

УДК 621.039.548.34

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.14>*Оригинальная статья / Original paper*

Влияние термической обработки на сварные соединения сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш

А.В. Понимаш, Р.Х. Гибадуллин, Д.В. Кудашов, Ю.А. Орлов, А.М. Дворяшин, О.А. Плаксин

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Реферат. Методом ручной аргонодуговой сварки с использованием присадочной проволоки св-03Х14Н8СЗБУ изготовлены разнородные сварные соединения ферритно-мартенситной стали ЭП823-Ш и аустенитной стали ЭП302М-Ш, являющихся кандидатными конструкционными материалами для реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. В результате проведения технологических и материаловедческих исследований показана возможность получения сварных соединений с аустенитно-ферритной структурой сварных швов, предпочтительной в отношении стойкости используемых сталей к образованию кристаллизационных горячих трещин при сварке. В процессе сварки обеспечивается сохранение кремния и хрома в сварном шве, что является благоприятным фактором для обеспечения коррозионной стойкости сварных соединений в тяжелых жидкометаллических теплоносителях. Для термообработки сварных соединений стали ЭП823-Ш со сталью ЭП302М-Ш предложена комбинация термического отдыха, обеспечивающего смягчение мартенситного превращения, с последующей ступенчатой термообработкой. Предложенная комбинация является альтернативой термообработке по штатному режиму высокого отпуска стали ЭП823-Ш при создании устойчивых к образованию трещин и хрупкому разрушению сварных соединений с использованием этой стали.

Ключевые слова: конструкционные стали, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, сварные соединения, термическая обработка, микроструктура.

Для цитирования: Понимаш А.В., Гибадуллин Р.Х., Кудашов Д.В., Орлов Ю.А., Дворяшин А.М., Плаксин О.А. Влияние термической обработки на сварные соединения сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2026;2:213–223. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.14>

Введение

Сталь феррито-мартенситного класса ЭП823-Ш и сталь аустенитного класса ЭП302М-Ш являются конструкционными материалами разрабатываемых реакторных установок с тяжелым металлическим теплоносителем. В конструкциях таких реакторов

© Понимаш А.В., Гибадуллин Р.Х., Кудашов Д.В., Орлов Ю.А., Дворяшин А.М., Плаксин О.А., 2026

предполагается использовать однородные и разнородные сварные соединения из этих сталей. Получаемые швы должны быть прочными, герметичными, коррозионно и эрозионно стойкими, выдерживать вибрационные и ударные нагрузки, сохранять работоспособность после термоциклирования в процессе монтажа и эксплуатации. Создание разнородных сварных соединений этих сталей является сложной задачей вследствие различий фазового состояния, элементного состава и структуры свариваемых материалов.

Феррито-мартенситная сталь ЭП823-Ш при сварке склонна к подкалке с возможностью образования холодных трещин в шве и околшовной зоне [1]. Для предотвращения образования трещин и хрупкого разрушения сварных соединений сталей этого класса применяют термическую обработку с целью смягчить закалочные структуры в сварных швах без нарушения эксплуатационных характеристик основных материалов. Выбор термообработки проводят в зависимости от толщины свариваемых деталей, конструктивных особенностей и условий эксплуатации изделия. Соответственно, применяют подогрев деталей перед сваркой, термический отдых и отпуск сварных соединений, а также лимитируют время между окончанием сварки соединения и началом термообработки. На практике термообработку однородных сварных соединений стали ЭП823-Ш проводят при температуре отпуска 710 – 740°C, что позволяет снизить остаточные напряжения и смягчить закалочные структуры в шве и околшовной зоне до состояний, близких к состоянию основного металла. При создании однородных соединений для стали ЭП823-Ш используют присадочную проволоку св-04Х19Н11М3 по ГОСТ 2246-70.

