

Пайка реакторной ферритно-мартенситной стали ЭП-823 быстрозакалённым ленточным припоем на основе железа

А. А. Иванников, Б. А. Тарасов, В. Т. Федотов, О. Н. Севрюков,
А. Н. Сучков, И. С. Логвенчев, И. В. Федотов, Е. С. Жариков

Для создания неразъемных соединений из перспективной реакторной стали ЭП-823 разработан сплав-припой системы Fe – 12 Cr – Si – В. Отработаны технология получения сплав-припой в виде быстрозакаленной ленты и режим пайки этим припоем. Проведены металлографические и микрорентгеноспектральные исследования паяных соединений. Выявлены основные закономерности формирования структурно-фазового состояния паяных соединений. Показана перспективность применения пайки для соединения трудносвариваемой стали ЭП-823.

Ключевые слова: пайка, припой, железо, сплав на основе железа, аморфный, быстрая закалка, Брест, реактор на быстрых нейтронах.

Введение

В рамках федеральной целевой программы “Ядерные энерготехнологии нового поколения” к 2020 году планируют создать реакторную установку БРЕСТ-ОД-300, в которой будет использован тяжелый жидкометаллический теплоноситель (ТЖМТ) — свинец.

Исследования и опыт разработки материалов для реакторов с ТЖМТ указывают, что по совокупности физико-механических, коррозионных, радиационных и технологических свойств, стали ферритно-мартенситного (Ф-М) класса с содержанием хрома в интервале 9 – 12%, являются наиболее подходящим материалом для элементов активной зоны со свинцовым теплоносителем. Это связано с их высоким сопротивлением к вакансионному распуханию, низкой скоростью радиационной ползучести и длительной совместимостью с ТЖМТ при использовании технологии кислородного ингибирования теплоносителя [1 – 3].

Сталь ЭП-823 Ф-М класса (16Х12МВСФБР — 16 Cr – 12 Mn – W – Si – V – Nb – В), утверждена в качестве материала оболочек твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300.

В настоящее время для соединения элементов конструкций реакторов на быстрых нейтронах применяют преимущественно сварку. Однако внедрение новых материалов, таких как ферритно-мартенситная сталь ЭП-823 затрудняет использование сварки, поскольку сварка вызывает значительные структурно-фазовые изменения в зоне термического влияния, при этом механические и коррозионные свойства соединения претерпевают серьезные изменения [4].

Известно, что сварные соединения сталей ферритно-мартенситного класса склонны к образованию холодных и горячих трещин [5]. Это связано с тем, что при сварке в зоне сварного шва и термического влияния образуется мартенсит, обладающий низкой деформационной способностью. Деформации и остаточные напряжения, присутствующие в сварных соединениях, создают возможность образования холодных трещин.

В качестве альтернативной технологии соединения элементов конструкций из стали ЭП-823 предлагается использовать пайку.

Перспективным является применение быстрозакалённых (БЗ) аморфных ленточных сплавов-припоев. Во многих работах, например в [6, 7]

показано, что такие припои обладают рядом преимуществ перед их кристаллическими аналогами: химической и фазовой однородностью, узкими интервалами плавления, значительно более высокой диффузионной и капиллярной активностью в процессе пайки [6], что обеспечивает формирование высококачественного паяного соединения.

Цель работы — разработка быстрозакаленного ленточного сплава-припоя системы Fe – 12 Cr – Si – В на основе железа с интервалом плавления 1070 – 1150 °С для высокотемпературной пайки ферритно-мартенситной стали ЭП-823.

Методика проведения исследований

В качестве припоев для вакуумной пайки сталей, эксплуатирующихся при высоких температурах, в большинстве случаев применяют никелевые сложнолегированные сплавы. Однако условия работы конструкционных элементов из стали ЭП-823 не позволяют использовать никелевые припои, так как никель со свинцом образует эвтектику при температуре 324 °С [8]. Сплавы, содержащие никель, подвержены активной коррозии в жидком свинце. Поэтому в качестве основы разрабатываемого припоя было выбрано железо. Припои на основе железа в существующей практике пайки применяют сравнительно редко, объясняется это тем, что, несмотря на их дешевизну, не удаётся получить пластичные припои, обладающие высокой жаропрочностью и жаростойкостью, с температурой ликвидуса ниже 1150 °С.

