

ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТНОЙ СВАРКИ УЗЛОВ КОТЛОАГРЕГАТОВ БЕЗ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

А. К. ЦАРИЮК, канд. техн. наук, **В. Д. ИВАНЕНКО**, инж., **В. Ю. СКУЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук,
С. И. МОРАВЕЦКИЙ, **А. Р. ГАВРИК**, **Г. Н. СТРИЖИУС**, **М. А. НИМКО**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
С. И. МАЗУР, **А. А. ТРОЙНЯК**, инженеры (Трипольская ТЭС, г. Украинка),
Ю. В. ОДИН, **О. В. ДЕРКАЧ**, инженеры (Кременчугская ТЭЦ, г. Кременчуг),
Р. И. КУРАН, инж. (ОАО «ЮТЭМ», г. Буча)

Рассмотрены вопросы ремонтной сварки поврежденных узлов котельного оборудования ТЭС и ТЭЦ из теплоустойчивых сталей систем Cr–Mo и Cr–Mo–V (коллекторы, трубы поверхностей нагрева, тройники, элементы паропроводов и др.), которые отработали сроки эксплуатации в жестких условиях (при высокой температуре и давлении), вызвавших повреждения в металле в основном в виде трещин. Для ремонта таких повреждений рекомендована технология с использованием ручной электродуговой сварки электродами (тип 06X1M) в комбинации с электродами типа 09X1MФ, предусматривающая применение предварительного и сопутствующего подогрева с последующим термическим отдыхом сварного соединения. Сварные соединения, выполненные по предложенной технологии, имеют высокую трещиностойкость и требуемые механические свойства. Данная технология прошла успешные испытания при ремонтной сварке узлов котельного оборудования.

Ключевые слова: ремонтная сварка, повреждения, теплоустойчивые стали, узлы котельного оборудования, электроды, предварительный подогрев, термический отдых, продление срока эксплуатации

Продление сроков эксплуатации энергетического оборудования на ТЭС и ТЭЦ, отработавшего парковый ресурс, возможно после технической диагностики и выявления эксплуатационных повреждений, а также исследования состояния металла (структура, свойства). Компоненты котельного оборудования (трубы поверхностей нагрева, пароперегреватели, коллекторы, тройники, элементы паропроводов и др.) изготавливают из теплоустойчивых хромомолибденовых (Cr–Mo) или хромомолибденованадиевых (Cr–Mo–V) сталей. Основные марки этих сталей в части использования при рабочих температурах, их химический состав и механические свойства приведены в табл. 1–3 [1, 2]. Основными легирующими элементами этих сталей являются хром, молибден и ванадий. Молибден как один из главных элементов, определяющих жаропрочность стали, находится в основном в твердом растворе. Он уменьшает диффузионную подвижность атомов и скорость движения дислокаций. Определенное количество молибдена позволяет получить оптимальное сочетание прочности и пластичности стали. При этом участие молибдена в образовании карбидов ограничено. В его присутствии формируются карбиды хрома и ванадия. Последний положительно влияет на повышение длительной прочности и предела ползучести благодаря образованию тер-

мически стойких карбидов. При изготовлении котельного оборудования и трубопроводов отечественных ТЭС стали системы Cr–Mo–V практически полностью вытеснили стали системы Cr–Mo в энергоблоках с рабочей температурой пара 545 °С. В то же время в процессе длительной работы при высокой температуре в котлоагрегатах, изготовленных из указанных сталей, образуются повреждения, обусловленные эксплуатационными, технологическими и конструкционными факторами [1, 3].

Наиболее характерными повреждениями в сварных соединениях теплоустойчивых сталей являются различного вида трещины. Основным способом ремонта поврежденных деталей и узлов котлоагрегатов является ремонтная сварка и восстановительная наплавка. Ремонт поврежденных деталей имеет определенные трудности, связанные с необходимостью проведения работ в производственных условиях электростанций. Поэтому разработка прогрессивных технологий сварки,

Таблица 1. Теплоустойчивые стали, используемые для бесшовных труб коллекторов и паропроводов при изготовлении котлоагрегатов

Марка стали	Стандарт		Граничная максимальная температура, °С
	Трубы	Сталь	
12МХ	ТУ 14-3-610–75	ГОСТ 20072–74	530
15ХМ	ТУ 14-3-460–75	ТУ 14-3-460–75	550
12Х1МФ			570
15Х1М1Ф			570