Аустенитная сталь ЭП302М-Ш содержит α -фазу (феррит) в пределах объемной доли 2 – 5%. Присутствие такого количества α -фазы в структуре стали препятствует образованию трещин при сварке. Сталь ЭП302М-Ш хорошо сваривается в однородном соединении как без применения присадочной проволоки, так и с применением присадочной проволоки св-04Х19Н11М3 и специально созданной для сварки этой стали проволоки св-03Х14Н8СЗБУ.

В разнородных сварных соединениях сталей разных структурных классов в состоянии после сварки присутствуют остаточные механические напряжения, характеризующиеся плавным переходом от преимущественно растягивающих напряжений в аустенитной структуре к преимущественно сжимающим в феррито-мартенситной структуре [2]. Нагрев и выдержка таких соединений при температуре отпуска приводит к релаксации остаточных напряжений, но последующее охлаждение приводит к возникновению напряжений, обусловленных различием коэффициентов линейного расширения разнородных сталей. При этом напряжения скачкообразно изменяются от растягивающих к сжимающим в поперечном направлении к линии сплавления, что ухудшает работоспособность сварного соединения по границе сплавления. Повышение температуры отпуска способствует увеличению размаха напряжений после охлаждения. Однако наличие малопластичной, твердой мартенситной прослойки является более опасным, чем скачкообразное распределение напряжений в пластичном металле после отпуска. Аустенитная сталь ЭП302М-Ш обладает большей пластичностью (имеет меньшие значения пределов прочности, текучести и более высокие значения относительного удлинения), чем сталь ЭП823-Ш во всем диапазоне рабочих температур [3]. При формировании сварного шва с аустенитной структурой, близкой к ЭП302М-Ш, такое соотношение механических свойств свариваемых сталей

ЭП302М-Ш и ЭП823-Ш способствует релаксации остаточных механических напряжений без разрушения подкаленного металла околошовной зоны со стороны стали ЭП823-Ш.

В нормативных документах отсутствуют рекомендации по использованию присадочных проволок при создании разнородных сварных соединений сталей ЭП302М-Ш и ЭП823-Ш. Возможность создания таких сварных соединений способом ручной аргонодуговой сварки с использованием аустенитной сварочной проволоки св-04Х19Н11М3 была продемонстрирована в работе [4]. Были получены сварные швы с аустенитно-ферритной структурой, устойчивой к образованию горячих трещин при сварке. Было установлено, что структура шва формируется, в основном, за счет материала сварочной проволоки, а вовлечение основного металла сталей минимально. Было показано, что изменение концентрации элементов происходит плавно при переходе от основного металла сталей к металлу шва. Для снятия закалочных структур применяли термообработку в режиме высокого отпуска, регламентированного для стали типа ЭП823-Ш [2]. Однако в некоторых случаях конструкция изделий или особенности процесса их изготовления не позволяют проводить термообработку по штатному режиму. В таких случаях требуется альтернативный метод, не уступающий по эффективности высокому отпуску. Настоящая работа посвящена созданию разнородных сварных соединений сталей ЭП302М-Ш и ЭП823-Ш с использованием аустенитной сварочной проволоки св-03Х14Н8СЗБУ, рекомендованной для стали ЭП302М-Ш, с целью совершенствования способов термической обработки сварных соединений этих сталей.

Материалы и методы

Для изготовления сварных соединений использовали трубы $\varnothing 18 \times 3$ мм из сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш, элементный состав которых представлен в табл. 1.

Сварку выполняли ручным аргонодуговым способом неплавящимся вольфрамовым электродом с применением присадочной проволоки $\varnothing 1,2$ мм марки св-03Х14Н8СЗБУ, элементный состав которой представлен в табл. 2. Для сравнения в табл. 3 представлен элементный состав присадочной проволоки св-04Х19Н11М3, использованной в предыдущей работе [4]. Разделку кромок под сварку проводили по аналогии с типом С-23-2 нормативного документа НП-104-18. Присадочную проволоку применяли как при сварке корневого слоя (первый проход), так и окончательном заполнении разделки.

