

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ЭЛЕМЕНТОВ ГЦТ Ду 850 ПРИ ЗАМЕНЕ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-1000М НА АЭС

**А. К. ЦАРЮК, В. Ю. СКУЛЬСКИЙ, В. В. ВОЛКОВ**, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**А. И. БЫВАЛЬКЕВИЧ, В. В. ПОДЪЯЧЕВ, Н. А. ИВАНОВ**, инженеры  
(ОП «Атомремонтсервис» НАЭК «Энергоатом», г. Славутич),  
**Н. В. НЕМЛЕЙ, А. П. МИРОШНИЧЕНКО, А. В. БАЖУКОВ**, инженеры  
(ОП «Южно-Украинская АЭС», НАЭК «Энергоатом», г. Южноукраинск)

Для получения качественных соединений элементов главного циркуляционного трубопровода с патрубками парогенератора рекомендовано вместо ручной сварки использовать автоматическую аргонодуговую сварку с присадочной проволокой диаметром 0,8...0,9 мм, которая прошла испытания и аттестацию. Предложенный процесс позволяет уменьшить трудозатраты, сократить цикл сварочных работ, обеспечить высокое и стабильное качество сварных соединений, а также снизить дозу радиационного воздействия на персонал АЭС при выполнении сварочных работ.

*Ключевые слова: дуговая сварка, трубопроводы, парогенератор, технология сварки, неплавящийся электрод, сварочная проволока, защитный газ, химический состав, механические свойства*

В современных условиях атомная энергетика вносит весомый вклад в экономику Украины — около 50 % всей производимой в настоящее время электроэнергии вырабатывается на четырех атомных станциях с 15 действующими энергоблоками, оснащенными реакторами типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-440.

Однако атомные электростанции (АЭС) являются потенциальными техногенноопасными объектами, аварии на которых могут привести к непоправимым последствиям. В связи с этим контроль за состоянием технологического оборудования и своевременное устранение его повреждений являются основными условиями надежности работы АЭС. Поскольку требования к безопасности ядерных энергетических установок чрезвычайно высокие и продолжают ужесточаться, особое значение приобретает проблема ремонта компонентов оборудования и трубопроводов АЭС с целью продления их ресурса.

В реакторах ВВЭР-1000 в наиболее жестких условиях эксплуатации работают парогенераторы (ПГ) типа ПГВ-1000М [1, 2]. В них дефекты чаще всего образуются в теплообменных трубках, и поскольку пока практически не существует эффективных способов их ремонта, то после «глушения» допустимого их количества, вышедшие из строя ПГ заменяют, что включает проведение комплекса технологических операций [3]. Наиболее сложные и дорогостоящие из них — это стыковка, сварка, термообработка и контроль качества сварных соединений главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду 850 с коллекторами ПГ в монтажных условиях. Цикл операции составляет около 20 сут. Трубопровод ГЦТ Ду 850 и коллектор

ПГ изготовлены из легированной стали перлитного класса марки 10ГН2МФА (ТУ 108.1197–83), плакированной по внутренней поверхности аустенитной сталью марки ЭИ-898 (04Х20Н10Г2Б). Толщина основного перлитного металла составляет 60 мм, плакировки — 5...7 мм.

В настоящее время основным способом соединения элементов ГЦТ Ду 850 с патрубками ПГ является ручная дуговая сварка (РДС) покрытыми электродами и ручная аргонодуговая сварка (РАДС) вольфрамовым электродом с присадкой [3, 4]. Корневые швы выполняют РАДС с присадкой сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 2...3 мм, а заполнение разделки — электродами ПТ-30 диаметром 4 мм. Сборку и сварку осуществляют с предварительным и сопутствующим подогревом до температуры 120...250 °С. Для наплавки промежуточного плакирующего слоя применяют электроды ЗИО-8, второго слоя — электроды ЭА-898/21Б; допускается также выполнение обоих слоев на всю толщину электродами марки ЦЛ-25/1.

Однако применение РДС и РАДС при соединении элементов ГЦТ Ду 850 с коллекторами ПГ, относящихся к I категории сварных соединений оборудования и трубопроводов группы А [5–7], связано не только со значительными трудозатратами и длительным циклом сварочных работ, но и с необходимостью обеспечения требуемого качества сварных соединений [4]. В связи с этим целесообразно для выполнения указанных соединений использовать механизированную сварку.