Основным легирующим компонентом, входящим в состав припоев на железной основе, является хром. Добавка хрома увеличивает жаропрочность и жаростойкость припоев. Так как сталь ЭП-823 содержит 12% Cr, было решено добавить к основе припоя 12% Cr для максимальной близости состава припойной композиции с паяемой сталью. Для получения сплава-припоя с аморфной структурой, которая обеспечивает высокое качество ленты, необходимо легирование металлоидами (в нашем случае Si и В), причём аморфизация из расплава системы металл – металлоид зависит от содержания металлоидов в сплаве (суммарное содержание Si и В должно составлять 15 – 30 ат. %). Кремний и бор эффективно снижают температуру плавления железных сплавов, так как являются эвтектикообразующими элементами. Бор придаёт припою самофлюсующие свойства [9]. На основании вышесказанного предложен состав сплава системы Fe – 12 Cr – Si – В и разработана технология его получения методом сверхбыстрого затвердевания расплава.

Выплавку слитков сплава-припоя осуществляли в дуговой печи МИФИ-9-3 в защитной атмосфере очищенного аргона. Обработку технологии получения припоев в виде лент проводили на установке для спиннингования расплава “Кристалл-702”. Данная установка позволяет получать быстрозакаленные аморфные и нанокристаллические сплавы с температурой плавления до 1300 °С в виде ленты толщиной 25 – 60 мкм и шириной от 1,5 до 50 мм [9]. В ходе обработки технологии получен сплав-припой системы Fe – 12 Cr – Si – В в виде ленты шириной 10 мм и толщиной 40 – 45 мкм.

Рентгеновские дифракционные спектры образцов снимали на дифрактометре Bruker D8 Discover (Германия) в Cu K_α-излучении. Для идентификации фаз использовали программное обеспечение Bruker AXS DIFFRAC.EVA (версия 3.0) и кристаллографическую базу данных ICDD PDF-2 (2008).

Температуры фазовых превращений полученного сплава-припоя определяли на установке STA 409 CD фирмы “Netzsch” (Германия) методом дифференциального термического анализа.

Полученным ленточным припоем спаяны плоские образцы из стали ЭП-823 (состав приведён в табл. 1) с фиксированным зазором 40 – 45 мкм (при 1200 °С, в течение 20 мин в вакууме не хуже 1,3·10⁻³ Па), которые исследовали на растровом электронном микроскопе CamScan-4VD.

Таблица 1

Химический состав исследуемой стали ЭП-823

Материал	Легирующие элементы, масс. %								
	C	Cr	Si	Mn	Ni	Mo	V	Nb	W
ЭП823	0,15	11,2	1,1	0,7	0,5	0,6	0,2	0,3	0,7

Измерение микротвёрдости паяных швов проводили с использованием микротвердомера модели HVS-1000 вдавливанием алмазной пирамиды в поверхность испытуемого образца под действием нагрузки в 100 г, которую прикладывали в течение 15 с. Микротвёрдость измеряли непосредственно в центре шва и на расстоянии 100 мкм от центра шва с шагом в 50 мкм. Диагональ отпечатка варьировали от 20 до 40 мкм.

Для определения механических характеристик паяного соединения при одноосном растяжении спаяны 5 цилиндрических образцов ГОСТ 28830-90 при температуре 1200 °С в течение 20 мин. Испытания на разрушение проводили на разрывной машине Р-5 при фиксированной скорости движения захватов (1 мм/мин).

Результаты исследований и их обсуждение

Рентгеновскими методами установлено, что полученный сплав (в кристаллическом состоянии после выплавки в дуговой печи) обладает двухфазной структурой, состоящей из твёрдого раствора Cr и Si в железе с ОЦК структурой и параметром решётки

