



РАЗРАБОТКА И АТТЕСТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ААрДС В УЗКУЮ РАЗДЕЛКУ ЭЛЕМЕНТОВ ГЦТ Ду850 НА АЭС

А. К. ЦАРЮК, В. Ю. СКУЛЬСКИЙ, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
И. Л. КАСПЕРОВИЧ, А. И. БЫВАЛЬКЕВИЧ, Т. В. ОСТАШКО, В. В. ЖУКОВ,
С. Н. ДУДКИН, Н. А. ИВАНОВ, инженеры (ОП «Атомремонтсервис» НАЭК «Энергоатом», г. Славутич),
А. П. МИРОШНИЧЕНКО, Н. В. НЕМЛЕЙ, А. В. БАЖУКОВ, инженеры
(ОП «Южно-Украинская АЭС» НАЭК «Энергоатом», г. Южно-Украинск)

Для соединения элементов главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду850 из плакированной стали 10ГН2МФА с патрубками парогенераторов применена автоматическая аргонодуговая сварка (ААрДС) в узкую разделку в смеси 70 % He + 30 % Ar с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА диаметром 0,8...0,9 мм. Предложенная технология успешно прошла исследовательскую и производственную аттестацию, согласована с Государственной инспекцией Государственного комитета по ядерному регулированию Украины и рекомендована для выполнения соединений элементов ГЦТ Ду850 при замене парогенераторов на АЭС. Технология ААрДС в узкую разделку позволит существенно снизить трудоемкость сварочных работ, повысить производительность, уменьшить количество наплавленного металла и уровень остаточных сварочных напряжений, а также обеспечит высокое качество сварных соединений и значительно снизит дозу радиационного воздействия на персонал при выполнении сварочных работ.

Ключевые слова: автоматическая аргонодуговая сварка, технология сварки, узкая разделка кромок, неплавящийся электрод, гелий, аргон, металл шва, сварные соединения, физико-механические свойства металла, парогенератор, трубопроводы

Как показал анализ существующих способов механизированной сварки, для соединения элементов главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) с патрубками парогенератора (ПГ) наиболее эффективным является применение автоматической аргонодуговой сварки (ААрДС) [1]. При выполнении ААрДС в стандартную разделку кромок рекомендуется использовать присадочную проволоку Св-08Г1НМА (ТУ 14-15-373-95). При-

менение стандартной [2] разделки кромок (рис. 1, а) обусловлено отсутствием специализированного оборудования для механической обработки кромок патрубков ПГ под узкую разделку в условиях АЭС (завод-изготовитель поставляет ПГ со стандартной разделкой кромок на патрубках). Благодаря разработке в настоящее время специализированного портативного оборудования для механической обработки появилась реальная возможность применения узкой разделки кромок (рис. 1, б) при соединении элементов ГЦТ с патрубками ПГ. Осуществление ААрДС в узкую разделку кромок позволит существенно снизить трудоемкость сварочных работ, повысить их произ-