Таблица 2. Химический состав теплоустойчивых сталей систем Cr–Mo и Cr–Mo–V, мас. %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	S	P
							не более			
12MX	0,09...0,16	0,17...0,37	0,40...0,70	0,40...0,70	0,40...0,60	—	—	—	—	—
15XM	0,11...0,16	0,17...0,37	0,40...0,70	0,80...1,10	0,40...0,55	—	—	—	—	—
12X1MФ	0,08...0,15	0,17...0,37	0,40...0,70	0,90...1,20	0,25...0,35	0,15...0,30	0,25	0,20	0,025	0,025
15X1M1Ф	0,10...0,16	0,17...0,37	0,40...0,70	1,10...1,40	0,90...1,10	0,20...0,35	0,25	0,25	0,025	0,025

Таблица 3. Механические свойства труб из теплоустойчивых сталей при температуре 20 °С [1]

Марка стали	Термообработка	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²
			не менее			
12MX	Норм. 910...930 °С + отп. 670...690 °С	≥ 410	235	21	45	60
15XM	Норм. 930...960 °С + отп. 680...730 °С	450...650	240	21	50	60
12X1MФ	Норм. 950...980 °С + отп. 720...750 °С	450...650	280	21	55	60

как основного способа ремонта энергетического оборудования, является важной и актуальной задачей для продления ресурса и надежной работы котлоагрегатов ТЭС [4].

Сварка теплоустойчивых сталей системы Cr–Mo–V, как правило, выполняется с применением предварительного и сопутствующего подогрева, а также последующей термической обработкой сварных соединений. Учитывая, что в условиях действующих ТЭС проведение термообработки отремонтированных деталей и узлов не всегда возможно, весьма перспективно применение способов сварки без последующей послесварочной термообработки. В связи с этим целью настоящей работы являлась разработка технологии ремонтной сварки без последующей термообработки, обеспечивающей высокую трещиностойкость и требуемые свойства сварных соединений узлов котлоагрегатов.

Одним из основных условий технологии ремонтной сварки являются мероприятия, предупреждающие образование холодных трещин в свар-

ных соединениях. Как известно [5, 6], образование холодных трещин (замедленное разрушение) обусловлено сочетанием трех факторов: образованием закалочных структур в зоне термического влияния (ЗТВ) или металле шва; содержанием диффузионного водорода и уровнем остаточных сварочных напряжений в сварном соединении.

Отсутствие закалочных структур в сварном соединении можно обеспечить выбором тепловых режимов и условий сварки. Как правило, это достигается применением предварительного и сопутствующего нагрева, при которых скорость охлаждения будет способствовать формированию структуры металла ЗТВ, устойчивой против образования трещин.

Характерной особенностью теплоустойчивых сталей перлитного класса является их большая чувствительность к скоростям охлаждения, начиная с температуры распада аустенита (A_{c3}). Поэтому в первую очередь было проанализировано влияние термического цикла сварки на структуру и свойства широко применяемой стали марки 12X1MФ (рис. 1) при различных условиях охлаждения. Из приведенной диаграммы видно, что при скорости охлаждения более 125 °С/с в температурном интервале 800...700 °С распад аустенита происходит в мартенситной области с образованием 100 % мартенсита. Уменьшение скорости охлаждения приводит к образованию структур промежуточного превращения — бейнита. При скорости охлаждения 16,5 °С/с уже образуется структура, которая на 30 % состоит из феррита и на 70 % из бейнита. Таким образом, за счет регулирования скорости охлаждения можно получить структуры, отличающиеся чувствительностью к замедленному разрушению и способствующие получению различных механических свойств металла [7]. Поэтому применение дополнительных мероприятий для регулирования про-