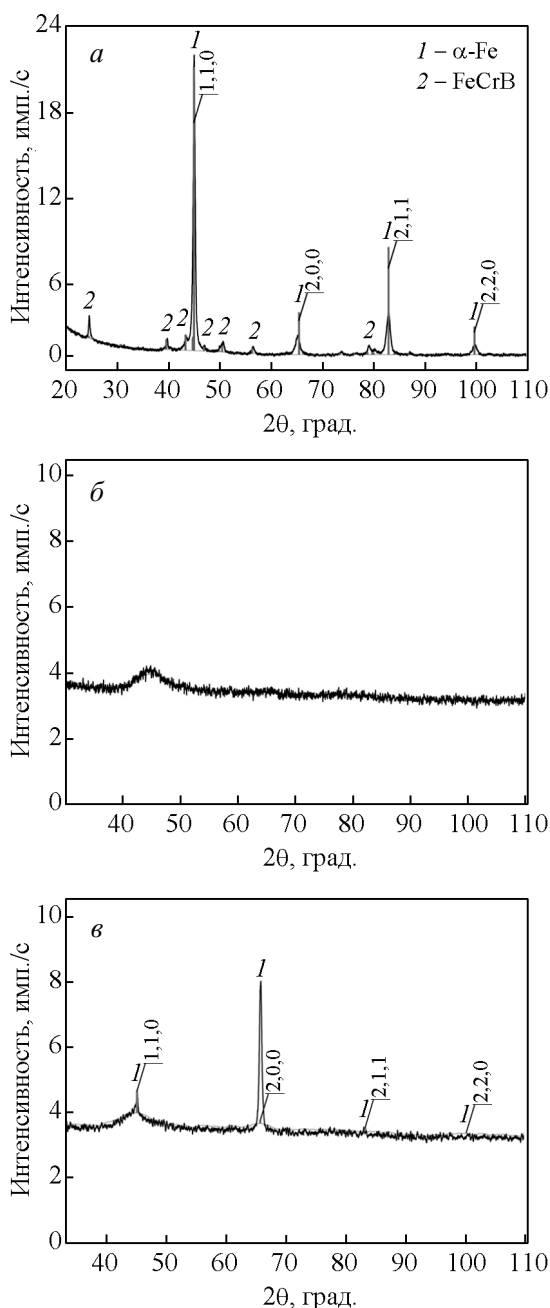


Рис. 1. Дифракционные спектры: *а* – исходный слиток состава Fe – 12 Cr – Si – В до спиннингования, *б* – “контактная” сторона ленты, *в* – “свободная” сторона ленты.

$2,8520 \pm 0,0002 \text{ \AA}$ и промежуточной фазы $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ с орторомбической структурой (рис. 1*а*).

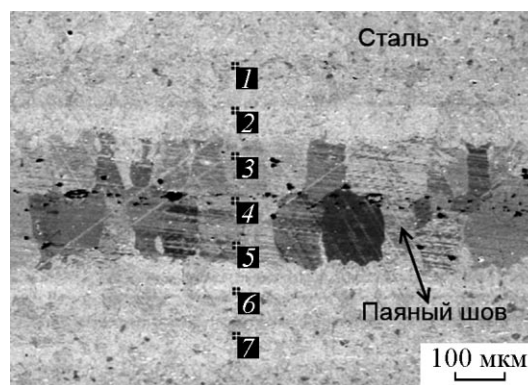
Ленточный сплав-припой аморфно-кристаллический (рис. 1*б, в*). Исследованы обе стороны ленты: “контактная” (непосредственно касается диска при литье) и “свободная” — противоположная сторона (не касается диска). Скорость закалки “контактной” стороны выше, чем “свободной”, поэтому вблизи “контактной” стороны преобладает аморфная структура. Вблизи “свободной” стороны присутствует твёрдый раствор Cr и Si в железе и некоторое количество аморфной фазы.

По результатам дифференциально-термического анализа сплава-припоя установлено, что припой плавится в интервале температур 1100 – 1180 °С.

На рис. 2 приведены микроструктуры паяных швов соединений ЭП-823/ЭП-823, полученных с помощью припоя Fe – 12 Cr – Si – В.

Величина диффузионной зоны при пайке составляет порядка 200 мкм при толщине припоя 40 – 45 мкм. Эта зона имеет ферритную, крупнозернистую структуру. По результатам микрорентгено-спектрального анализа паяного соединения выявлено, что эта зона обогащена по кремнию 1,6 масс. %.

При достижении температуры пайки и расплавлении припоя начинается активная диффузия бора и кремния из припоя в паяемую сталь. Так как кремний является сильным ферритостабилизирующим элементом, то в результате диффузии в околошовной



Точка	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	W
1	1,17	0,22	11,10	0,68	85,03	0,53	0,58	0,69
2	1,06	0,20	11,10	0,76	85,00	0,58	0,54	0,76
3	1,57	0,26	11,40	0,64	84,38	0,44	0,62	0,69
4	1,66	0,29	11,19	0,59	84,44	0,48	0,61	0,75
5	1,53	0,31	11,24	0,63	84,42	0,47	0,55	0,84
6	1,13	0,22	10,84	0,76	85,21	0,60	0,50	0,73
7	1,07	0,25	11,06	0,69	85,09	0,50	0,51	0,82

Рис. 2. Микрорентгеноспектральный анализ паяного соединения ЭП-823/ЭП-823, полученного с помощью припоя Fe – 12 Cr – Si – В.