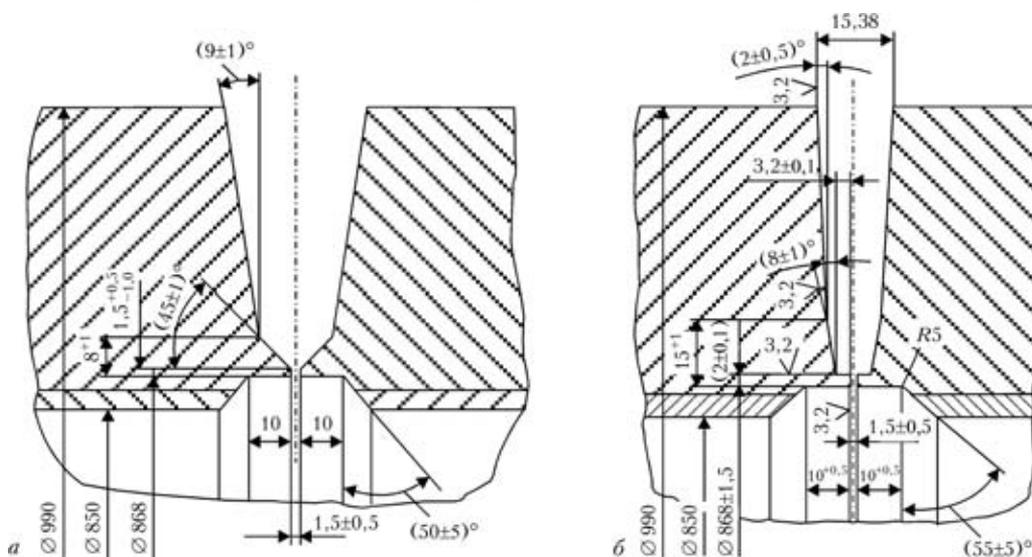


Рис. 1. Схемы стандартной (а) и узкой (б) разделки кромок соединений, полученных ААрДС неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки

водительность, уменьшить количество наплавленного металла и уровень остаточных сварочных напряжений, при этом обеспечит высокое качество сварных соединений и значительно снизит дозу радиационного воздействия на персонал при выполнении сварочных работ. Разработка и аттестация технологии ААрДС в узкую разделку кромок при замене ПГ является важной и актуальной задачей для решения вопросов продления ресурса оборудования АЭС Украины.

Проектом TACIS U2.02/96 «Применение автоматической сварки в узкую разделку при замене парогенераторов» предложена французская технология ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ag трубопроводов Ду850, а также выполнена поставка аппаратуры для сварки. Однако рекомендации указанного проекта относятся исключительно к технике сварки в случае использования поставленного сварочного оборудования. Что же касается свойств сварных соединений, выполненных ААрДС в узкую разделку, то сведения по этому вопросу отсутствуют. Кроме того, использование ААрДС в узкую разделку не предусмотрено правилами и нормами, действующими в атомной энергетике. В связи с этим для внедрения предложенной разработки необходимо провести комплекс работ по аттестационным испытаниям сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС в узкую разделку кромку, в соответствии с требованиями к применению и аттестации новых технологий и материалов [3].

Предварительные исследования. Для получения исходных данных для отработки технологии ААрДС в узкую разделку кромок и оценки физико-механических свойств сварных соединений проведены предварительные исследования. С этой целью сваривали кольцевые стыковые образцы с узкой разделкой кромок (см. рис. 1, б) элементов ГЦТ Ду850 из стали 10ГН2МФА диаметром 990 мм с толщиной стенки 70 мм. Сварку выполняли при вертикальном расположении оси соединения (сварка горизонтального шва на вертикальной плоскости). В качестве присадочного материала при ААрДС в смеси 70 % He + 30 % Ag использовали сварочную проволоку Св-08Г1НМА (ТУ 14-1-2869-79) диаметром 0,9 мм [1].

Особенностью сварки неплавящимся электродом в смеси гелия и аргона [4, 5] является изменение глубины проплавления. Так, при сварке в смеси 70 % He + 30 % Ag глубина проплавления больше, чем при сварке в чистом аргоне или смеси 70 % Ag + 30 % He. Это обусловлено более высоким потенциалом ионизации гелия ($U_1 = 24,5$ В) по сравнению с аналогичным показателем у аргона ($U_1 = 15,7$ В). Значительное (до 70 %) содержание гелия в смеси приводит к увеличению напряжения на дуге, в результате чего