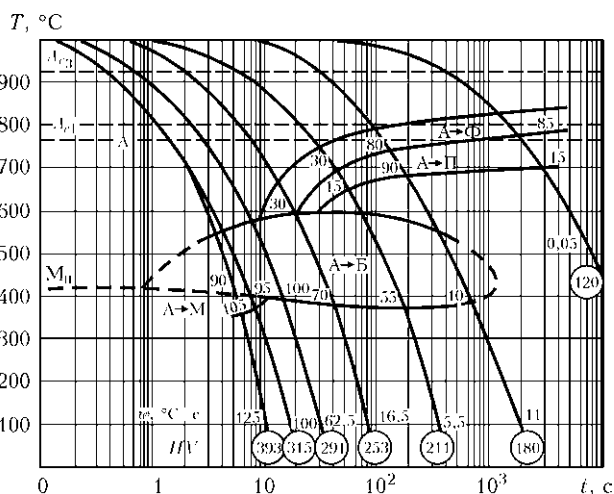


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита в стали 12X1MФ [3]

Таблица 4. Химический состав и механические свойства металла сварных соединений сталей системы Cr–Mo–V [3]

Марка электрода (тип)	Химический состав, мас. %						
	C	Si	Mn	S	P	Mo	Cr
ТМЛ-5 (Э-06Х1М) (для сварки корневых проходов)	Требования по НД (металл шва)						
	0,065	0,025...0,40	0,5...0,7	0,025	0,025	0,45...0,60	0,55...0,80
	Фактические значения (металл шва)						
	0,044**...0,05***	0,25...0,34	0,56...0,70	0,017...0,021	0,021...0,02	0,51...0,50	0,69...0,72
ТМЛ-3У (09Х1МФ) (для заполнения разделки)	Требования по НД (металл шва)						
	0,08...0,12	0,15...0,40	0,5...0,9	0,025	0,030	0,4...0,6	0,80...1,25
	Фактические значения (металл шва)						
	0,09	0,3	0,8	0,016	0,025	0,51	1,1

Окончание табл. 4

Марка электрода (тип)	Механические свойства при 20 °С, не менее				
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
ТМЛ-5 (Э-06Х1М) (для сварки корневых проходов)	Требования по НД (металл шва)				
	550	350	18	60	88
	Фактические значения (металл шва)				
	580	430	20	69	130****
	Требования по НД (сварное соединение)				
	500	—	—	40	—
ТМЛ-3У (09Х1МФ) (для заполнения разделки)	Фактические значения (сварное соединение)*				
	490	—	16	—	78,5
	Фактические значения (металл шва)				
	569	481	17	40	160

* Место разрушения — основной металл (12Х1МФ) в 6...8 мм от линии сплавления. ** Диаметр электродов 3,0 мм. *** Диаметр электродов 4,0 мм. ****61 Дж/см² при –20 °С, 40 Дж/см² при –40 °С.

цесса охлаждения зоны сварки в виде предварительного и сопутствующего подогрева или применения сварки, обеспечивающей автоподогрев соединения, позволяет формировать структуру металла, устойчивую против образования трещин.

Для получения требуемых свойств сварных соединений теплоустойчивых сталей при ремонте компонентов энергетического оборудования, работающего при температурах выше 540 °С, необходимо применять сварочные материалы, обеспечивающие химический состав и структуру металла шва, близкие к основному металлу [8]. Так, для ремонтной сварки литых деталей корпусного турбинного оборудования без последующей термообработки из сталей систем Cr–Mo и Cr–Mo–V рекомендованы и внедрены электроды ТМЛ-5 типа Э-06Х1М (ГОСТ 9467–75) [8–12]. Химический состав и механические свойства металла, напла-

вленного электродами марки ТМЛ-5, приведены в табл. 4. Эти электроды обеспечивают высокую трещиностойкость и оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств наплавленного металла сварных соединений хромомолибденовых сталей. Поэтому при ремонтной сварке соединений сталей системы Cr–Mo–V их также целесообразно использовать для сварки корневых швов и облицовки кромок, а дальнейшее заполнение разделки выполнять электродами марки ТМЛ-3У (тип 09Х1МФ).