Микротвёрдость исходной стали и паяного соединения

Пайка 1200 °С 20 минут				Исходная сталь до ТО
Центр шва. Ф область	50 мкм от центра шва. Ф область	100 мкм от центра шва. Ф-М область	Сталь после ТО	
2140 ± 50	2160 ± 70	4350 ± 110	4200 ± 120	2220 ± 150

зоне происходит ферритизация стали ЭП-823. Стоит отметить, что сталь перед использованием проходит штатную термообработку: нагрев до 1050 °С с нормализацией на воздухе и последующим отпуском при температуре 680 – 750 °С. После такой термообработки в стали присутствует небольшое количество α-фазы (δ-феррит) 5 – 10%, дисперсная карбидно-ферритная смесь (сорбитообразные структуры) и упрочняющие карбидные выделения. Для сохранения высокой жаропрочности наличие значительного количества выделений α-фазы в структуре стали нежелательно, так как α-фаза способствует снижению сопротивления ползучести, релаксации напряжений, уменьшает предел длительной прочности, усиливает способность стали к охрупчиванию при высокой температуре [10]. Ферритная структура в паяном шве и околошовной зоне исключает возможность проведения термической обработки, поэтому для восстановления способности к закалке в дальнейшем необходимо легировать припойную композицию аустенитостабилизирующими элементами (например С, Mn, Ni, N). При этом необходимо учитывать, что избыток С и N может привести к образованию хрупких вторых фаз в паяном шве. Введение Ni и Mn приведёт к ухудшению коррозионной стойкости. По предварительным испытаниям [11] установлено, что паяные соединения из стали ЭП-823, полученные с

помощью разработанного припоя обладают коррозионной стойкостью в свинце на уровне основного материала.

Результаты измерения микротвёрдости паяного соединения представлены в табл. 2. Зона, обогащённая кремнием, имеет твёрдость на уровне исходной стали до пайки. Однако сама сталь после пайки при 1200 °С 20 мин и охлаждения в печи упрочняется и имеет твёрдость в 2 раза большую, чем в исходном состоянии. Это связано с изменением структурно-фазового состояния стали при температуре пайки, а именно частичным растворением карбидов Nb, V, W и Mo. В результате чего происходит твёрдорастворное упрочнение и уменьшение пластичности стали. Предел прочности стали после термообработки по режиму пайки составляет 1000 ± 100 МПа, предел прочности исходной стали значительно меньше и равен 680 ± 40 МПа. Также сильно возрастает предел текучести и снижается пластичность стали после ТО по режиму пайки (табл. 3). Разрушение паяных соединений проходит по шву. Предел прочности соединения равен 750 ± 90 МПа при нулевой пластичности. Соединение имеет нулевую пластичность, потому что прочность паяного шва (750 МПа) ниже предела текучести стали после пайки (950 МПа). Изучение фрактографии паяного соединения показало, что разрушение проходит по границе зерна феррита по хрупкому механизму. На границе зерна

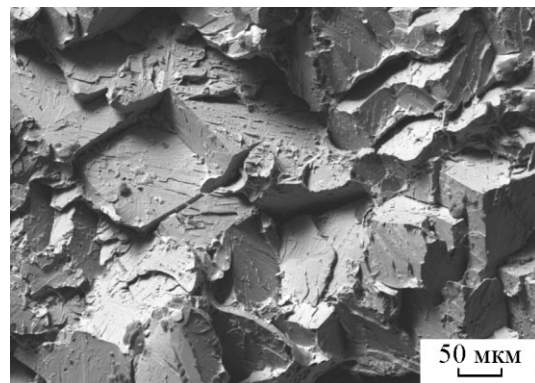
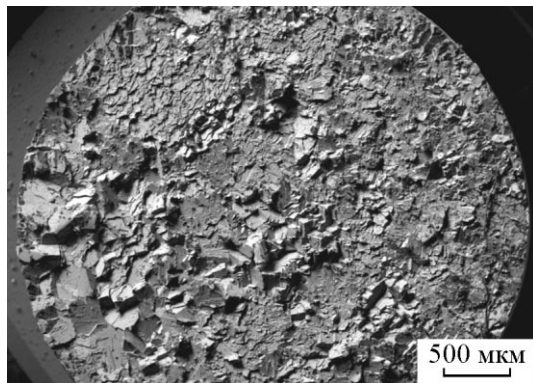


Рис. 3. Фрактография излома паяного соединения ЭП-823/ЭП-823, полученного с помощью припоя Fe – 12 Cr – Si – В при 1200 °С в течение 20 минут.