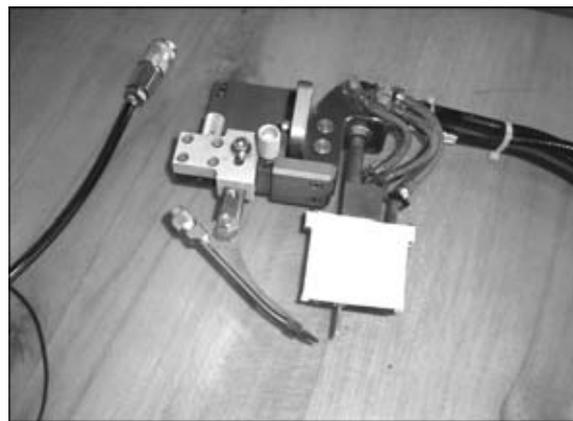


Рис. 2. Общий вид горелки для ААрДС в узкую разделку кромок

повышается температура сварочной ванны. При этом увеличивается проплавление основного металла. Поэтому для гарантированного сплавления наплавленного металла с кромками узкой разделки целесообразно выполнять ААрДС в смеси 70 % He + 30 % Ag. При ААрДС в стандартную разделку кромок (рис. 1, а) такая смесь не может быть эффективной из-за плохой защиты сварочной ванны от окружающего воздуха. При сварке в узкую разделку свариваемые кромки непосредственно способствуют хорошей защите сварочной ванны. Кроме того, для обеспечения надежной и эффективной газовой защиты сварочной ванны при ААрДС кольцевых стыковых соединений из стали 10ГН2МФА применяли специальную сварочную горелку для сварки в узкую разделку кромок (рис. 2). Сварку выполняли с предварительным и сопутствующим подогревом до 170 °С [2].

ААрДС корневой части выполняли с минимальным осевым зазором с подачей сварочной проволоки в хвост ванны, что обеспечило требуемые провар и обратное формирование корневого шва. Режим сварки был следующим: сварочный ток $I_{св} = 150$ А; напряжение на дуге $U_d = 11$ В; скорость сварки $v_{св} = 6,0$ м/ч; скорость подачи присадочной проволоки $v_{пр} = 152$ м/ч; расход смеси защитного газа 1000...1200 л/ч. Режимы сварки при заполнении разделки выбирали с учетом обеспечения надежного сплавления шва со стенками разделки и формирования валиков, а также в зависимости от диаметра изделия, на котором выполняется данный слой. В результате отработки технологии установлены оптимальные режимы ААрДС в узкую разделку кромок кольцевых толстостенных стыков Ду850 из стали 10ГН2МФА (табл. 1).

В процессе сварки стыков проводили послойный 100%-й визуальный и измерительный контроль (ВИК). После заполнения корневой части разделки на высоту 8...10 мм осуществляли термический «отдых» при температуре 150 °С продолжительностью 8 ч с последующим ВИК и рентгенографическим контролем (РГК), а также капиллярным контролем (КК) изнутри. После за-



Таблица 1. Режимы сварки кольцевых стыковых соединений из стали 10ГН2МФА

№ прохода	№ программы	Время, мкс	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость подачи сварочной проволоки, мм/мин	Скорость сварки, мм/мин
1	1	225/275	150/50	11	2540/1000	99
2	2	125/375	160/90	10	Без сварочной проволоки	86
		Сплавление нижней кромки (изогнутый электрод направлен вниз)				
3	3	125/375	175/100	10	Без сварочной проволоки	86
		Сплавление верхней кромки (изогнутый электрод направлен вверх)				
4	4	225/275	220/130	11,5	2000/1000	91
5	5	225/275	250/150	11,5	2600/1300	89
6	6	225/275	300/180	11,5	3400/1620	89
7–11	7	225/275	350/170	12,1	2100/920	84
		Ширина шва 7,5...8,5 мм				
12–29	8	225/275	360/180	11,5	2290/1020	84
		Ширина шва 8,5...9,5 мм				
30–34	12	225/275	370/190	11,5	2450/1150	84
		Ширина шва 9,5...10,5 мм				
35–43	13	225/275	330/140	11,5	2050/850	89
		Финишный слой (последние 10...15 % разделки кромки)				
44–45	14	175/325	260/110	11,5	1520/760	89
		Облицовочные слои				

Примечание. В числителе приведены значения показателей в импульсе, в знаменателе — в паузе.

полнения 50 % разделки и термического «отдыха» вновь выполняли 100%-й ВИК и РГК. По окончании заполнения разделки и последующего термического «отдыха» проводили 100 %-й ВИК, КК, РГК и ультразвуковой контроль (УЗК).

После сварки и контроля сварные соединения подвергали термической обработке по режиму окончательного высокого отпуска [2]: нагрев до 650 °С, выдержка при 650 °С в течение 8 ч, охлаждение до 450 °С со скоростью 40 °С/ч, до температуры 250 °С со скоростью не более 80 °С/ч. Дальнейшее охлаждение до температуры окружающей среды происходило под слоем изоляции.