Для оценки стойкости стали системы Cr–Mo–V против образования холодных трещин и определения необходимой температуры подогрева при ремонтной сварке электродами ТМЛ-3У были проведены исследования по методике Implant (метод вставок) [13]. Критерием трещиностойкости сварного соединения являлись максимальные (кри-

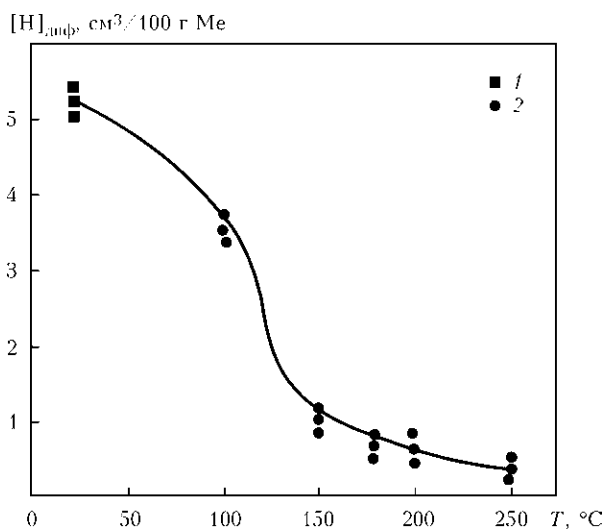


Рис. 2. Зависимость количества диффузионного водорода в наплавленном металле от температуры нагрева без отдыха (1) при отдыхе 10 мин (2)

тические) напряжения в образцах до начала разрушения. При этом серьезное внимание было уделено также исследованию влияния послесварочного нагрева (отдыха) на трещиностойкость сварных соединений. Предварительно было изучено влияние условий проведения отдыха на содержание диффузионного водорода $[H]_{\text{диф}}$ в наплавленном металле. Учитывая, что его содержание в металле, наплавленном стандартными электродами ТМЛ-3У, находится на сравнительно низком уровне (1,5...2,5 см³/100 г металла по спиртовой пробе), представляет интерес оценка влияния отдыха на содержание $[H]_{\text{диф}}$ более высокой исходной концентрации. В связи с этим были изготовлены опытные электроды ТМЛ-3У, в покрытие которых был специально введен мусковит, что обеспечивало повышенную концентрацию диффузионного водорода $[H]_{\text{диф}}$. После прокалки электродов при температуре 400 °С в течение 1,5 ч концентрация $[H]_{\text{диф}}$ в наплавленном металле составляла 5,3 см³/100 г металла по спиртовой пробе. Выдержка этих образцов наплавленного металла в течение 10 мин при различных температурах отдыха существенно снижает содержание диффузионного водорода (рис. 2). При термическом отдыхе при температуре 250 °С концентрация $[H]_{\text{диф}}$ находится на уровне 0,5 см³/100 г металла, что способствует повышению трещиностойкости сварных соединений. Для оценки влияния отдыха на трещиностойкость при испытании по методу вставок после приварки образца к пластине выполняли нагрев опытного соединения с помощью электронагревателя сопротивления. Температуру контролировали хромель-алюмелевыми термопарами в приваренном состоянии. Под нагрузкой образцы выдерживали до 24 ч. Испытания выполняли по этапам. Сначала испытывали соединения, сваренные без предварительного подогрева, для

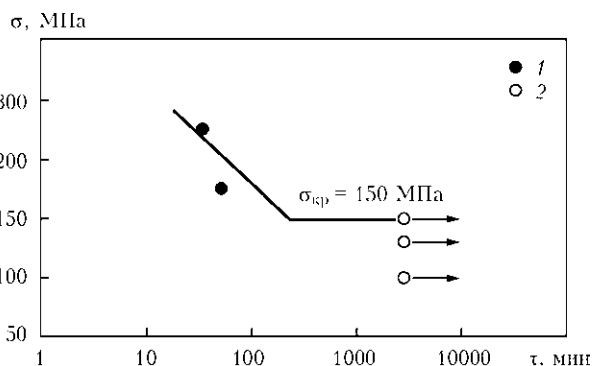


Рис. 3. Влияние напряжений на склонность сварных соединений стали 12Х1МФ к замедленному разрушению (1) и без разрушений (2)

оценки уровня критических напряжений, превышение которых вызывает развитие замедленного разрушения. Далее выполняли цикл испытаний с применением термического отдыха в условиях нагружающего напряжения, которое превышало критическое с целью подтверждения эффективности данной операции и установления параметров режима отдыха, необходимого для обеспечения стойкости против замедленного разрушения.