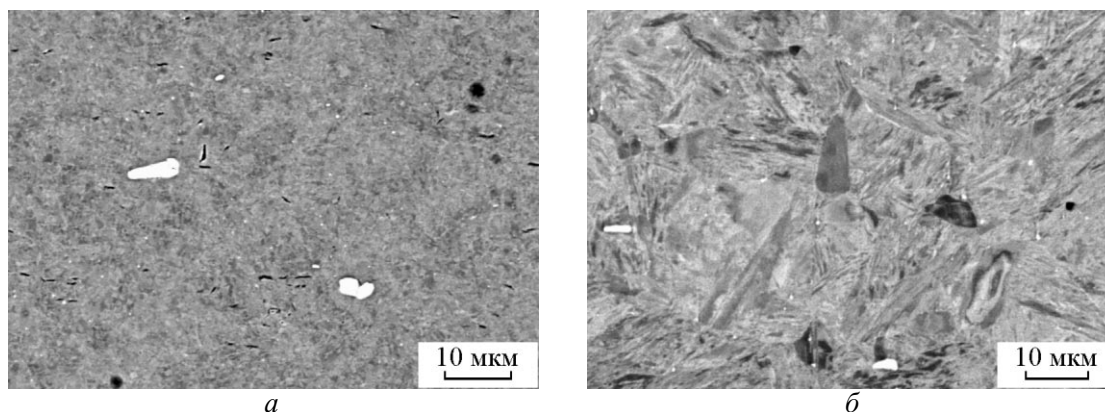


Рис. 4. Микроструктура стали ЭП-823: *а* – после штатной термообработки, *б* – после пайки при 1200 °С в течение 20 минут.

Таблица 3

Механические характеристики, полученные при испытании на одноосное растяжение, исходной стали ЭП-823, стали после отжига при 1200 °С 20 мин и паяного соединения ЭП-823/ЭП-823

Материал	Предел прочности, σ_B , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение, δ , %
Исходная сталь	680 ± 40	550 ± 60	$21,4 \pm 1,8$
Сталь после ТО (1200 °С, 20 мин)	1000 ± 100	950 ± 110	$14,3 \pm 1,3$
Паяное соединение ЭП-823/ЭП-823, полученное с помощью припоя Fe – 12 Cr – Si – В	750 ± 90	—	0

присутствует большое количество вторичных выделений, по-видимому боридов железа (рис. 3)

Металлографические исследования показали, что после пайки при температуре 1200 °С в течение 20 мин (на 100 – 150 °С выше температуры штатной нормализации) происходит интенсивный рост зерна (рис. 4).

Очевидно, что с целью уменьшения роста зерна необходимо проводить пайку при меньшей температуре, для чего можно ввести в систему припоя германий, который является эффективным депрессантом в железных сплавах. В системе железо – германий присутствует легкоплавкая эвтектика (1105 °С) при содержании германия 35 масс. % [8]. Кроме того, чтобы не изменять структурно-фазового состояния стали при пайке, можно использовать индукционную пайку с поддувом аргона и нормализацией стали на воздухе с дальнейшим отпуском при штатной температуре.

Выводы

Для высокотемпературной пайки ферритно-мартенситных сталей разработан быстрозакаленный ленточный сплав-припой на основе железа с интервалом плавления 1070 – 1150 °С. Отработана технология получения сплава в виде аморфно-кристаллической ленты толщиной 45 – 50 мкм, шириной 10 мм. Полученным припоем осуществлена вакуумная пайка стали ЭП-823. Выявлены основные закономерности формирования паяных швов соединения ЭП-823/ЭП-823. Соединение выдерживает высокие нагрузки: предел прочности при одноосном растяжении составляет 750 ± 90 МПа. Показана возможность применения быстрозакаленных ленточных припоев для пайки перспективных ферритно-мартенситных сталей. Намечены основные пути дальнейшей модификации припоя с целью уменьшения ферритизирующего воздействия припоя на паяемую сталь в околшовной зоне, а также для исключения влияния термообработки при пайке на структурно-фазовое состояние стали.