После проведения термической обработки выполняли 100%-й ВИК, КК, РГК и УЗК, а также

ВИК, КК наплавки аустенитного слоя и УЗК наплавки (на отслоение плакировки). Результаты контроля показали, что в термообработанных сварных соединениях дефекты отсутствуют.

Из выполненных стыков сварных соединений стали 10ГН2МФА вырезали заготовки образцов для определения химического состава, механических свойств и структуры металла шва. Результаты спектрального анализа металла шва (через 14...15 мм начиная от корня шва) с оценкой распределения легирующих элементов по высоте соединения приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что металл шва сварного стыка отличается равномерным химическим составом по всей высоте сварного соединения. Весьма интересны данные

Таблица 2. Химический состав (мас. %) сварочной проволоки, основного металла и металла шва сварного соединения стали 10ГН2МФА

Объект исследования	C	Si	Mn	Ni	Mo	V	S	P	[O]	[N]	H _{ост}
Проволока Св-08Г1НМА	0,06	0,40	1,60	0,70	0,80	0,01	—	—	—	—	—
Сталь 10ГН2МФА	0,11	0,24	0,78	1,89	0,52	0,01	0,003	0,010	—	—	—
Часть металла шва:											
корневая	0,098	0,268	1,11	0,85	0,62	0,01	0,009	0,011	0,0032	0,0050	0,22
промежуточная	0,087	0,290	1,17	0,80	0,64	0,01	0,011	0,010			
	0,086	0,288	1,17	0,68	0,64	0,01	0,010	0,010			
	0,081	0,302	1,21	0,72	0,63	0,01	0,010	0,010			
верхняя	0,078	0,305	1,22	0,70	0,63	0,01	0,009	0,011			

Таблица 3. Механические свойства металла шва сварного соединения стали 10ГН2МФА

$T_{исп}, ^\circ C$	$\sigma_b, МПа$	$\sigma_t, МПа$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$
20	447,2...486,7 465,2	568,9...591,6 538,4	27,0...28,0 27,4	75,0...76,6 76,0
350	609,6...638,8 626,0	473,0...497,6 488,8	18,8...21,3 20,0	65,7...72,0 69,2

Примечание. В знаменателе приведены средние значения, полученные после испытаний трех образцов.

газового анализа о содержании кислорода. Оно оказалось очень низким (0,0032 мас. %), что свидетельствует о минимальном содержании неметаллических включений в металле шва и его высокой ударной вязкости и объясняется рафинирующим воздействием гелия на расплавленный металл. Известно, что при продувке жидкого металла гелием извлекаются растворенные в металле газы и удаляются в виде шлака неметаллические примеси [4, 5].

Результаты выполненных механических испытаний наплавленного металла при комнатной температуре и 350 °С представлены в табл. 3. Как видно из таблицы, прочностные характеристики и показатели пластичности металла шва при комнатной и рабочей температурах значительно выше существующих требований [6].

Определение критической температуры хрупкости металла шва осуществляли путем испытаний на ударный изгиб образцов Шарпи с V-образным острым надрезом по центру шва (тип IX по ГОСТ 6996–66). Результаты испытания на ударный изгиб приведены в табл. 4. На рис. 3 показано изменение ударной вязкости (KCV) и доли вязкого волокна B в изломе в зависимости от температуры испытания. В соответствии с работой [7] в качестве критической температуры T_K хрупкости принимают температуру, для которой выполняются следующие условия:

при T_K среднеарифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже 59 Дж/см², а минимальное — не ниже 70 % указанного, т. е. не менее 41,3 Дж/см²;

при $T_K + 30$ °С среднеарифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже 89 Дж/см², а минимальное — не ниже 70 % указанного, т. е. не менее 62,3 Дж/см². Минимальное значение вязкой составляющей в изломе при этом должно составлять не менее 50 %.

При рассмотрении полученных данных видно, что, как следует из работы [7], критическая температура хрупкости соответствует -72 °С.

