АГ2
4	41-46	ЦЛ-25/2	Э-10Х25Н13Г2
5	51-56	ЦЛ-11	Э-08Х20Н9Г2В

Программа испытаний образцов разработана на основании данных, полученных от эксплуатационного персонала электростанций и включает в себя режимы термических испытаний,

максимально повторяющие реальные режимы работы центробежной форсунки в ВПО и включают попеременный нагрев и резкое охлаждение образцов.

Нагрев образцов производился в печи ПТК до температуры 545 °С, с выдержкой в течение 1 часа. По окончании выдержки образцы охлаждали в воде комнатной температуры в течение 5–7 минут. Возникающий градиент температур в 520 °С превышал максимально возможный в форсунке 400 °С, однако позволил интенсифицировать процессы появления и развития дефектов в материале образцов. Общее количество циклов «нагрев-охлаждение» выбрано равным 50, что в среднем соответствует 4-м пускам котла из холодного состояния в год за 11,5 лет, которые соответствуют расчетному ресурсу 100 000 часов.

Контроль образцов включал в себя цветную дефектоскопию, измерения значений твердости, микроанализ проводился на базе ЦЗЛ ПАО ТКЗ «Красный котельщик».

Капиллярный контроль образцов основан на применении проникающих жидкостей, регистрации (индикаторных следов) их на адсорбирующем покрытии. Контроль выполнялся с помощью дефектоскопического комплекта Nord-Test класс точности 2, который включает в себя пенетрант U-88, проявитель U-89, очиститель U-87.

Контроль твердости образцов производили с помощью твердомера Виккерса Металаб 422 (свидетельство о поверке № С-ВР/07-04-2023/241882692, действительно до 06.04.2024) по шкале Роквелла. Исследование микроструктуры проводили после приготовления микрошлифов до и после травления в растворе кислот, состоящем из 10 мл азотной кислоты и 30 мл соляной кислоты на оптическом микроскопе «Olympus» GX53 с анализатором фрагментов микроструктуры твердых тел при увеличении 100–1000 крат.

В рамках исследования металла образцов на этапе изготовления и термообработки методом капиллярного контроля были выявлены множественные дефекты в виде линейных и криволинейных индикаторных следов, пор и их скоплений. Трещин на этапе термообработки обнаружено не было. Отметим, что все выявленные дефекты образовались во время изготовления образцов. Диаграмма распределения количества дефектов по образцам приведена на рис. 2.

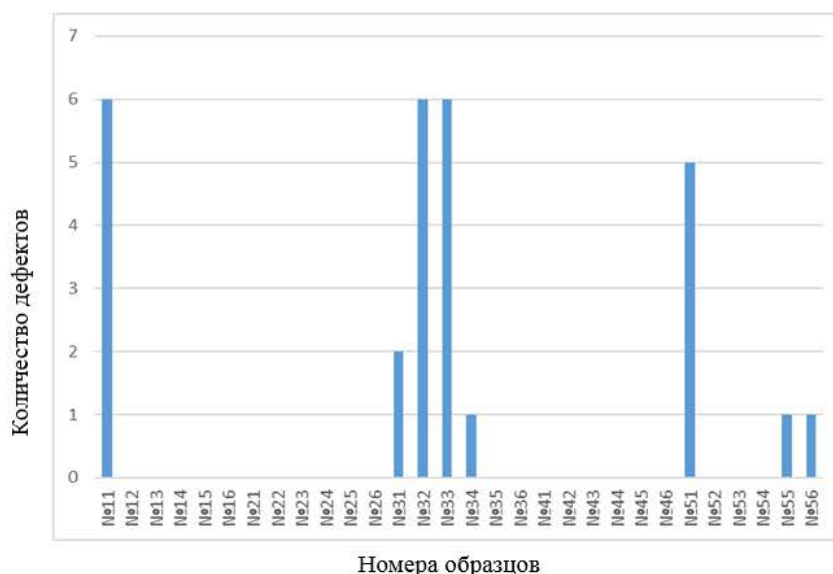


Рис. 2. Диаграмма распределения количества дефектов по образцам:

№ 11–16 (электрод ВПН-1, Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ), № 21–26 (электрод ЭА-400/10Т, Э-07Х19Н11М3Г2Ф), № 31–36 (электрод ЭА-395/9, Э-11Х15Н25М6АГ2), № 41–46 (электрод ЦЛ-25/2, Э-10Х25Н13Г2), № 51–56 (электрод ЦЛ-11, Э-08Х20Н9Г2Б)

Вероятность появления дефектов по всей партии образцов составляет 27 %, а вероятность появления более одного дефекта на образце – 17 %. При этом вероятность появления дефектов на изделиях с наплавкой материалом Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ, составляет 17 %, материалом Э-11Х15Н25М6АГ2 – 67 % при 50 %-ной вероятности более одного дефекта на изделии, материалом Э-08Х20Н9Г2Б – 50 %. Нужно отметить, что при малой выборке эксперимента это лишь ориентировочные показатели, однако поры и поверхностные дефекты могут стать причиной возникновения и развития

трещин в процессе длительной эксплуатации форсунок в условиях их периодического температурного шока при пусковых режимах котла и работе котла на скользящих режимах (частом изменении его паропроизводительности). Таким образом, при количестве форсунок 8–24 в ВПО котла 2–6 форсунок будут иметь пониженный ресурс и повышенную вероятность быстрой потери работоспособности. Соответственно предпочтительны материалы, обладающие более высокой стойкостью к появлению производственных дефектов, кроме этого нужен тщательный контроль дефектов в процессе изготовления форсунок.

В табл. 2 приведены механические характеристики электродов, используемых для наплавки [8–13].

Таблица 2

Механические характеристики образцов

№ поз.	Марка (тип) электрода	Тип электрода с указанием химического состава	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %, δ_5	Относительное сужение, %, ψ	Ударная вязкость +20°C, Дж/см ² , КСУ ⁺²⁰
1	ВПН-1	Э-09X16H9C5Г2M2ФТ	-	-	-	-	-
2	ЭА-400/10Т	Э-07X19H11M3Г2Ф	-	≥ 350	≥ 25	-	≥ 90
3	ЭА-395/9	Э-11X15H25M6АГ2	≥ 608	≥ 392	≥ 30	≥ 45	≥ 120
4	ЦЛ-25/2	Э-10X25H13Г2	539 (560)	(340)	29,4 (45)	-	25 (52) (88 ^{40°C})
5	ЦЛ-11	Э-08X20H9Г2Б	540	310	22	-	80

Примечание: Твердость наплавленного электродами ВПН-1 слоя при нормальной температуре: в исходном состоянии – норма 25–30 HRC₃, после термообработки 30,5–36,0 HRC₃

Отметим, что производители не раскрывают основные механические характеристики электродов ВПН-1 (Э-09X16H9C5Г2M2ФТ), указывая только твердость наплавленного электродами ВПН-1 слоя при нормальной температуре в исходном состоянии и после термообработки. По остальным исследуемым электродам приводятся достаточно полные сведения о механических характеристиках, однако по электродам ЦЛ-25/2 (Э-10X25H13Г2) разных производителей диапазоны характеристик относительно большие. Однако приведённые данные показывают, что материалы можно отнести к высокопрочным, потенциально обладающие высокой стойкостью к эрозии высоко скоростным потоком воды. Стойкость к трещинообразованию предполагает достаточно высокую пластичность и ударную вязкость, поэтому наиболее предпочтительны в данном случае электроды ЭА-395/9 (Э-11X15H25M6АГ2) и ЦЛ-25/2 (Э-10X25H13Г2), но пластичность материалов электродов ЭА-400/10Т (Э-07X19H11M3Г2Ф) и ЦЛ-11 (Э-08X20H9Г2Б) уступает мало. Для выработки рекомендаций по выбору материалов рассмотрим изменение одной из основных характеристик, влияющих на более стойкость к эрозии – твердость материала и её изменение в процессе эксплуатации форсунок.