На рис. 3 представлены результаты испытаний сварных соединений без подогрева и дальнейшего термического отдыха. Проведенные исследования позволили установить, что критический уровень напряжений составляет примерно 150 МПа. Результаты изучения влияния послесварочного отдыха показали, что нагружающее напряжение 200 МПа из закритической области не вызывает развития разрушений в результате ослабленного влияния водородного фактора (рис. 2). Поэтому для иницирования разрушения дальнейшие исследования проводили под нагрузкой, соответствующей напряжению 400 МПа. Такое напряжение способствует разрушению. По полученным данным была построена обобщающая зависимость (рис. 4), которая устанавливает соответствие между температурой и продолжительностью отдыха, необходимого для обеспечения стойкости против замедленного разрушения. Данная зависимость может служить основой для выбора режима термического отдыха.

Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую эффективность послесварочного отдыха для обеспечения стойкости сварных соединений против замедленного разрушения. При этом не наблюдаются фазовые превращения, но создаются благоприятные условия для удаления диффузионного водорода из зоны сварки [14, 15].

Поскольку уровень остаточных сварочных напряжений является одним из составных факторов, определяющих трещиностойкость сварных соединений, были проведены исследования влияния температуры послесварочного нагрева (отдыха и термической обработки) на степень ре-

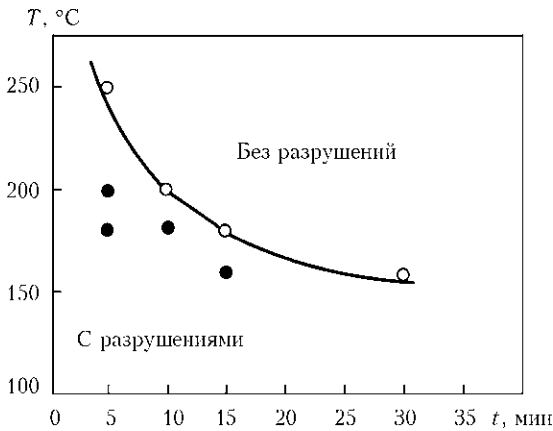


Рис. 4. Влияние температуры и продолжительности термического отдыха на склонность сварных соединений стали 12X1MF к замедленному разрушению при нагружающем напряжении $\sigma = 400$ МПа

лаксации напряжений. Исследования проводили в соответствии с методикой, предложенной НПО «ЦКТИ» им. И. И. Ползунова [16]. Образец сварного соединения из стали 12X1MF размером $12 \times 14 \times 210$ мм устанавливали на опору специального приспособления, изготовленного из жаропрочного никелевого сплава, и нагружали до заданного напряжения на участке чистого изгиба (рис. 5). Напряжение измеряли в зависимости от прогиба f с помощью индикатора, крепящегося на съемной пластине. После нагружения и измерения упругого прогиба приспособление вместе с нагруженным образцом на определенное время помещали в печь, нагретую до заданной температуры. После выдержки в печи образцы охлаждали до комнатной температуры и на них повторно измеряли прогиб f . По разнице прогибов подсчитывали пластические деформации в образцах и релаксацию напряжений в зависимости от времени пребывания в печи при заданной темпе-

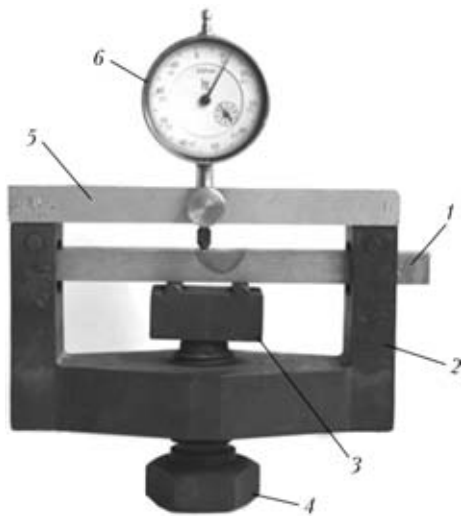


Рис. 5. Схема приспособления для нагружения образца при релаксационных испытаниях: 1 — образец; 2 — сварная станина; 3 — опора; 4 — нагружающий винт; 5 — съемная пластина для крепления индикатора; 6 — индикатор