Таблица 1

Элементный состав сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш (согласно ТУ 14-1-925-74 и ТУ 14-161-242-2012 соответственно)

Сталь	Массовая доля элемента, % масс.									
	C	Si	Cr	Mn	Ni	Mo	W	V	Nb	Остальные примеси
ЭП823-Ш	0,15–0,18	1,0–1,3	11,3–12,0	0,6–0,8	0,6–0,8	0,7–0,9	0,6–0,8	0,25–0,4	0,25–0,4	≤ 0,43
ЭП302М-Ш	≤ 0,03	1,0–1,9	17,5–18,5	1,3–1,8	13,5–14,5	2,2–2,7	0,1–0,2	0,1–0,05	0,1–0,05	≤ 0,27

Таблица 2

**Элементный состав проволоки св-03Х14Н8СЗБУ
согласно ТУ 2730.09.032-2012**

Массовая доля элемента, % масс.							
C	Si	Cr	Mn	Ni	Nb	S	P
0,028	2,4	13,72	1,8	8,1	0,3	0,010	0,024

Таблица 3

**Элементный состав проволоки св-04Х19Н11МЗ
согласно ГОСТ 2246-70**

Массовая доля элемента, % масс.							
C	Si	Cr	Mn	Ni	Mo	S	P
≤ 0,06	≤ 0,6	18–20	1–2	10–12	2–3	≤ 0,018	≤ 0,025

После сварки проводили термообработку сварных соединений в вакуумных или сушильных электропечах по следующим режимам:

- высокий отпуск с выдержкой в течение одного часа при $720 \pm 20^\circ\text{C}$ и последующее охлаждение с печью;
- термический отдых с выдержкой в течение двух часов при 180°C и последующее охлаждение на воздухе при соблюдении следующего условия для смягчения протекания мартенситного превращения: в интервале между сваркой и началом отдыха температура образца не падала ниже 200°C ;
- ступенчатый режим термообработки – нагрев со скоростью $150^\circ\text{C}/\text{час}$ до $380 \pm 20^\circ\text{C}$, выдержка два часа, нагрев до $540 \pm 20^\circ\text{C}$, выдержка два часа, нагрев до $620 \pm 20^\circ\text{C}$, выдержка два часа, охлаждение с печью.

Высокий отпуск с указанными параметрами является заключительной частью регламентированного режима термообработки прутков и труб из стали ЭП823-Ш заводского изготовления. Комбинацию термического отдыха со ступенчатым режимом термообработки в настоящей работе рассматривали в качестве альтернативы высокому отпуску в случае, если не допускается проведение высокого отпуска сварных соединений.

Для исследований были подготовлены четыре продольных шлифа сварных соединений стали ЭП823-Ш со сталью ЭП302М-Ш, один из которых не подвергали термообработке, один подвергался высокому отпуску, один – термическому отдыху и один – термическому отдыху с последующей термической обработкой по ступенчатому режиму. Шлифовку и полировку образцов проводили на станке MECAPOL 230 с помощью абразивных материалов разной зернистости. Микроструктуру материала шва выявляли при химическом травлении в растворе 1 часть HCl + 1,5 части HNO₃ + 1 часть H₂O₂.

Исследование микроструктуры сварных соединений проводили на полученных шлифах с помощью металлографического микроскопа OLYMPUS GX-71. Эффективность термообработки оценивали по величине микротвердости, которую измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3 по Викерсу (постоянная нагрузка 0,1 кг). Исследования элементного состава проводили методами сканирующей электронной микроскопии

(СЭМ) и локального микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на сканирующем электронном микроскопе SEM4000 с полевой эмиссионной электронной пушкой Шоттки.

Результаты и обсуждение

Микроструктура сварного соединения, прошедшего термический отдых и термообработку по ступенчатому режиму, представлена на рис. 1. В результате металлографических исследований в этом образце, также как в образце сварного соединения, не подвергавшегося термообработке, и двух других образцах, прошедших термообработку по режимам высокого отпуска и термического отдыха соответственно, не обнаружены дефекты сплошности в виде трещин, пор, свищей, раковин, неметаллических включений и непроваров.