Зависимости твердости исследуемых материалов от количества циклов «нагрев – охлаждение» представлены на рис. 3. Циклы «нагрев – охлаждение» моделируют в данном случае пуски котла из холодного состояния, т.е. когда котел охлажден ниже температуры 100 °С.

Отметим, что металлографические исследования эксплуатируемых ВПО показали, что в приповерхностном слое форсунок появляется подкалочная зона с троосто-мартенситной структурой, в которой появляются и развиваются трещины [3].

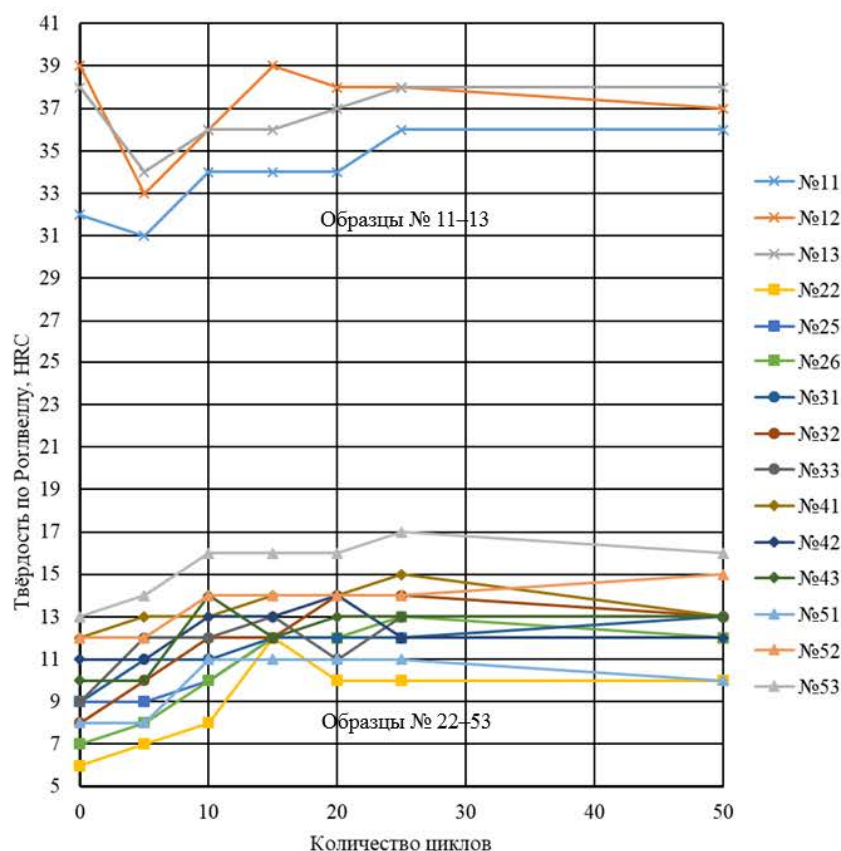


Рис. 3. Зависимости твердости образцов электродных материалов от количества циклов «нагрев – охлаждение»

Значения твердости образцов № 11–53 всех исследованных материалов лежат в пределах от 6 до 39 HRC. При этом твердость образцов № 21–53 (электроды ЭА-400/10Т, ЭА-395/9, ЦЛ-25/2 и ЦЛ-11) находятся в пределах значений от 6 до 17 HRC и существенно ниже части твердости образцов № 11–13 (электрод ВПН-1), значения твердости которых находятся в пределах от 31 до 39 HRC. С ростом количества термообработок (циклов «нагрев – охлаждение») у материалов образцов № 21–53 твердость возрастает. Для образцов № 11, 12, 13 при первых термообработках снижается на 1–6 единиц HRC далее возрастает на 4–5 единиц HRC и после последнего 50-го цикла составляет 36–38 HRC, у остальных образцов № 22–53 рост твердости составляет в среднем 3,5 единицы HRC. Повышение твердости образцов № 22–53 относительно мало, что говорит о сохранении их механических свойств при циклическом нагреве и охлаждении. Для образцов № 11, 12 и 13 (электрод ВПН-1) повышение твердости после первых пяти циклов говорит об охрупчивании образцов при периодическом нагреве и охлаждении, а это создаёт благоприятные условия для появления и развития трещин в форсунке.