Традиционная РАДС по сравнению с другими способами сварки является процессом с низкой производительностью. Однако этот способ сварки имеет свои преимущества, например, высокое качество сварного шва, отсутствие шлака и окисления на поверхности шва. При этом по таким показателям, как плотность металла шва и незначительное



количество дефектов, этот способ сварки превосходит большинство традиционных, имеющих более высокую производительность наплавки. Благодаря стабильности и возможности безопасной работы в различных условиях РАДС можно легко автоматизировать и механизировать. В случае необходимости обеспечения высокого уровня механических свойств металла шва применяют автоматическую аргонодуговую сварку (ААрДС) [8, 9].

Для достижения трещиностойких сварных соединений ААрДС является наиболее надежным способом сварки. Благодаря ААрДС получают корень шва с оптимальной геометрией [10], при этом не требуется послесварочная машинная обработка, шлифовка, зачистка и пр.

Анализ существующих способов механизированной сварки показал, что для сварки элементов ГЦТ Ду 850 наиболее эффективной является ААрДС. Технология ААрДС способствует снижению трудоемкости сварочных работ и сокращению сроков их выполнения, обеспечивает высокое и стабильное качество сварных соединений и снижение дозы радиационного воздействия на персонал при выполнении сварочных работ. Опыт применения ААрДС для изготовления трубопроводов Ду 850 из стали 08Х18Н10Т при сооружении АЭС с реакторами ВВЭР-440 подтверждает высокое качество сварных соединений и эффективность указанной технологии [11].

При разработке методики проведения опытно-технологических работ исходили из следующих основных положений:

все работы по созданию технологии выполняются в полном соответствии с правилами и нормами, применяемыми в атомной энергетике [5–7];

технология ААрДС разрабатывается применительно к проектной разделке кромок (рис. 1) в соответствии с [7], поскольку в настоящее время отсутствует специализированное портативное оборудование для механической обработки на монтаже патрубков коллекторов ПГ под узкую разделку кромок (ПГ поставляется заводом-изготовителем со стандартной разделкой кромок на патрубках);

ААрДС должна использоваться для выполнения горизонтальных швов на вертикальной плоскости; выбираются необходимые сварочные материалы; уточняется температура предварительного и сопутствующего подогрева; определяется оптимальный тепловой режим сварки; уточняется режим послесварочной термообработки; проводится отработка выбранной технологии и изучаются физико-химические показатели сварных соединений; обобщаются результаты и готовятся технологические рекомендации.

В соответствии с [7] для аргонодуговой сварки стали 10ГН2МФА рекомендуется применять сварочную проволоку марки Св-10ГНМА, содержащую кремния не менее 0,22 мас. %. Технические условия ТУ 14-1-2869-79 на указанную проволоку ограничивают содержание в ней кремния (не более 0,30 мас. %). При этом исключить возможность образования пористости в сварных швах при аргонодуговой сварке можно только при использовании сварочной проволоки с содержанием крем-

ния 0,26...0,30 мас. % [4]. Поскольку указанная сварочная проволока в основном предназначена для сварки под флюсом, указанное содержание кремния в ней встречается крайне редко. Кроме того, такая проволока производится только в РФ.

В связи с изложенным выше для обеспечения качества и требуемых свойств сварных соединений элементов ГЦТ Ду 850 из плакированной стали 10ГН2МФА, полученных ААрДС, требуется стандартная сварочная проволока с аналогичной системой легирования и содержанием кремния не менее 0,26...0,30 мас. %. В ходе маркетингового поиска такой сварочной проволоки сопоставляли сварочные проволоки-аналоги производства различных фирм, их химический состав и механические свойства наплавленного металла. Полученные результаты показали, что при ААрДС целесообразно использовать отечественную сварочную проволоку Св-08Г1НМА фирмы «Кродекс» (Украина), которая отличается от базовой марки Св-10ГНМА [7] оптимальным (до 0,45 мас. %) содержанием кремния, повышенным (до 1,5 мас. %) марганца и пониженным (до 0,7 мас. %) никеля.

Оценивая химический состав проволоки Св-08Г1НМА (ТУ 14-15-373-95), необходимо отметить, что в процессе сварки создаются предпосылки для снижения вероятности образования пористости в наплавленном металле, повышения его трещиностойкости и обеспечения требуемого уровня механических свойств (превышающего уровень свойств базовой проволоки).

Проведены предварительные исследования возможности использования сварочной проволоки Св-08Г1НМА для ААрДС элементов трубопроводов из стали 10ГН2МФА. С этой целью выполнены работы по выбору оптимальной газовой защиты при сварке неплавящимся электродом со сварочной проволокой Св-08Г1НМА, изучению механических свойств металла шва сварных соединений стали 10ГН2МФА, оценке качества и структуры металла шва и ЗТВ стали 10ГН2МФА с учетом требуемой послесварочной термической обработки.