Результаты измерений микротвердости в сварных швах, околошовных зонах (ОШЗ) и основного металла свариваемых сталей, представлены в табл. 4.

Участки, на которых проводили измерения микротвердости, указаны на рис. 2.

Видно, что во всех исследованных образцах сварных соединений микротвердость в околошовной зоне со стороны стали ЭП302М-Ш почти не отличается от микротвердости основного металла свариваемой стали ЭП302М-Ш, и термическая обработка по всем использованным

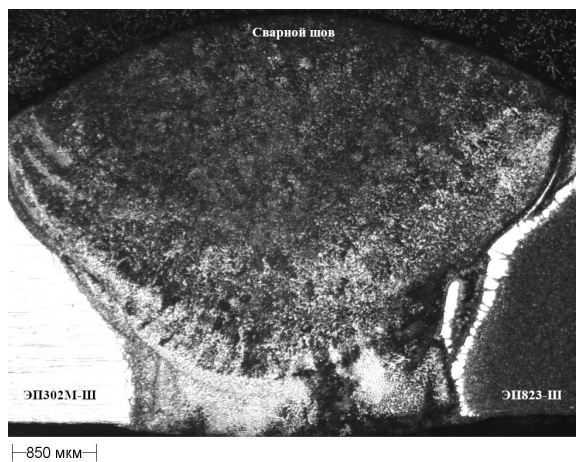


Рис. 1. Микроструктура сварного соединения сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш после термического отдыха и термообработки по ступенчатому режиму

Таблица 4

Микротвердость HV100 в образцах сварных соединений

Участок измерения микротвердости	HV ₁₀₀ образца без термообработки, кгс/мм ²	HNV ₁₀₀ образца после высокого отпуска, кгс/мм ²	HV ₁₀₀ образца после термического отдыха, кгс/мм ²	HV ₁₀₀ образца после термического отдыха и термообработки по ступенчатому режиму, кгс/мм ²
Основной металл ЭП823-Ш	237 – 288	176 – 193	186 – 215	189 – 201
ОШЗ со стороны ЭП823-Ш				
ЭП823-Ш	344 – 455	233 – 302	254 – 363	215 – 302
Металл шва	193 – 302	162 – 249	171 – 268	165 – 224
ОШЗ со стороны ЭП302М-Ш	159 – 193	159 – 165	168 – 179	168 – 197
Основной металл ЭП302М-Ш	165 – 171	159 – 182	171 – 176	179 – 189

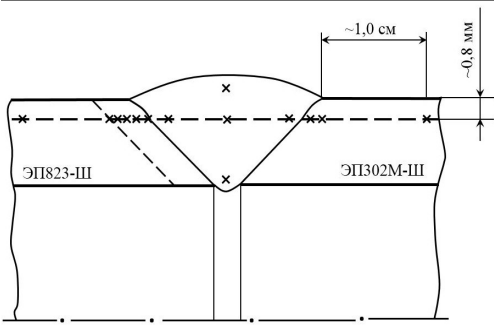


Рис. 2. Схема измерения микротвердости (области микроиндентирования показаны символами «x»)

режимам не привела к изменению микротвердости в околошовной зоне и основном металле стали ЭП302М-Ш. Максимальная микротвердость реализуется в околошовных зонах со стороны стали ЭП823-Ш. Такие же особенности наблюдали в предыдущем исследовании [4] по созданию сварных соединений сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш с использованием присадочной проволоки св-04Х19Н11М3. Высокий отпуск приводит к почти одинаковым снижениям микротвердости в околошов-

ной зоне при использовании присадочных проволок св-04Х19Н11М3 и св-03Х14Н8С3БУ. Комбинация термического отжига и ступенчатой термообработки приводит к такому же снижению микротвердости в околошовной зоне и основном металле стали ЭП823-Ш, как и после высокого отпуска. Таким образом, использованная комбинация термического отжига и ступенчатой термообработки является приемлемой альтернативой высокому отпуску при создании устойчивых к образованию трещин и хрупкому разрушению разнородных сварных соединений сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш. При этом интервал времени после термического отжига до ступенчатой термообработки не лимитируется при условии охлаждения не ниже +5°C.