Исследовали структуры образцов № 11–53 после 50 циклов нагрева и охлаждения. Микроструктура материалов образцов представлена на рис. 4. Результаты исследования показали, что материалы образцов № 23–53 имеет структуру аустенита + α -фазы Fe. Наиболее однородная структура материалов Э-07X19H11M3Г2Ф (электрод ЭА-400/10Т) и Э-11X15H25M6АГ2 (электрод ЭА-395/9), позволяет говорить об их большей потенциальной стойкости к эрозионным процессам и к трещинообразованию. Образцы из материала Э-09X16H9C5Г2М2ФТ (электрод ВПН-1) отличаются троосто-мартенситной структурой (рис. 4, образец № 13), что свидетельствует об их склонности к трещинообразованию в процессе эксплуатации котельных форсунок.

В целом проведённый анализ позволяет сделать вывод о перспективности применения электродов аустенитной группы, в первую очередь электродов ЭА-400/10Т (Э-07X19H11M3Г2Ф) и ЭА-395/9 (Э-11X15H25M6АГ2). Однако необходимы дальнейшие исследования данных материалов по критерию износостойкости.

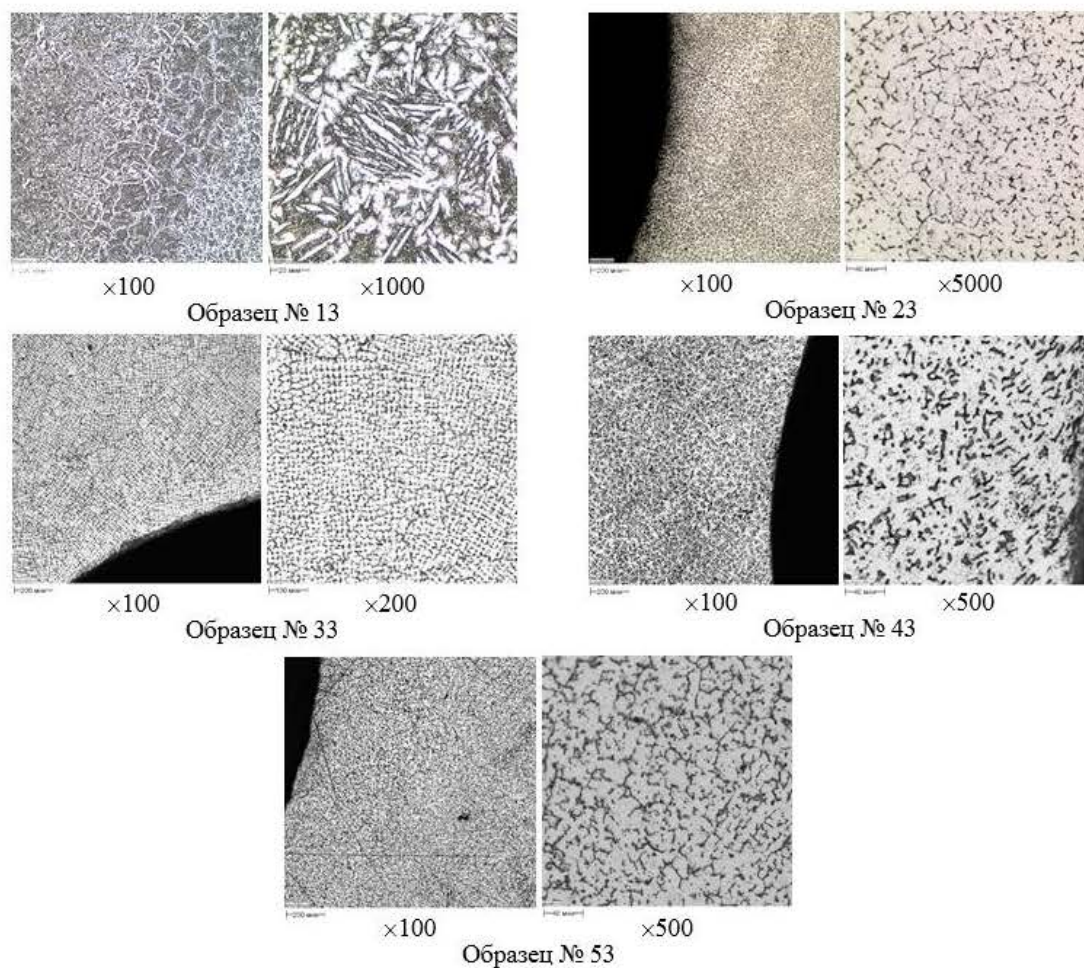


Рис. 4. Микроструктура образцов

Выводы

1 Исследованы пять электродных материалов для наплавки с целью определения приоритетного материала для форсунок впрыскивающих пароохладителей паровых котлов. Изучены склонность к появлению дефектов в процессе изготовления, изменение твердости материалов при их циклическом нагреве и охлаждении, микроструктура образцов материалов после проведения циклического нагрева и охлаждения.