Таким образом, механические свойства и критическая температура хрупкости металла шва сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС в смеси 70 % He + 30 % Ar в узкую

Таблица 4. Результаты испытаний на ударный изгиб образцов Шарпи с V-образным острым надрезом

№ образца	$T_{исп}, ^\circ C$	KCV, Дж/см ²	KCV, Дж/см ² (среднее значение)	B, %
1	20	304,8	292,8	70
2		284,3		89
3		289,4		85
4	-20	299,6	301,5	89
5		303,5		88
6		301,4		98
7	-40	277,0	253,4	86
8		199,6		87
9		283,7		81
10	-60	225,6	217,8	75
11		174,0		85
12		254,0		88
13	-80	31,6	57,0	21
14		51,2		17
15		88,2		33

разделку, вполне удовлетворяют существующим требованиям [6].

Исследования макро- (рис. 4) и микроструктуры сварных соединений показали, что в металле шва отсутствуют поры, трещины, несплавления, шлаковые включения и другие дефекты. Наплавленный металл имеет бейнитную структуру, которая наряду с требуемыми механическими свойствами отличается высокой вязкостью и трещиностойкостью. Неметаллические включения в металле шва мелкодисперсные и имеют произвольное расположение. Анализ металла ЗТВ показал, что его структура характеризуется в основном бейнитной составляющей. Ферритно-перлитная составляющая почти всегда располагается на границе раздела фаз, причем содержание ее незначительное. Металл шва имеет твердость HV 240...250, что характерно для структуры отпущенного бей-

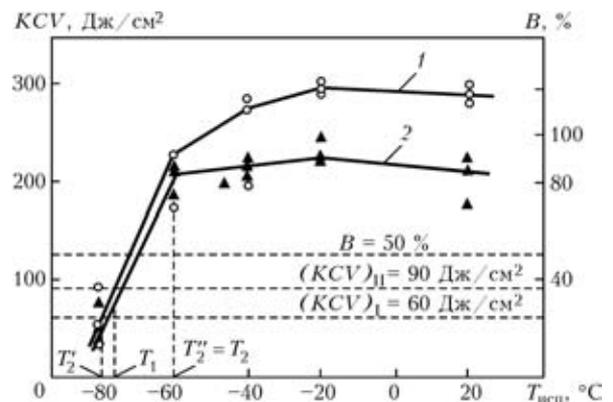


Рис. 3. Влияние температуры испытаний металла шва сварных соединений, выполненных ААрДС в узкую разделку, на ударную вязкость KCV (1) и долю вязкого волокна B в изломе (2); O, ▲ — экспериментальные точки; остальные обозначения см. в работе [7]

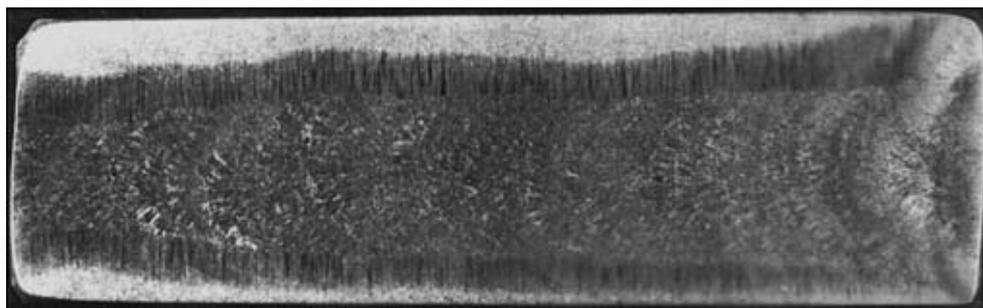


Рис. 4. Макроструктура (X1,7) металла шва сварного соединения стали 10ГН2МФА, полученного ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА

Таблица 5. Механические свойства металла шва и сварных соединений стали 10ГН2МФА, полученных ААрДС с использованием сварочной проволоки Св-08Г1НМА