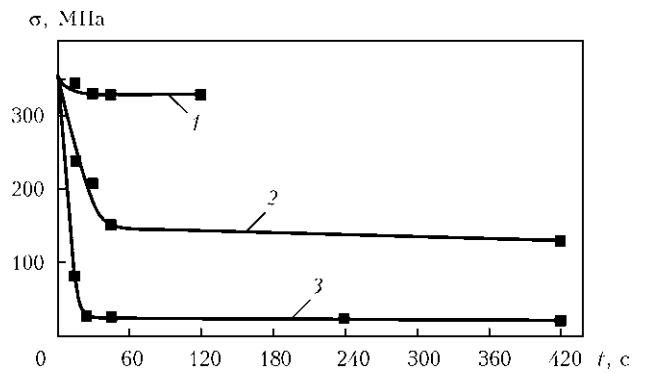


Рис. 6. Зависимость релаксации напряжений в образцах сварных соединений от температуры (1 — $T = 250$; 2 — 545 ; 3 — 750 °C) и времени выдержки

ратуре и заданной нагрузке. Результаты исследования приведены на рис. 6 и 7. Установлено, что термический отдых исследуемых образцов независимо от времени выдержки при температуре $250 \dots 350$ °C практически не оказывает влияния на релаксацию напряжений. Однако при температуре эксплуатации 545 °C в сварных соединениях падение напряжения может снижаться до уровня ниже 150 МПа. Такая склонность сварных соединений сталей системы Сг–Мо–V к релаксации при температуре эксплуатации дает реальную возможность в случае сложности проведения послесварочного высокого отпуска ($730 \dots 750$ °C) применять только термический отдых. Дальнейшая эксплуатация котлоагрегата при рабочей температуре 545 °C способствует значительному снятию остаточных сварочных напряжений. Однако релаксация остаточных напряжений при температуре эксплуатации значительно ниже, чем после высокого отпуска (рис. 6). Поэтому отремонтированные узлы котлоагрегатов без последующего высокого отпуска могут работать с ограниченным ресурсом. После проведения очередного обследования и технической диагностики принимается решение о дальнейшей эксплуатации.

Результаты выполненных исследований позволили рассмотреть вопрос о возможности выполнения ремонтной сварки без последующей термообработки при заварке повреждений на деталях котлоагрегатов по месту эксплуатации. Объектом

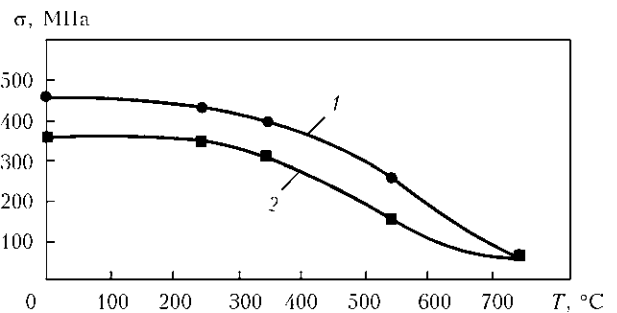


Рис. 7. Зависимость релаксации напряжений от температуры при кратковременной нагрузке ($\sigma = 0,8\sigma_T$) (1) и термическом отдыхе 60 мин при $\sigma = 0,8\sigma_T$ (2)

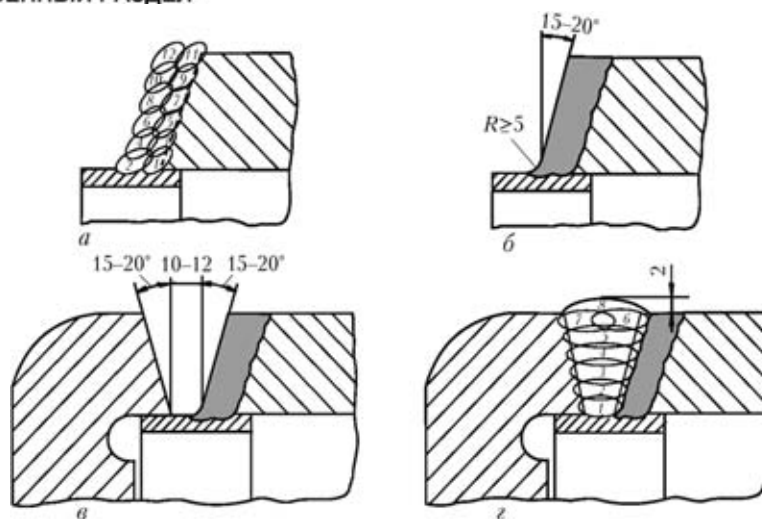


Рис. 8. Схема последовательности выполнения ремонта коллектора: *a* — предварительная многослойная наплавка торца коллектора кольцевыми валиками с последовательным их выполнением; *b* — форма разделки после механической обработки предварительной наплавки; *в* — сборка под сварку стыка доньшка с коллектором; *г* — заполнение разделки многопроходной сваркой