Области исследований элементного состава методами СЭМ и МРСА в образце сварного соединения, прошедшего термический отжиг и термообработку по ступенчатому режиму, показаны на рис. 3. Результаты исследований элементного состава в этих областях представлены в табл. 5.

В таблице 6 представлены результаты исследований элементного состава сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш на расстоянии около 1 см от краев сварного шва. Элементный

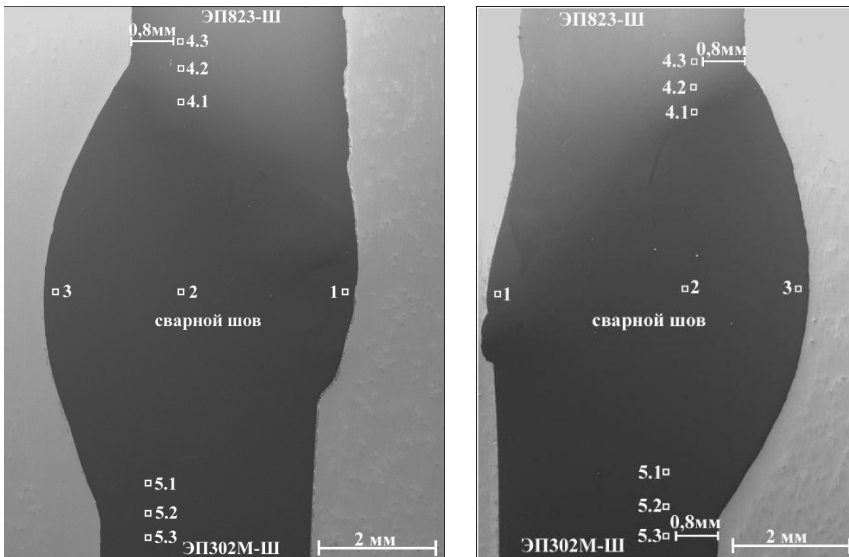


Рис. 3. Фрагменты сварного соединения сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш после термического отжига и термообработки по ступенчатому режиму с выделенными участками локального микроанализа

Таблица 5

Элементный состав участков сварного соединения

Элемент	Массовая доля, % масс.				
	участок 1	участок 2	участок 3	участок 4	участок 5
Fe	72,1 – 75,9	72,8 – 73,2	72,3 – 73,2	73,4 – 85,0	62,2 – 67,2
Si	1,7 – 1,9	2,2 – 2,3	2,0 – 2,3	1,1 – 2,1	1,5 – 1,9
Cr	14,4 – 15,0	14,7 – 14,8	14,7 – 14,9	11,6 – 14,8	16,9 – 18,8
Mn	1,5 – 1,7	1,7 – 1,8	1,7 – 1,9	0,6 – 0,9	1,6 – 1,9
Ni	6,5 – 8,1	8,2 – 8,4	8,1 – 8,2	0,6 – 2,2	11,0 – 13,7
Mo	0,6 – 0,7	–	0,2 – 0,4	0,4 – 0,7	1,3 – 2,3
W	–	–	–	0,6 – 0,8	–
V	0,1 – 0,2	–	–	0,3 – 0,4	–
Nb	0,2	–	0,3	0,1	–

состав стали ЭП823-Ш соответствует требованиям ТУ 14-1-925-74. Для стали ЭП302М-Ш отмечено незначительное снижение концентрации никеля и молибдена, а также повышение массовой доли хрома по сравнению с элементным составом по ТУ 14-161-242-2012 (см. табл. 1).

Распределение элементов в центральной области сварного шва (участки 1 – 3 в табл. 5) почти равномерное, элементный состав близок к составу материала проволоки св-04Х19Н11М3. Это указывает на незначительное вовлечение основного металла сталей в образование центральной области сварного шва. Элементный состав на участках 4 и 5 приближается к элементному составу сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш

соответственно и указывает на то, что атомы кремния диффундируют из сварного шва в свариваемые стали, а атомы хрома и никеля диффундируют из стали ЭП302М-Ш в сварной шов. Для сравнения распределений элементов в сварных швах, выполненных с использованием присадочных проволок св-03Х14Н8СЗБУ и св-04Х19Н11М3; на рис. 4 и 5 представлены соответствующие гистограммы.