При сварке неплавящимся электродом в инертных газах наиболее широко применяют аргон, гелий и их смеси. С целью поиска оптимальной газовой защиты для ААрДС стали 10ГН2МФА со сварочной проволокой Св-08Г1НМА опробовали несколько вариантов: чистый аргон, 70 % Ar + 30 % He, 50 % Ar + 50 % He и 30 % Ar + 70 % He. При всех указанных вариантах газовой защиты обеспечивается стабильность дуги и высокое качество сварных швов. Однако при сварке в стандартную разделку в чистом аргоне защита дуги и сварочной ванны от воздуха более надежна, чем при использовании смеси гелия и аргона. Высокое содержание гелия в смеси приводит к повышению напряжения на дуге, в результате повышается температура сварочной ванны и как следствие увеличивается проплавление основного металла, а также жидкотекучесть сварочной ванны, что требует повышенного (до 1800 л/ч) расхода газовой смеси и способствует выгоранию легирующих элементов.

Анализ различных вариантов газовой защиты показал, что наиболее приемлемым для сварки

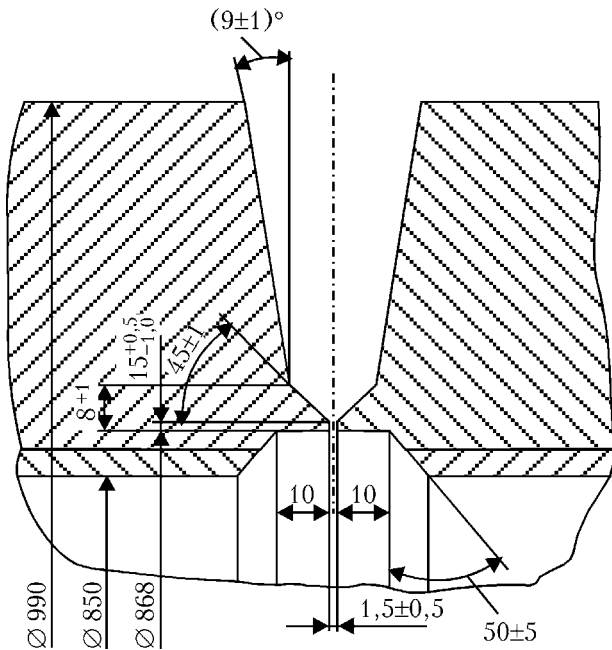


Рис. 1. Схема стандартной разделки кромок сварных соединений, полученных способом ААрДС неплавящимся электродом с применением сварочной проволоки

стандартной разделки является ААрДС в чистом аргоне. Этот выбор связан в первую очередь с надежностью защиты в чистом аргоне, повышенной жидкотекучестью при сварке в смеси гелия с аргонem. При сварке в узкощелевую разделку для гарантированного сплавления наплавленного металла с кромками разделки целесообразнее применять смесь 30 % Ag + 70 % He и 50 % Ag + 50 % He.

Для ААрДС использовали стыковые соединения пластин размером 350×80 мм толщиной 40 мм из стали 10ГН2МФА со стандартной разделкой кромок (рис. 1). В качестве присадки использовали сварочную проволоку Св-08Г1НМА диаметром 0,9 мм. ААрДС стыковых соединений осуществляли в нижнем положении.

Для исследования склонности сварных соединений к образованию холодных трещин и уточнения температуры предварительного подогрева использовали методы количественной и качественной оценки. Количественную оценку трещиностойкости сварных соединений стали 10ГН2МФА выполняли на образцах-имитаторах по методике вставок (имплант), основанной на оценке прочностных и деформационных характеристик замедленного разрушения. Для качественной оценки сваривали жесткую технологическую пробу типа «Теккен». Полученные результаты исследований показали, что для обеспечения трещиностойкости сварных соединений, выполненных ААрДС с использованием присадочной проволоки Св-08Г1НМА, требуется предварительный и сопутствующий подогрев до

температуры 150 °С. При этом резко возрастает способность металла шва и ЗТВ выдерживать высокий уровень нагружения. Кроме того, такой подогрев способствует снижению концентрации диффузионного водорода в наплавленном металле до 1,5 см<sup>3</sup>/100 г.

Режим сварки корневого шва выбирали исходя из результатов получения полного провара и обеспечения норм выпуклости корня шва [6]: сварочный ток  $I_{св} = 140$  А; напряжение на дуге  $U_{д} = 9,5$  В; скорость сварки  $v_{св} = 4,5$  м/ч; скорость подачи сварочной проволоки  $v_{пр} = 400$  м/ч (подача в «хвост» сварочной ванны); расход аргона 800 л/ч.