ремонта по предложенной технологии сварки был выбран коллектор подогревателя из стали 12Х1МФ с наружным диаметром 273 мм и толщиной стенки 36 мм. Повреждение в виде кольцевой трещины образовалось от концентратора напряжений (в углу корневого шва на подкладном кольце) и распространилось вверх по шву и зоне крупного зерна ЗТВ до выхода наружу. Для принятия технического решения о возможности проведения ремонтной сварки без последующей термообработки предварительно была выполнена аттестация предложенной технологии. Аттестационные испытания [17] проводили на модели коллектора с натурной толщиной стенки. После проведения механической обработки торца коллектора под предварительную наплавку кромки выполнен контроль методом МПД на отсутствие трещин. Подкладное кольцо было прихвачено с наружной стороны к кромке торца с подогревом 250...300 °С. Предварительную двухслойную наплавку на торец коллектора (рис. 8, *a*) выполняли с подогревом 250...300 °С многослойным способом кольцевыми валиками толщиной 4...5 мм и шириной 15...20 мм электродами типа Э-06Х1М (ТМЛ-5). Первый слой выполнен электродами диаметром 3,0 мм ($I_{св} = 90...110$ А), второй слой — электродами диаметром 4 мм ($I_{св} = 120...160$ А). После этого поверхность наплавки подвергали обработке абразивным инструментом до получения необходимого размера и формы кромки (рис. 8, *b*) с оценкой качества методами ВИК, УЗД, МПД и измерением твердости. Затем производили сборку стыка коллектора с доньшком (рис. 8, *в*) на подкладном кольце.

Подогрев при сборке и сварке коллектора с доньшком составлял 250...300 °С. Первые два корневых шва сваривали электродами ТМЛ-5 диаметром 3,0 мм ($I_{св} = 90...120$ А), которые в ре-

зультате пониженного содержания углерода и хрома, а также отсутствия ванадия позволяют получить более пластичный наплавленный металл. Это предотвращает вероятность образования надрывов в корне шва и обеспечивает высокую трещиностойкость сварных соединений. Дальнейшее заполнение разделки (рис. 8, *г*) выполняли электродами ТМЛ-3У диаметром 4,0 мм ($I_{св} = 130...180$ А). Сразу же после сварки для эвакуации диффузионно-подвижного водорода и повышения трещиностойкости производили полный термический отдых сварного соединения при 250 °С в течение 2,5 ч. После термического отдыха производили медленное охлаждение зоны ремонтной сварки до температуры 50...70 °С за счет укутывания места ремонта асбестовой тканью. Далее наружную поверхность кольцевого шва обрабатывали механическим способом до получения требуемой формы соединения (рис. 8, *г*). Заключительной операцией был неразрушающий контроль качества. Качество ремонта оценивали визуальным контролем, ультразвуковым контролем и травлением поверхности 15 % раствором азотной кислоты для выявления поверхностных дефектов. Проведенный контроль качества аттестационного стыка не выявил каких-либо дефектов в сварном соединении.

Исследования механических свойств показали, что предел прочности сварного соединения при испытаниях образцов на растяжение находится в пределах 490...560 МПа, а ударная вязкость наплавленного металла составляет 120...160 Дж/см², что соответствует требованиям к основному металлу этой стали ($\sigma_B = 440...588$ МПа и $a_n \geq 98$ Дж/см²).

Проведенные металлографические исследования макро- и микроструктуры установили отсутствие дефектов в металле шва и ЗТВ. Твердость металла шва составляет *HV* 180 при допустимых

значениях снижения для стали 12Х1МФ средней твердости до *HВ* 140 и повышении не более *HВ* 270.