2 Выявлена повышенная склонность электродных материалов Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ, Э-11Х15Н25М6АГ2 и Э-08Х20Н9Г2Б к появлению дефектов в процессе изготовления.

3 Показано, что электродный материал Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ имеет повышенную твердость по отношению к другим исследованным материалам, при этом его твердость повышается в процессе циклического нагрева и охлаждения, что говорит о постепенном формировании закалочной структуры. Остальные исследованные материалы имеют меньшую твердость, мало склонны к повышению твердости при циклическом нагреве и охлаждении, не образуют закалочных структур при циклическом нагреве и охлаждении.

4 В результате циклического нагрева и охлаждения в образцах из электродного материала Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ формируется троосто-мартенситная структура склонная к трещинообразованию, поэтому материал Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ не рекомендуется к использованию в конструкции форсунок впрыскивающих пароохладителей паровых котлов. Материалы Э-07Х19Н11М3Г2Ф, Э-11Х15Н25М6АГ2, Э-10Х25Н13Г2 и Э-08Х20Н9Г2Б сохраняют при циклическом нагреве и охлаждении структуру аустенит + α -фазы Fe.

5 Наиболее предпочтительно использование в конструкции форсунок впрыскивающих пароохладителей паровых котлов электродных материалов Э-07Х19Н11М3Г2Ф и Э-11Х15Н25М6АГ2, но необходимы дальнейшие исследования материалов форсунок по критерию эрозионной стойкости.