Режим сварки при заполнении разделки выбирали по результатам формирования и обеспечения надежного сплавления шва со стенками разделки и между отдельными проходами:  $I_{св} = 250$  А;  $U_{д} = 11,5$  В;  $v_{св} = 5,5$  м/ч;  $v_{пр} = 900$  м/ч (подача проволоки в «голову» сварочной ванны; неплавящийся электрод — вольфрам марки ЭВТ-15 диаметром 3 мм); расход аргона — 850 л/ч.

В процессе сварки стыков проводили послойный визуальный и измерительный контроль, объем которого составлял 100 %.

После сварки соединения подвергали термической обработке по режиму окончательного высокого отпуска [7]: нагрев до 650 °С, выдержка этой температуры в течение 6 ч, охлаждение с печью до 200 °С, а затем — на воздухе.

Результаты ультразвукового контроля (УЗК) (100 %) и рентгенографического контроля (РГК) (100 %) показали, что в сварных соединениях, подвергнутых термообработке, дефекты отсутствовали. Результаты химического анализа и механических испытаний приведены соответственно в табл. 1 и 2. Полученные данные показали, что механические свойства наплавленного металла полностью соответствуют предъявляемым требованиям. При этом прочностные характеристики  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$  и показатели пластичности  $\delta_5$ ,  $\psi$  выше требуемых. Критическая температура хрупкости, определяемая по ударной вязкости (59 Дж/см<sup>2</sup>) и вязкости волокна в изломе разрушенных образцов (более 50 %), соответствует температуре -7 °С, что также согласуется с существующими нормами [4].

Исследования макро- и микроструктуры сварных соединений показали, что в металле шва и в ЗТВ отсутствуют поры, трещины, несплавления, шлаковые включения и другие дефекты. Для металла шва и ЗТВ после сварки и термообработки в основном характерна бейнитная структура, а также незначительное содержание ферритно-перлитной составляющей. Это обеспечивает хорошие механические свойства сварных соединений и их сопротивляемость развитию трещин.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) основного и наплавленного металла

Объект исследования	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P
Сталь 10ГН2МФА	0,13	0,24	1,29	0,24	1,09	0,48	0,07	0,011	0,019
Сварочная проволока Св-08Г1НМА	0,09	0,66	1,70	0,10	0,68	0,95	0,02	—	—
Металл шва	0,05	0,38	1,31	0,06	0,68	0,60	0,02	0,011	0,019



Таблица 2. Механические свойства металла шва сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА

Объект исследования	Температура испытания, °С	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_n$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Металл шва	+20	<u>447,6...495,7</u> 471,7	<u>628,4... 648,1</u> 638,3	<u>19,7...26,0</u> 22,9	<u>75,1...76,5</u> 75,8
	+350	<u>437,6...454,1</u> 445,9	<u>587,0...591,6</u> 589,3	<u>25,8...29,3</u> 27,55	<u>73,0...73,2</u> 63,1
Сталь 10ГН2МФА	+20	594,1 595,2	694,7 689,2	16,0 17,7	45,9 53,0
Требования по [6] (приложение 5, табл. П5.4)	+20	343	539	16,0	55,0
	+350	294	490	14,0	50,0

Продолжение табл. 2

Объект исследования	KCV (Дж/см <sup>2</sup> ) при температуре, °С				Критическая температура хрупкости, °С
	+20	0	-10	-20	
Металл шва	<u>206,2...215,3</u> 210,9	<u>43,4...146,1</u> 90,4	<u>36,3...73,8</u> 59,1	<u>30,7...41,6</u> 36,2	-7
Сталь 10ГН2МФА	—	—	—	—	—
Требования по [6] (приложение 5, табл. П5.4)	—	—	—	—	-10...+15

Таким образом, результаты предварительных испытаний проволоки Св-08Г1НМА свидетельствуют о высоком качестве и наличии требуемых механических свойств сварных соединений стали 10ГН2МФА, полученных ААрДС.

Для проведения аттестационных испытаний сварочной проволоки Св-08Г1НМА на Южно-Украинской АЭС был подготовлен кольцевой стык с наружным диаметром 990 мм с толщиной стенки 70 мм из плакированной стали 10ГН2МФА.