Для анализа фазового состава сварных швов использовали структурную диаграмму Шеффлера [5], представленную на рис. 6.

Диаграмма содержит области устойчивости аустенита (А), феррита (F) и мартенсита (М). Элементы, способствующие образованию феррита, включены в эквивалент хрома Cr_{eq} , а элементы, способствующие образованию аустенита, включены в эквивалент никеля Ni_{eq} . Критерий Cr_{eq} определяется суммой массовых долей $\%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb$, критерий Ni_{eq} – суммой массовых долей $\%Ni + 30 \cdot \%C + 0,5 \cdot \%Mn$. На диаграмму

Таблица 6

Элементный состав свариваемых сталей на расстоянии около 1 см от сварного шва

Элемент	Массовая доля, % масс.	
	сталь ЭП823-Ш	сталь ЭП302М-Ш
Fe	83,7 – 85,5	62,1 – 62,8
Si	1,1 – 1,2	1,5 – 1,6
Cr	11,7 – 11,9	18,6 – 18,7
Mn	0,7 – 0,8	1,7 – 1,8
Ni	0,5 – 0,8	13,4 – 13,6
Mo	0,4 – 0,6	2,1 – 2,4
W	0,7 – 1,1	–
V	0,3 – 0,4	–

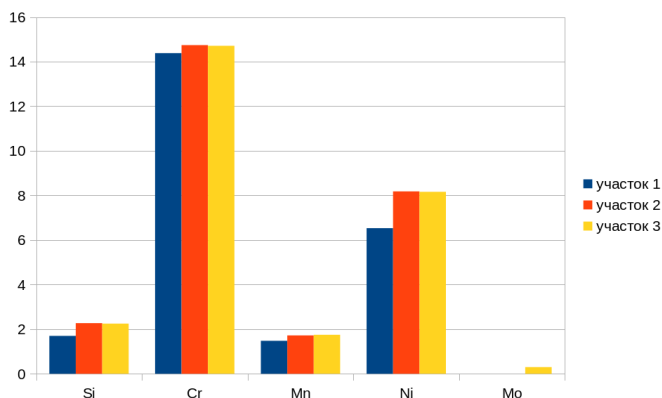


Рис. 4. Распределение элементов в сварном шве, выполненного с присадочной проволокой св-03X14H8C3БУ, после термического отжига и ступенчатой термообработки

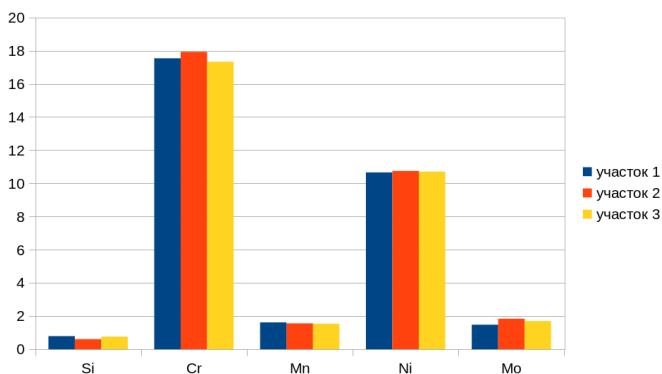


Рис. 5. Распределение элементов в сварном шве, выполненного с присадочной проволокой св-04X19H11M3, после высокого отпуска

нанесены точки, соответствующие фазовому состоянию сварных швов, полученных с использованием присадочных проволок св-03X14H8C3БУ и св-04X19H11M3. Расчет критериев Cr_{eq} и Ni_{eq} проведен по средним значениям массовых долей элементов, измеренных методом МРСА на участках 1 – 3 сварных швов. Оценка фазового состава показывает, что сварные швы имеют аустенитно-ферритную структуру с объемным содержанием феррита в диапазоне 4 – 6%, что соответствует выполнению требования стойкости к образованию горячих трещин в сварном шве и благоприятно сказывается на дальнейшей эксплуатации сварного соединения.