Список литературы

- 1 Протокол осмотра пусковых впрысков ОП блз, нитка Б (12 г), лаборатория технической диагностики «Пермской ГРЭС». 2021. – 14 с.
- 2 Заключение № 12-04/21 по результатам исследования повреждения впрыскивающих устройств пусковых пароохладителей паропровода «острого» пара энергоблока ст. № 2, Лаборатория технической диагностики «Пермской ГРЭС», 2021. – 14 с.
- 3 Отчет № 4307-380-2021 по исследованию разрушенных элементов форсунок пусковых пароохладителей котла ТПП-804 ст. 2 филиала «Пермская ГРЭС», Центральная заводская лаборатория ПАО ТКЗ «Красный котельщик», 2021. – 28 с.
- 4 Израилев, Ю. Л. Живучесть паропроводов стареющих тепловых электростанций / Ю. Л. Израилев, Ф. А. Хромченко. – Москва : Торус пресс, 2002. – 616 с.
- 5 Черняк, В. Н. Повышение надежности впрыскивающих пароохладителей низкого давления котла ТГМП-314. / В. Н. Черняк, Н. А. Зройчиков, Т. М. Макарова // Теплоэнергетика. – 1999. – № 2. – С. 44–47. – ISSN 0040-3636.
- 6 Авторское свидетельство № 2339873. Впрыскивающий пароохладитель / А. И. Сивцов // МКИ F22G 5/12. Заявл. 20.04.2008. Опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33. – 6 с.
- 7 Отчет о научно-исследовательской работе «Повышение надежности работы впрыскивающих пароохладителей». – Конструкторское бюро ПАО ТКЗ «Красный котельщик», 2023. – 37 с.
- 8 Electrodes /Каталог/ Тип Э-07Х19Н11М3Г2Ф ЭА-400/10Т – Судиславский завод сварочных материалов. – URL: https://www.czcm-weld.ru/catalog/katalog_elektrodov/elektrody_dlya_svarki_vysokolegirovannykh_staley_i_splavov/ea_400_10t/?ysclid=lo8my1fmw0528504405 (дата обращения: 20.10.2023).
- 9 Electrodes /Каталог/ Тип Э-11Х15Н25М6АГ2 ЭА-395/9 – Судиславский завод сварочных материалов. – URL: https://www.czcm-weld.ru/catalog/katalog_elektrodov/elektrody_dlya_svarki_vysokolegirovannykh_staley_i_splavov/ea_395_9/ (дата обращения: 20.10.2023).
- 10 Electrodes ЦЛ-25/2 / Каталог – НПК Сварэлектрод <https://svar-electrod.ru/catalog/elektrodyi-czl-252?ysclid=lo8myjaaln575007471> (дата обращения: 20.10.2023).
- 11 Сварочные электроды ЦЛ-25 / Каталог /

References

- 1 Protocol of inspection of starting sprays of live steam, Unit 3, run B (12 g), Permskaya GRES Technical Diagnostics Laboratory, 2021. – 14 p.
- 2 Conclusion No. 12-04/21 based on the results of a study of damage to the spray devices of the starting attemperators of the steam pipeline of live steam, Power unit No. 2, Permskaya GRES technical diagnostics laboratory, 2021 – 14 p.
- 3 Report No. 4307-380-2021 on the study of the destroyed elements of the atomizers of the starting attemperators of the ТПП-804 boiler of Station 2 of the Permskaya GRES branch, Central Laboratory of PJSC “Krasny Kotelshchik”, 2021. – 28 p.
- 4 Izrailev, Y. L. Survivability of steam pipelines of aging thermal power plants / Y. L. Izrailev, F. A. Khromchenko. – Moscow : Torus press, 2002. – 616 p.
- 5 Chernyak, V. N. Improving the reliability of low-pressure spray attemperators of the ТГМП-314 / V. N. Chernyak, N. A. Zroychikov, T. M. Makarova // Teploenergetik. – 1999. – No. 2. – P. 44–47. – ISSN 0040-3636.
- 6 Copyright certificate No. 2339873. Spray attemperator / A. I. Sivtsov // МКИ F22G 5/12. Application dd 20.04.2008, Published on 27.11.2008. Bulletin No. 33. – 6 p.
- 7 Report on the research work "Improving the reliability of injecting steam coolers", Design Bureau of PJSC TKZ "Krasny Kotelshchik", 2023, 37 p.
- 8 Electrodes /Catalog/ Type E-07H19N11M3G2F EA-400/10T – Sudislavsky Welding Materials Plant. – URL: https://www.czcm-weld.ru/catalog/katalog_elektrodov/elektrody_dlya_svarki_vysokolegirovannykh_staley_i_splavov/ea_400_10t/?ysclid=lo8my1fmw0528504405 (date of access: 10/20/2023).
- 9 Electrodes /Catalog/ Type E-11H15N25M6AG2 EA-395/9 – Sudislavsky Welding Materials Plant. – URL: https://www.czcm-weld.ru/catalog/katalog_elektrodov/elektrody_dlya_svarki_vysokolegirovannykh_staley_i_splavov/ea_395_9/ (date of access: 10/20/2023).
- 10 Electrodes CL-25/2 / Catalog-NPK Svarelectrod <https://svar-electrod.ru/catalog/elektrodyi-czl-252?ysclid=lo8myjaaln575007471> (date of access: 10/20/2023).
- 11 Welding electrodes CL – 25 / Catalog /