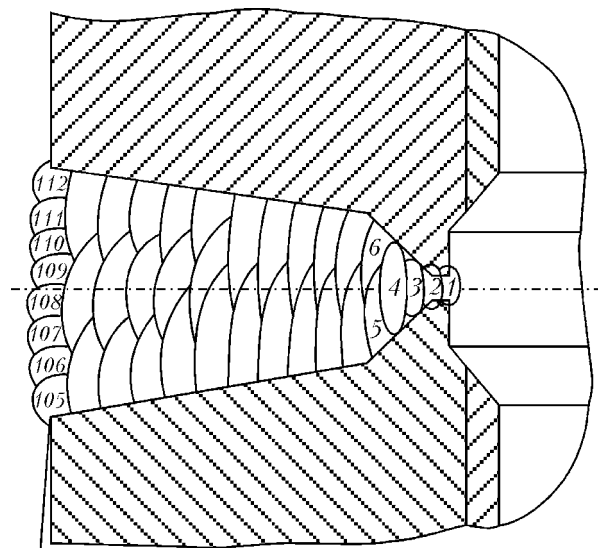
Форма разделки кромок соответствовала стандартной (см. рис. 1). Для сварки применяли специализированную сварочную аппаратуру «Autotig 600РС» французской фирмы «Polysoude» (рис. 2). Предварительный подогрев соединений перед сваркой проводили до температуры 150...200 °С со скоростью не более 150 °С/ч с применением установки «Стандарт Европа 82/6» (фирма «Велдотерм»). При выполнении корневого шва способом ААрДС использовали вольфрамовый электрод марки ЭВТ-15 диаметром 3 мм с углом заточки

30°; подачу сварочной проволоки осуществляли в «хвост» ванны, благодаря чему обеспечивался требуемый провар и обратное формование металла корневого шва.

Режимы сварки корневого шва и последующих слоев при заполнении разделки приведены в табл. 3. При заполнении разделки сварочная проволока подавалась в «голову» сварочной ванны. Порядок раскладки валиков при сварке стыка показан на рис. 3. Перекрытие начала и конца прохода составляло 20... 25 мм. В процессе заполнения разделки выполняли зачистку поверхности металла шва металлической щеткой и осуществляли внешний осмотр каждого прохода. По окончании сварки



Рис. 2. Общий вид аппарата «Autotig 600РС» французской фирмы «Polysoude», предназначенного для сварки контрольного кольцевого стыка



Линия зачистки усиления шва

Рис. 3. Схема раскладки валиков при разделке горизонтального стыка натурной модели сварного соединения ГЦТ Ду 850: 1 — валик корневого прохода; 2 — слой разглаживания; 3, 4 — корневого шов; 5–8 — промежуточный слой заполнения; 9–104 — слой основного заполнения; 105–112 — слой усиления шва

Таблица 3. Режимы ААрДС при заполнении стандартной разделки кромок проволокой диаметром 0,9 мм

Порядок заполнения стандартной разделки по рис. 3	Параметры сварки				
	$I_{св}, А$	$U_{д}, В$	$v_{св}, мм/мин$	$v_{пр}, мм/мин$	Время, мкс
Первый корневой проход (1)	150/120	9,5	80	880/360 (в «хвост» ванны)	100/100
Слой разглаживания (2)	160/90	10	86	—	100/100
Третий корневой проход (3)*	220/130	11,5	91	2000/1000 (в «голову» ванны)	225/275
Четвертый корневой проход (4)	250/150	11,5	89	2600/1300	225/275
Четвертый слой заполнения (5-8)	300/180	11,5	89	3400/1620	225/275
Слой основного заполнения (9-104)	340/200	12	110	3200/1620	225/275
Слой усиления шва (105-112)	260/110	11,15	80,3	1520/1000	175/325

Примечания. 1. В числителе приведены данные, полученные в импульсе тока, в знаменателе — в паузе. 2. Расход аргона — 20...25 л/мин. 3. Звездочкой обозначена подача проволоки в «голову» ванны на проходах от 3 до 112.

стыка был проведен термический «отдых» при температуре 150 °С в течение 8 ч (в соответствии с [7]).

Контроль (100 %) сварных соединений осуществляли методами УЗК, РГК и капиллярного контроля.

После неразрушающего контроля качества сваренный стык подвергали термообработке по режиму окончательного высокого отпуска при температуре 650 °С в течение 6 ч.

В соответствии с «Программой аттестационных испытаний сварочной проволоки Св-08Г1НМА для автоматической аргодуговой сварки элементов ГЦТ Ду 850 из стали 10ГН2МФА» из сваренного стыка отбирали пробы и вырезали заготовки образцов для изучения физико-механических свойств металла шва и сварных соединений и определения критической температуры хрупкости металла шва, а также шлифы для металлографических исследований.

Исследования распределения легирующих элементов по высоте металла шва сварного соединения стали 10ГН2МФА, полученного ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА, показали, что наплавленный металл имеет равномерный

химический состав по всей площади поперечного сечения шва.

Как видно из рис. 4, механические свойства металла шва при комнатной и рабочих температурах полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к металлу шва, выполненного ААрДС [6]. Результаты испытаний механических свойств сварных соединений стали 10ГН2МФА свидетельствуют о том, что прочностные характеристики и показатели пластичности сварных соединений превышают аналогичные характеристики основного металла. Разрушение всех образцов сварных соединений происходило по основному металлу на расстоянии не менее 8 мм от линии сплавления.