Литература

1. Громов Б.Ф., Орлов Ю.И., Мартынов П.Н., Гулевский В.А. Проблемы технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинец-висмут, свинец). Сб. докладов конференции “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях”. Обнинск, 1999, т. 1, с. 92 – 106.
2. Зеленский Г.К., Иолтуховский А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В. и др. Исследование коррозионной стойкости стальной оболочки твэла в свинцовом теплоносителе. Металловедение и термическая обработка металлов, 2007, № 11, с. 34 – 39.
3. Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Konobeev Yu.V. et al. Microstructure and mechanical properties of ferritic/

- martensitic steel EP-823 after neutron irradiation to high doses in bor-60. *Journal of nuclear materials*, 2004, issue 329 – 333, no. 1 – 3, Part A, p. 314 – 318.
4. Алёшин Н.П., Чернышёв Г.Г. Сварка. Резка. Контроль: справочник в 2 т. М.: Машиностроение, 2004, 478 с.
 5. Леонтьева-Смирнова М.В., Агафонов А.Н., Можанов Е.М. и др. Свариваемость жаропрочных 12%-ных хромистых сталей ЭК-181 и ЧС-139. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 4, с. 14 – 21.
 6. Калинин Б.А., Плющев А.Н., Федотов В.Т. Влияние структурного состояния припоя на физико-механические свойства паяных соединений. Сварочное производство, 2001, № 8, с. 38 – 41.
 7. Rabinkin A. High-temperature brazing: filler metals and processing. *Advances in Brazing*, 2013, p. 121 – 159.
 8. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник: В 3 т. М.: Машиностроение, 1996, 992 с.
 9. Сучков А.Н., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Калинин Б.А., Иванников А.А. Быстрозакалённые ленточные аморфные припои для высокотемпературной пайки сплавов на основе ниобия. Сварочное производство, 2010, № 5, с. 47 – 51.
 10. Калинин Б.А., Платонов П.А., Тузов Ю.В. и др. Физическое материаловедение. Т. 6. Конструкционные материалы ядерной техники. М.: НИЯУ МИФИ, 2012, 736 с.
 11. Иванников А.А., Сучков А.Н., Калинин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Логвенчев И.С. Разработка быстрозакалённых сплавов-припоев на основе железа для пайки реакторных ферритно-мартенситных сталей. Сборник трудов научной сессии МИФИ-2014, т. 1, с. 25.
- of corrosion resistance of steel fuel rod in lead coolant]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov — Metal science and heat treatment*, 2007, no. 11, pp. 34 – 39.
3. Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Konobeev Yu.V. et al. Microstructure and mechanical properties of ferritic/martensitic steel EP-823 after neutron irradiation to high doses in bor-60. *Journal of nuclear materials*, 2004, issue 329 – 333, no. 1 – 3, part A, pp. 314 – 318.
 4. Alyoshin N.P., Chernyshyov G.G. *Svarka. Rezka. Kontrol: spravochnik v 2 t.* [Welding. Cutting. Monitoring: Manual]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2004, 478 p.
 5. Leontyeva-Smirnova M.V., Agafonov A.N., Mozhanov Ye.M. et al. Svarivayemost zharoprochnykh 12%-nykh khromistykh staley EK-181 i ChS-139 [Welding of EK-181 and ChS-139 types chromium steel]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyi Sintez — Problems of atomic science and technology. Ser. Theronuclear Synthesis*, 2011, iss. 4, pp. 14 – 21.
 6. Kalin B.A., Plyushchev A.N., Fedotov V.T. Vliyaniye strukturnogo sostoyaniya pripoya na fiziko-mekhanicheskiye svoystva payanykh soyedineniy [Effect of solder structural state on physical and mechanical properties of solder joints]. *Svarochnoye proizvodstvo — Welding International*, 2001, no. 8, pp. 38 – 41.
 7. Rabinkin A. High-temperature brazing: filler metals and processing. *Advances in Brazing*, 2013, p. 121 – 159.
 8. Lyakishev N.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskiykh sistem. Spravochnik: v 3 t.* [Binary diagrams of metal systems. Manual]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1996, 992 p.
 9. Suchkov A.N., Fedotov V.T., Sevryukov O.N., Kalin B.A., Ivannikov A.A. Bystrozakalyonnye lentochnye amorfnye pripoi dlya vysokotemperaturnoy payki spлавov na osnove niobiya [Rapidly quenched amorphous strip solders for brazing of niobium alloys]. *Svarochnoye proizvodstvo — Welding International*, 2010, no. 5, pp. 47 – 51.
 10. Kalin B.A., Platonov P.A., Tuzov Yu.V. Physical material science. Vol. 6 Structural materials of nuclear engineering. Moscow, MEPhI Publ., 2012, 736 p.
 11. Ivannikov A.A., Suchkov A.N., Kalin B.A., Fedotov V.T., Sevryukov O.N., Logvenchev I.S. Razrabotka bystrozakalyonnykh spлавov-priпoyev na osnove zheleza dlya payki reaktornykh ferritno-martensitnykh staley [Development of rapidly quenched iron-based solders for brazing of reactor ferritic-martensitic steels]. *Proc. of scientific works of MEPhI-2014. Vol. 1*, p. 25.