Заключение

В результате проведенных технологических и материаловедческих исследований при изготовлении сварных соединений стали ЭП302М-Ш со сталью ЭП823-Ш получены следующие результаты.

1. Продемонстрирована возможность получения сварных соединений стали ЭП302М-Ш со сталью ЭП823-Ш с использованием присадочной проволоки

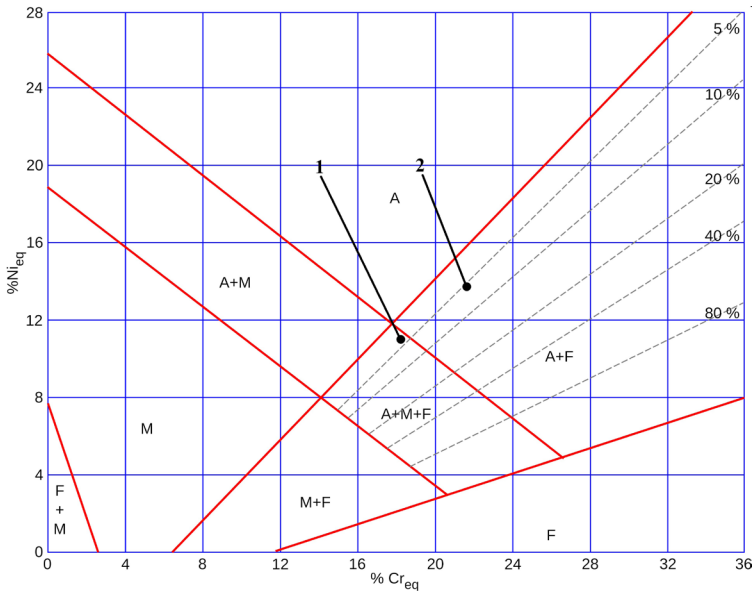


Рис. 6. Структурное состояние сварного шва, созданного с использованием проволоки св-04Х19Н11М3, после высокого отпуска (2) и сварного шва, созданного с использованием проволоки св-03Х14Н8С3БУ, после термического отжига и ступенчатой термообработки (1)

св-03Х14Н8С3БУ (наряду с использованием присадочной проволоки св-04Х19Н11М3), удовлетворяющих требованиям нормативных документов. Структура сварного шва формируется, в основном, за счет материала присадочной проволоки и имеет элементный состав, соответствующий аустенитно-ферритной структуре с объемным содержанием феррита в диапазоне 4 – 6 , являющейся предпочтительной в отношении стойкости используемых сталей к образованию кристаллизационных горячих трещин при сварке.

2. При наличии ограничений, связанных с конструкцией или процессом изготовления изделий, предложенная комбинация термического отжига, обеспечивающего смягчение мартенситного превращения, с последующей ступенчатой термообработкой разнородных сварных соединений сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш является приемлемой альтернативой высокому отпуску при создании устойчивых к образованию трещин и хрупкому разрушению разнородных сварных соединений этих сталей.

3. Обеспечивается сохранение кремния и хрома в сварном шве, что является благоприятным фактором для обеспечения коррозионной стойкости в тяжелых жидкометаллических теплоносителях при температурах выше 500°С.

Литература

1. Ланская К.А. Высокохромистые жаропрочные стали. Москва, Металлургия, 1976, 216 с.
2. Закс И.А. Сварка разнородных сталей. Москва, Машиностроение, 1973, 208 с.
3. Бобков В.П., Блохин А.И., Румянцев В.Н., Соловьев В.А., Тарасиков В.П. Свойства реакторных сталей и сплавов. В кн. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Том 5 (под общей редакцией В.М. Поплавского). Москва, ИздАТ, 2014, 584 с.