Угол загиба испытываемых образцов сварных соединений (сечение 35×45 мм) составляет не менее 120°, что выше требуемых значений (согласно [6] он должен быть не ниже 40°). Следует отметить, что испытываемые образцы при этом не только не разрушились, но и не имели трещин.

Определение критической температуры хрупкости металла шва осуществляли в соответствии с [12] при испытании металла шва на ударный изгиб образцов Шарпи с V-образным острым надрезом (тип IX по ГОСТ 6996-66). Результаты этих испытаний, представленные на рис. 5 и 6, являются исходной информацией для определения

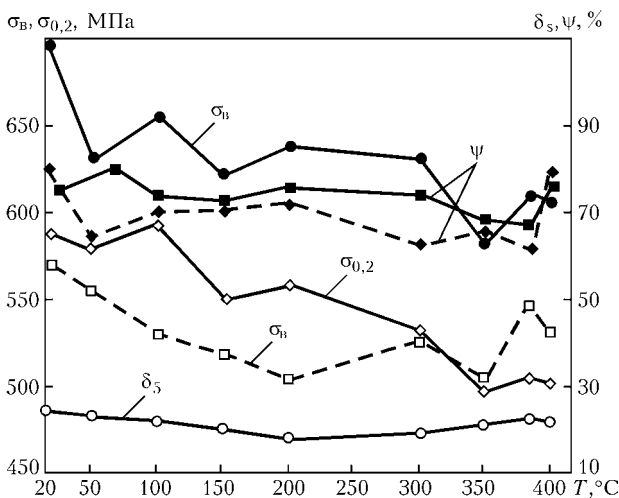


Рис. 4. Механические свойства металла шва (сплошные кривые) и сварных соединений стали 10ГН2МФА (штриховые), полученных способом ААрДС с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА при различных температурах испытания соединения

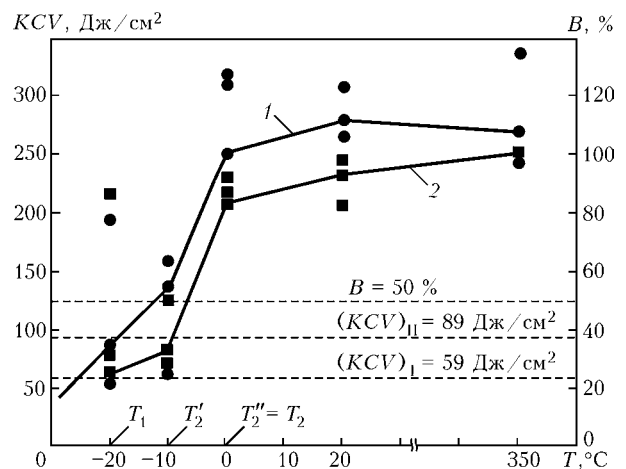


Рис. 5. Влияние температуры испытаний металла шва на его ударную вязкость KCV (1) и количество вязкого волокна B (2): ●, ■ — экспериментальные точки; остальные обозначения см. в работе [12]

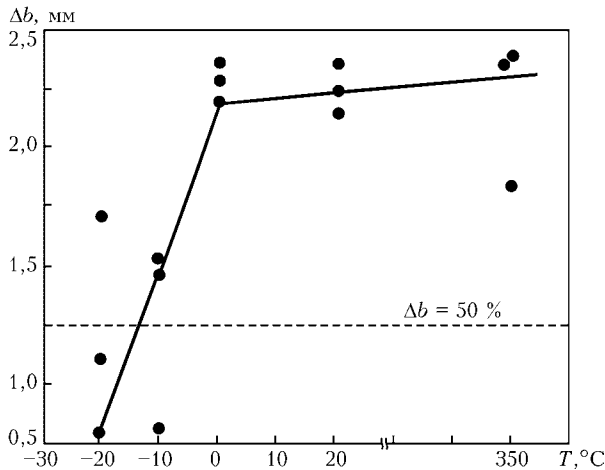


Рис. 6. Влияние температуры испытания на поперечное расширение  $\Delta b$  ударных образцов

критической температуры хрупкости  $T_k$ . В качестве последней принимают температуру, для которой выполняются следующие условия:

при  $T_k$  среднearифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже  $59 \text{ Дж/см}^2$ , а минимальное — не ниже 70 % указанного, т. е. не менее  $41,3 \text{ Дж/см}^2$ ;

при  $T_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  среднearифметическое значение ударной вязкости должно составлять не менее  $89 \text{ Дж/см}^2$ , а минимальное — не ниже 70 % указанного, т. е. не ниже  $62,3 \text{ Дж/см}^2$ ; минимальное значение вязкой составляющей в изломе должно быть не ниже 50 %. Тогда на основании расчета, рекомендуемого в работе [12], температура  $T_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$  (см. рис. 5) принимается в качестве  $T_k$ .