СпецЭлектрод – СпецЭлектрод – URL:
<https://www.spetsselectrode.ru/electrod/cl25.htm?ysclid=locv2cagsd945030152> (дата обращения: 20.10.2023).

12 Сварочные электроды / Электроды от Электродгруп / Производство МР, УОНИ, ОЗС, АНО / Сварочные электроды ЦЛ-11 тип Э-08Х20Н9Г2Б – ЭЛЕКТРОГРУП– URL:
<http://electrogroup.ru/proizv/176-opizl11/> (дата обращения: 20.10.2023).

13 Электроды ВПИ-1 / Каталог – НПК Сварэлектрод – URL: <https://svar-electrod.ru/catalog/e-09x16n9s5g2m2ft/elektrodyi-vpi-1> (дата обращения: 20.10.2023).

SpecElectrod – SpecElectrod-URL:
<https://www.spetsselectrode.ru/electrod/cl25.htm?ysclid=locv2cagsd945030152> (date of access: 10/20/2023).

12 Welding electrodes / Electrodes from Electrogroup / Production of MR, UONI, OZS, ANO / Welding electrodes CL-11 type E-08H20N9G2B – ELECTROGROUP– URL:
<http://electrogroup.ru/proizv/176-opizl11/> (date of access: 10/20/2023).

13 Electrodes VPI – 1 / Catalog – NPK Svarelectrod-URL: <https://svar-electrod.ru/catalog/e-09x16n9s5g2m2ft/elektrodyi-vpi-1> (date of access: 10/20/2023).

A. Y. Priymak, M. Y. Serbinovsky

SELECTION OF PROMISING MATERIALS FOR CENTRIFUGAL NOZZLES OF INJECTING STEAM COOLERS

Abstract. Based on the results of the analysis of information on the destruction and defects of centrifugal nozzles of injection steam coolers (VPO), it was identified the need for selecting a promising material for their manufacture in order to increase their service life. It was described a fundamental approach to carrying out full-scale testing of samples as close as possible to the operating modes of centrifugal nozzles in injection steam coolers including cyclic heating and cooling. Criteria were determined for selecting a promising material for the manufacture of centrifugal nozzles, namely: the structure of the material and the change its hardness, as well as its tendency to crack.

Keywords: injecting steam cooler, centrifugal nozzle, material, steam boiler, steam temperature control.

For citation: Priymak, A. Y. Selection of promising materials for centrifugal nozzles of injecting steam coolers / A. Yu. Priymak, M. Yu. Serbinovsky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 240–247. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_240.

Сведения об авторах

Приймак Антон Юрьевич
 Ростовский государственный университет
 путей сообщения (РГУПС),
 кафедра «Основы проектирования машин»,
 аспирант,
 e-mail: A290488@yandex.ru

Сербиновский Михаил Юрьевич
 ПАО ТКЗ «Красный котельщик»
 конструкторское бюро,
 главный специалист,
 e-mail: serb-m@mail.ru

Information about the authors

Priymak Anton Yurievich
 Rostov State Transport University (RSTU),
 Chair «Machine Design Fundamentals»,
 Postgraduate Student,
 e-mail: A290488@yandex.ru

Serbinovsky Mikhail Yurievich
 PJSC TKZ «Krasny Kotelshchik»,
 Design Bureau,
 Chief Specialist,
 e-mail: serb-m@mail.ru