4. Сельцова Д.В., Понимаш А.В., Орлов Ю.А. Результаты материаловедческих исследований сварного шва труб из сталей ЭП823-Ш и ЭП302М-Ш. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2025;3:123-134. EDN: TXJAVN.

5. Липпольд Д. Котеки Д. *Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей* (пер. с англ.). Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та, 2011, 467 с. DOI: 10.18720/SPBPU/2/si20-90

Поступила в редакцию 19.02.2026

После доработки 27.04.2026

Принята к опубликованию 12.05.2026

Авторы

Понимаш Алексей Владимирович, инженер,

E-mail: avponimash@ippe.ru

Гибадуллин Раис Хайбуллович, руководитель направления по сварке,

Кудашов Денис Владимирович, руководитель направления по пайке,

Орлов Юрий Александрович, научный сотрудник,

Дворяшин Александр Михайлович, старший научный сотрудник,

Плаксин Олег Анатольевич, главный специалист по науке по направлению активных зон, д.ф.-м.н.,

E-mail: plaksin@ippe.ru

UDC 621.039.548.34

Effects of Thermal Treatment on Welding Joints of EP823-Sh and EP302M-Sh Steels

Ponimash A.V., Gibadullin R.H., Kudashov D.V., Orlov Yu.A., Dvoriashin A.M., Plaksin O.A.

IPPE JSC,

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

Dissimilar welded joints between the ferritic-martensitic steel EP823-Sh and the austenitic steel EP302M-Sh, both are candidate structural materials for reactors with heavy liquid metal coolant, have been fabricated by manual argon arc welding using Sv-03Kh14N8S3BU filler wire. As a result of technological experiments and materials structure investigations, it has been shown a possibility of fabrication of welds with the austenitic-ferritic microstructure, which is favorable for preventing hot cracking formation during welding. After welding, silicon and chromium, necessary elements for corrosion resistance of the welded joints in liquid heavy metal coolants, remain in the weld metal. A combination of low-temperature tempering, which softens martensitic transformation, with subsequent step annealing treatment has been proposed for post weld heat treatment of welded joints of EP823-Sh and EP302M-Sh steels. The combined heat treatment provides an alternative to the conventional high-temperature tempering of EP823-Sh steel, with is used tin production of crack-resistant and brittle-fracture resistant welded joints of EP823-Sh steel.

Keywords: structural steels, heavy liquid metal coolant, welded joints, thermal treatment, microstructure.

For citation: Ponimash A.V., Gibadullin R.H., Kudashov D.V., Orlov Yu.A., Dvoriashin A.M., Plaksin O.A. Effects of Thermal Treatment on Welding Joints of EP823-Sh and EP302M-Sh Steels. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;2:213–223. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.14> (in Russian).

References

1. Lanskaya K.A. High-chromium heat-resistant steels. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 216 p. (in Russian).
2. Zaks I.A. Welding of Dissimilar Steels. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 208 p. (in Russian).
3. Bobkov V.P., Blokhin A.I., Rumyantsev V.N., Solov'ev V.A., Tarasikov V.P. Properties of reactor steels and alloys. In Handbook of material properties for advanced reactor technologies. Vol. 5 (edit. Poplavskii V.M.). Moscow, Izdat Publ, 2014, 584 p. (in Russian).
4. Seltsova D.V., Ponimash A.V., Orlov Yu.A. Results of studies of materials science research of the weld of EP823-Sh and EP302M-Sh steels. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2025;3:123–134. EDN: TXJAVN (in Russian).
5. Lippold J.C., Kotecki D.J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels. Hoboken (N.J.), Wiley-Interscience, cop. 2005, 357 p.

Authors

Aleksey V. Ponimash, engineer,

E-mail: avponimash@ippe.ru

Rais H. Gibadullin, section head

Denis V. Kudashov, section head

Yuri A. Orlov, research scientist

Aleksandr M. Dvoriashin, senior researcher

Oleg A. Plaksin, Chief Specialist on Science, Doc. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: plaksin@ippe.ru