Таким образом,  $T_k$  и механические свойства металла шва и сварных соединений стали 10ГН2МФА, полученных ААрДС с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА, удовлетворяют требованиям, изложенным в [6].

Исследования макроструктуры выполняли в соответствии с работой [6], для чего использовали

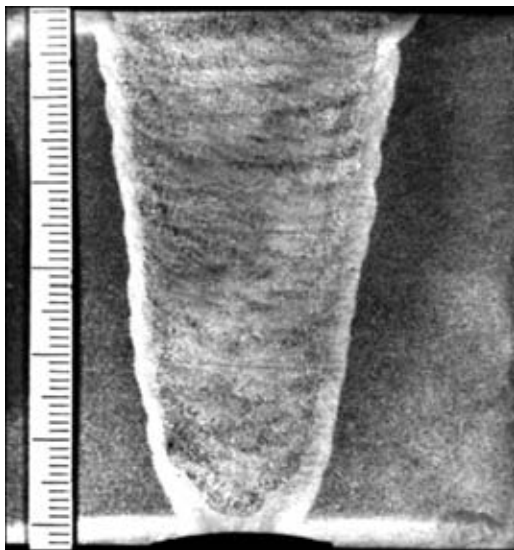


Рис. 7. Макроструктура ( $\times 2,2$ ) контрольного сварного соединения элементов ГЦТ Ду 850, полученного ААрДС с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА

темплеты, вырезанные поперек сварного соединения. Изучали слоистое строение металла шва для выявления межслойных и межваликовых дефектов, а также кристаллическую макроструктуру металла швов для оценки их сплошности и однородности. Анализ макроструктуры металла сварного соединения на рис. 7 показал, что в металле шва валики имеют однородное строение и приблизительно одинаковое сечение, а в ЗТВ — постоянную ширину по всей высоте шва. Это дает основание считать, что режим сварки на протяжении выполнения всего соединения был стабильный, дефектов между валиками и между слоями в металле шва, а также в зоне сплавления не выявлено, металл шва плотный. Дефектов в виде трещин, пор, недопустимых скоплений шлаковых включений и непроваров не обнаружено.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что металл швов и ЗТВ удовлетворяет требованиям, предъявляемым к качеству сварных соединений.

При исследовании микроструктуры металла сварного соединения обращает внимание высокая чистота по неметаллическим включениям. Имеющиеся неметаллические включения типа сложных оксисульфидов марганца отличаются мелкой дисперсностью (менее  $0,01 \text{ мм}$ ) и являются одиночными. Структура металла шва состоит из отпущенного бейнита и ферритной составляющей, для которой характерна мелкозернистость (размер зерна можно оценить баллом № 8–9).

В микроструктуре металла ЗТВ вблизи границы сплавления сварного соединения участок крупного зерна практически отсутствует. Это объясняется тем, что при многопроходной сварке металл ЗТВ возле границы сплавления при каждом проходе подвергается термическому воздействию (нормализации) и отпуску при выполнении последующего прохода. Как правило, на этих участках формируется мелкодисперсная бейнитно-ферритная структура. По мере удаления от границы сплавления размер зерна несколько уменьшается, структура металла представляет собой мелкодисперсный бейнит. Затем ЗТВ плавно переходит в основной металл, структура которого представляет собой бейнит и ферритно-карбидную составляющую.

Как видно из рис. 8, металл шва имеет твердость  $HV 225...230$ , характерную для структуры отпущенного бейнита. Твердость металла ЗТВ возле границы сплавления несколько повышается (до  $HV 240...245$ ), а по мере удаления от границы сплавления — снижается до уровня твердости основного металла —  $HV 185$ .

Из приведенных данных видно, что характер структуры металла шва и ЗТВ сварных соединений стали 10ГН2МФА хорошо согласуется с показателями распределения твердости и механическими характеристиками наплавленного металла и сварных соединений.