References

Статья поступила в редакцию 2.04.2014 г.

Иванников Александр Александрович — Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (г. Москва), аспирант, инженер, специалист в области физико-химического анализа и получения аморфных и нанокристаллических сплавов E-mail: ivannikov7@rambler.ru.

Тарасов Борис Александрович — Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (г. Москва), аспирант, инженер, специалист в области физики конденсированного состояния. E-mail: ulens.ur@gmail.com.

Логвенчев Иван Сергеевич — Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (г. Москва), аспирант, инженер, специалист в области физико-химического анализа и получения аморфных и нанокристаллических сплавов. E-mail: 2werty@bk.ru.

Севрюков Олег Николаевич — Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (г. Москва), кандидат технических наук, доцент, специалист в области физико-химического анализа и получения аморфных и нанокристаллических сплавов. E-mail: sevr54@mail.ru.

Федотов Владимир Тимофеевич — Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (г. Москва), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физико-химического анализа и получения аморфных и нанокристаллических сплавов.

Сучков Алексей Николаевич — Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (г. Москва), кандидат технических наук, доцент, специалист в области совместимости и коррозии материалов. E-mail: ansuchkov221283@mail.ru.

Федотов Иван Владимирович — Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (г. Москва), аспирант, инженер, специалист в области физико-химического анализа и получения аморфных и нанокристаллических сплавов. E-mail: fed_ivan@mail.ru.

Жариков Евгений Сергеевич — Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (г. Москва), аспирант, инженер, специалист в области рентгеновской дифрактометрии. E-mail: evgeniy.zharikov@gmail.com.

Brazing of reactor ferritic-martensitic EP-823 type steel with rapidly quenched iron-base filler metals

**A. A. Ivannikov, B. A. Tarasov, O. N. Sevryukov, V. T. Fedotov,
A. N. Suchkov, I. S. Logvenchev, I. V. Fedotov, E. S. Zharikov**

Filler metal of Fe – 12 Cr – Si – B system for brazing reactor ferritic-martensitic steel EP-823 was developed. The brazing parameters and production technology of the developed filler metal as rapidly quenched ribbon-type were investigated. The metallographic and X-ray analyses of brazed joints were conducted. The basic laws of structural-phase state formation of brazed joints were determined. Benefits of applying brazing to join the hardly welded steel EP-823 were shown.

Key words: brazing, filler metal, iron, iron-based alloy, amorphous, rapid quenching, fast neutron reactor.

Ivannikov Alexander — National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow), postgraduate, engineer. E-mail: ivannikov7@rambler.ru

Tarasov Boris — National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow), postgraduate, engineer. E-mail: ulens.up@gmail.com,

Logvenchev Ivan — National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow), postgraduate, engineer. E-mail: 2werty@bk.ru

Sevrjukov Oleg — National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow), Ph.D. E-mail: sevr54@mail.ru

Fedotov Vladimir — National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow), Ph.D.

Suchkov Alexander — National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow), Ph.D. E-mail: ansuchkov221283@mail.ru

Fedotov Ivan — National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow), postgraduate, engineer. E-mail: fed_ivan@mail.ru.

Zharikov Evgeny — National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow), postgraduate, engineer. E-mail: evgeniy.zharikov@gmail.com.