Таким образом, проведенные аттестационные испытания ремонтной заварки на коллекторе из стали 12Х1МФ по разработанной технологии показали положительные результаты. Это позволило принять техническое решение и рекомендовать предложенную технологию ремонтной сварки для коллектора из стали 12Х1МФ.

Выводы

1. Исследована свариваемость и разработана технология ремонтной сварки типичной теплоустойчивой стали 12Х1МФ, широко применяемой при изготовлении котлоагрегатов ТЭС и ТЭЦ.

2. Для ремонта поврежденных узлов и деталей котлоагрегатов из теплоустойчивых сталей в случае невозможности проведения высокого отпуска на действующих ТЭЦ и ТЭС можно использовать предварительный и сопутствующий подогрев совместно с послесварочным низкотемпературным отпуском. Дальнейшая эксплуатация при рабочей температуре 545 °С способствует снижению остаточных сварочных напряжений (до уровня порядка 150 МПа), что позволяет продлить ресурс отремонтированного котлоагрегата на ограниченный срок до очередного обследования.

1. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов. — М.: Машиностроение, 2002. — 352 с.
2. Мелехов Р. К., Похмурский В. І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. — Киев: Наук. думка, 2003. — 373 с.
3. Анохов А. Е., Корольков П. М. Сварка и термическая обработка корпусного энергетического оборудования при ремонте. — Киев: Екотехнологія, 2003. — 88 с.

4. Анохов А. Е., Хромченко Ф. А., Федина И. В. Новая технология ремонтной сварки литых деталей из хромомолибденовых сталей без термической обработки // Свароч. пр-во. — 1986. — № 10. — С. 15–17.
5. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
6. Шоршоров М. Х., Чернышева Т. А., Красовский А. И. Испытания металлов на свариваемость. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
7. Шоршоров М. Х., Белов В. В. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке. — М.: Наука, 1972. — 219 с.
8. Хромченко Ф. А. Сварочные технологии при ремонтных работах. — М.: Интермет Инжиниринг, 2005. — 368 с.
9. РД 108.021. 112–88. Исправление дефектов в литых корпусных деталях турбин и арматуры методами заварки без термической обработки. — М., 1988. — 15 с.
10. Анохов А. Е., Ганиев Ф. Б., Корольков П. М. Совершенствование технологии ремонтной сварки и термообработки — основа продления ресурса паровых турбин // Монтаж и спец. работы в стр-ве. — 2003. — № 7. — С. 7–11.
11. Анохов А. Е., Корольков П. М. Сварка и термическая обработка в энергетике. — Киев: Екотехнологія, 2006. — 319 с.
12. Ремонтная сварка корпусных деталей турбин из теплоустойчивых сталей без последующей термообработки / А. К. Царюк, В. Д. Иваненко, В. В. Волков и др. // Автомат. сварка. — 2009. — № 12. — С. 41–46.
13. Касаткин Б. С., Бреднев В. И., Волков В. В. Методика исследования кинетики деформаций при замедленном разрушении // Там же. — 1981. — № 11. — С. 13.
14. Козлов Р. А. Водород при сварке корпусных сталей. — Л.: Судостроение, 1969. — 175 с.
15. Козлов Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей. — Л.: Машиностроение, 1986. — 160 с.
16. Демянцевиц С. В., Земзин В. Н. Методика оценки склонности сварных соединений к образованию трещин при термической обработке // Тр. ЦКТИ. — 1979. — № 169. — С. 22–27.
17. РТМ-1с-89. (РД 34 15.027–89). Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций. — М.: Энергоиздат, 1989. — 208 с.

The paper considers repair welding of the damaged assemblies of boiler equipment at heat electric power stations and heat power plants, made from heat-resistant steels of the Cr–Mo and Cr–Mo–V compositions (collectors, heating surface pipes, T-joints, steam piping elements etc.), which exhausted their life under severe service conditions (at high temperature and pressure) that caused damages in metal mainly in the form of cracks. The technology recommended for repair of such damages involves manual arc welding using the 06Kh1M alloying type electrodes combined with the 09Kh1MF alloying type electrodes. It includes for the use of preliminary and concurrent heating with subsequent thermal recovery of a welded joint. Welded joints made by the suggested technology have high crack resistance and required mechanical properties. The technology successfully passed the tests in repair welding of boiler equipment assemblies.

Поступила в редакцию 13.06.2012