Таким образом, результаты выполненных исследований показали, что сварные соединения стали 10ГН2МФА, выполненные ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА, имеют физико-механические свойства, полностью отвечающие

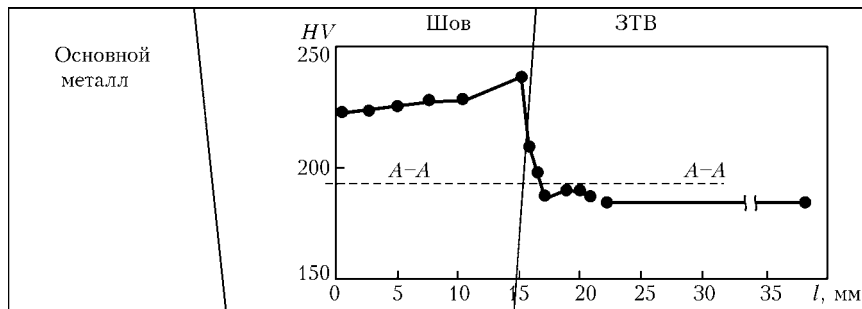


Рис. 8. Распределение твердости в контрольном сварном соединении стали 10ГН2МФА, полученном способом ААрДС с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА, в зависимости от расстояния  $l$  от центра шва (пунктиром показана линия измерения твердости)

предъявляемым требованиям. На основании полученных результатов принято техническое решение (ТР-М.1.2.3.4.03.030-02) о возможности применения сварочной проволоки Св-08Г1НМА для ААрДС элементов ГЦТ Ду 850 из плакированной стали 10ГН2МФА.

Для практической реализации ААрДС с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА для соединения элементов ГЦТ Ду 850 при замене ПГ необходимо осуществить в установленном порядке производственную аттестацию предложенной технологии.

## Выводы

1. Для соединений элементов ГЦТ Ду 850 из стали 10ГН2МФА с патрубками ПГ горизонтальными швами на вертикальной плоскости рекомендована многопроходная ААрДС с использованием сварочной проволоки диаметром 0,8...0,9 мм.

2. Для многопроходной ААрДС стали 10ГН2МФА предложена, испытана и аттестована сварочная проволока Св-08Г1НМА производства фирмы «Кродекс» (Украина).

3. Металл шва, полученный ААрДС с применением проволоки Св-08Г1НМА, имеет требуемые физико-механические свойства и необходимый уровень критической температуры хрупкости металла шва.

4. При использовании ААрДС в стандартную разделку для соединения элементов ГЦТ Ду 850 следует осуществлять в установленном порядке производственную аттестацию предложенной технологии.

1. *Некоторые* актуальные вопросы оценки прочности и ресурса элементов ответственного оборудования АЭС при термосиловом нагружении / В. В. Харченко, Г. В. Степа-

нов, С. В. Романов и др. // Пробл. прочности. — 2004. — № 1. — С. 140–146.

2. Мелехов Р. К., Похмурский В. И. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. — К.: Наук. думка, 2003. — 440 с.
3. Куран Р. И., Цыба В. И., Царюк А. К. Термообработка сварных соединений главного циркуляционного трубопровода Ду 850 при замене парогенераторов ПГВ-1000 М на Южно-Украинской АЭС // Сварщик. — 2004. — № 1. — С. 32–34.
4. Свойства сварных соединений трубопровода Ду 850 мм главного циркуляционного контура АЭС, выполненных автоматической аргодуговой сваркой / С. А. Белкин, И. В. Иванова, М. М. Борисенко и др. // Энергет. стр-во. — 1992. — № 5. — С. 50–55.
5. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 169 с.
6. ПНАЭ Г-7-010-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 124 с.
7. ПНАЭ Г-7-009-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 190 с.
8. Полосков С. И., Букаров В. А., Ищенко Ю. С. Особенности заполнения разделки (наплавки) при автоматической орбитальной сварке неповоротных стыков труб // Свароч. пр-во. — 2003. — № 8. — С. 3–11.
9. Полосков С. И., Ищенко Ю. С., Букаров В. А. Минимизация вероятности образования наружных дефектов швов в процессе автоматической орбитальной сварки // Там же. — 2003. — № 10. — С. 6–13.
10. Полосков С. И., Букаров В. А., Ищенко Ю. С. Особенности управления формированием корня шва при орбитальной сварке неповоротных труб // Там же. — 2003. — № 4. — С. 3–10.
11. Автоматическая сварка трубопровода главного циркуляционного контура на АЭС с аппаратами ВВЭР-440 / М. И. Лоскутов, С. А. Белкин, В. В. Шефель и др. // Энергет. стр-во. — 1976. — № 7. — С. 7–10.
12. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭУ. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.

It is recommended to use the tested and certified method of automatic argon-arc welding with 0.8-0.9 mm filler wire instead of manual welding to produce sound joints between elements of the main circulation pipeline and branch pipes of the steam generator. The suggested process allows reduction in labour consumption and welding operation cycle, provides high and consistent quality of welded joints, and makes it possible to decrease the dose of the radiation effect on personnel performing welding operations.

Поступила в редакцию 15.04.2005