Объект исследования	$T_{исп}, ^\circ C$	$\sigma_b, МПа$	$\sigma_t, МПа$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$
Шов	20	$\frac{66,4...71,8}{69,0}$	$\frac{58,8...63,9}{61,5}$	$\frac{23,0...25,6}{24,2}$	$\frac{71,7...74,6}{73,3}$
	350	$\frac{59,5...64,4}{61,7}$	$\frac{49,0...56,4}{52,2}$	$\frac{21,3...22,4}{22,0}$	$\frac{69,8...71,7}{70,8}$
Сварное соединение	20	$\frac{55,3...56,0}{55,6}$	—	—	$\frac{75,5...77,9}{76,9}$
	350	$\frac{50,3...50,9}{50,5}$	—	—	$\frac{74,9...76,1}{75,3}$

По мере удаления от линии сплавления твердость несколько уменьшается ($HV\ 225...235$). Твердость основного металла составляет $HV\ 215...220$. Провалов по твердости в металле ЗТВ не наблюдается. Из полученных данных видно, что характер микроструктуры металла шва и ЗТВ сварных соединений стали 10ГН2МФА хорошо согласуется с данными о распределении твердости и механических свойствах металла шва.

Таким образом, результаты предварительных испытаний свидетельствуют о высоком качестве и наличии требуемых механических свойств сварных соединений стали 10ГН2МФА, полученных ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar, и полном соответствии существующим требованиям и нормам [6].

Исследовательская аттестация. Для возможности включения узкой разделки в перечень основных типов сварных соединений [2], полученных ААрДС, необходимо пройти определенные аттестационные испытания, предусмотренные в работе [3].

Для проведения аттестационных испытаний в ОП «Атомремонтсервис» (г. Славутич) подготовлен кольцевой стык с наружным диаметром 990 мм и толщиной стенки 70 мм из плакированной стали 10ГН2МФА. Форма разделки кромок соответствовала представленной на рис. 1, б. Для сварки применяли специализированную сварочную аппаратуру «Autotig 600РС» французской фирмы «Polysoude». Перед сваркой проводили предварительный подогрев соединений 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 подачу сварочной проволоки Св-08Г1НМА диаметром 0,9 мм осуществляли в хвост ванны, благодаря чему обеспечивался требуемый провар и обратное формирование металла корневого шва.

Режимы сварки корневого шва и последующих слоев при заполнении разделки соответствовали указанным в табл. 1. При заполнении разделки кро-

мок сварочную проволоку подавали в голову сварочной ванны. В процессе заполнения разделки выполняли зачистку поверхности металла шва металлической щеткой и осуществляли внешний осмотр каждого прохода. По окончании сварки стыка был проведен термический «отдых» при температуре 150 °С в течение 8 ч (в соответствии с [2]). Осуществляли 100%-й УЗК, РГК и КК сварных соединений. После неразрушающего контроля качества сварной стык подвергали термообработке по режиму окончательного высокого отпуска при температуре 650 °С в течение 6 ч [2, 8].

В соответствии с ПМ-Т. 38.001-04 «Программой аттестационных испытаний сварных соединений трубопроводов Ду850 из стали 10ГН2МФА (плакированной), выполненных ААрДС в узкую разделку» из сваренного стыка отбирали пробы и вырезали заготовки образцов для изучения физико-механических свойств сварных соединений, характеристик сопротивления хрупкому разрушению, показателей циклической прочности, стойкости против межкристаллитной коррозии, а также шлифы для металлографических исследований.

Исследование распределения легирующих элементов по высоте металла шва сварного соединения стали 10ГН2МФА, выполненного ААрДС в узкую разделку в смеси 70 % He + 30 % Ar с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА, показало, что он имеет практически постоянный химический состав (см. табл. 2) по всей высоте поперечного сечения металла шва.

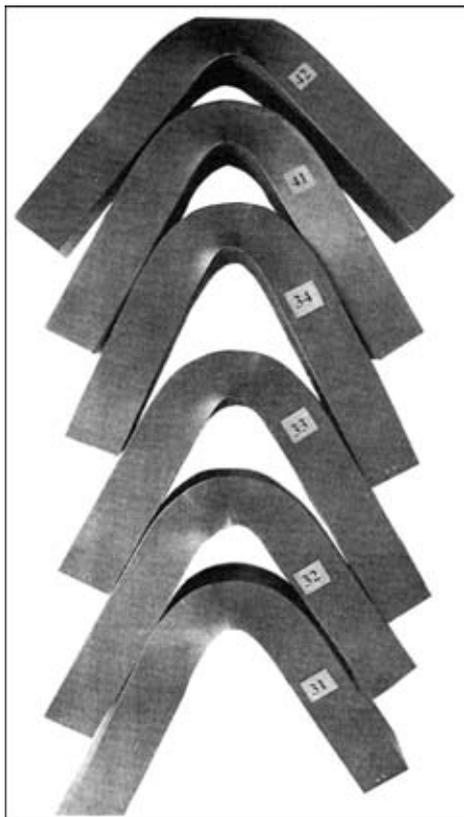


Рис. 5. Вид образцов контрольного соединения после испытаний на статический изгиб

Результаты испытаний механических свойств металла шва и сварного соединения стали 10ГН2МФА (табл. 5) свидетельствуют о том, что прочностные характеристики и показатели пластичности сварных соединений выше, чем у основного металла. Разрушение всех образцов сварных соединений происходило по основному металлу.

Угол загиба испытываемых образцов сварных соединений сечением 35×45 мм составлял не менее 120°, что превышает требуемые значения (согласно [6] он должен быть не ниже 40°). Следует отметить, что испытываемые образцы при этом не только не разрушались, но и не имели трещин (рис. 5).

Определение критической температуры хрупкости металла шва и ЗТВ осуществляли в соответствии с [7] при испытании металла шва на ударный изгиб образцов Шарпи с V-образным острым надрезом по центру шва и по зоне сплавления (тип IX по ГОСТ 6996–66). На основании выполненного расчета критическая температура хрупкости металла шва должна составлять –77 °С, а ЗТВ — ниже –100 °С (рис. 6), что полностью отвечает предъявляемым требованиям [6].

Испытания на малоцикловую усталость проводили в Институте проблем прочности НАН Украины на стандартной универсальной электрогидравлической машине 3201 УЭ-20 при осевом растяжении-сжатии (деформировании) с контролем

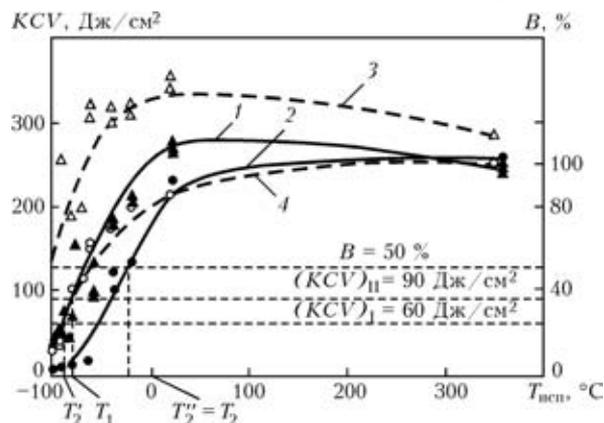


Рис. 6. Влияние температуры испытаний $T_{исп}$ металла контрольного сварного соединения на ударную вязкость KCV (1, 3) и долю вязкого волокна B в изломе (2, 4): сплошные кривые — металл шва; штриховые — ЗТВ; ●, ▲, ○, Δ — экспериментальные точки

амплитуды полной деформации рабочей части образца. Основные геометрические размеры образца были выбраны в соответствии с рекомендациями ГОСТ 25.502–79 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость». Нагружение образцов осуществляли по симметрическому циклу (коэффициент асимметрии цикла деформации $R_\epsilon = -1$), т. е. испытания проводили в жестком режиме. В процессе циклического нагружения образцов продольные деформации задавали и измеряли с помощью специального тензометра. Испытания проводили при частоте циклического нагружения $f = 0,3$ Гц. Критерием циклической долговечности образца в соответствии с [7] принято появление и развитие на поверхности образца трещины усталости длиной от 0,5 до 2,0 мм. При достижении трещины усталости указанной длины образец снимали с испытаний.

На рис. 7 приведены результаты испытаний на малоцикловую усталость сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС в узкую разделку кромок, при комнатной и рабочей температуре, а для сравнения — полученные при испытании основного металла. Из рисунка видно, что как при комнатной, так и при рабочей температуре имеет место незначительное снижение

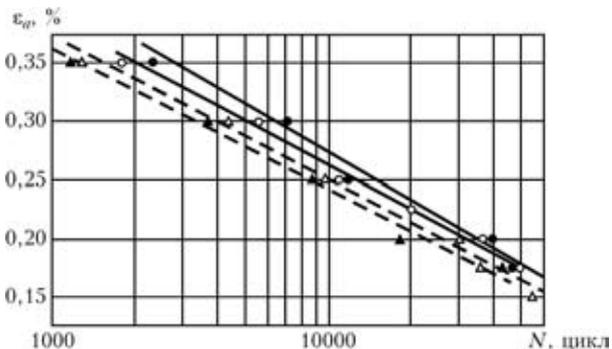


Рис. 7. Кривые усталости основного металла (сплошные кривые) и сварных соединений (штриховые), полученные по результатам испытаний контрольного сварного соединения на малоцикловую усталость: ●, ▲ — 350; ○, Δ — 20 °С

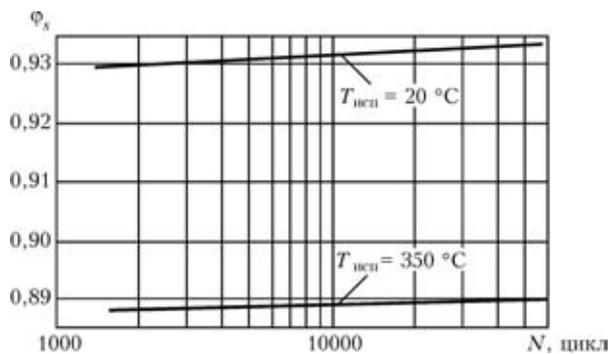


Рис. 8. Кривые изменения коэффициента ϕ_s циклической прочности сварных соединений

амплитуды разрушающей деформации ϵ_a при заданной долговечности сварных соединений в сравнении с основным металлом — сталью 10ГН2МФА. При этом снижение циклической прочности незначительно при длительности испытаний свыше $1 \cdot 10^4$ циклов, а в области меньшей долговечности, где в основном на сопротивление малоциклового усталости оказывают влияние пластические свойства сварных соединений, кривые усталости сварных соединений при 20 и 350 °C расположены близко друг к другу и к кривым основного металла. На рис. 8 приведены кривые изменения коэффициента ϕ_s циклической прочности сварных соединений в зависимости от количества циклов до появления трещины, которые определяли в соответствии с методикой, рекомендуемой в работе [7]. Для исследования диапазона долговечности в интервале от $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^8$ циклов при комнатной температуре минимальное значение $\phi_s = 0,93$, при рабочей температуре $\phi_s = 0,88$. Таким образом результаты исследования малоциклового усталости показали, что сварные соединения стали 10ГН2МФА, выполненные ААрДС в узкую разделку, имеют несущественное (5...7 %) снижение циклической прочности при комнатной температуре и 350 °C по сравнению с основным металлом.

Испытания сварного соединения стали 10ГН2МФА на стойкость против межкристаллитной коррозии проводили согласно ГОСТ 6032–89 по методу АМ без провоцирующего нагрева на образцах типа 1. Выявление межкристаллитной коррозии осуществляли методом загиба на угол 90°. Результаты испытаний полностью удовлетворяли предъявляемым требованиям [6].

Для исследования макроструктуры использовали темплеты, вырезанные поперек сварного соединения. Изучали слоистое строение металла шва для выявления межслойных и межваликовых дефектов, а также его кристаллическую макроструктуру для оценки сплошности и однородности. Анализ макроструктуры металла сварного соединения показал, что в металле шва валики имеют однородное строение и приблизительно одинако-

вое сечение, а в ЗТВ — постоянную ширину по всей высоте шва. Это дает основание считать, что режим сварки на протяжении всего процесса получения сварного соединения был стабильным, дефектов между валиками и слоями в металле шва, а также в зоне сплавления не выявлено, металл шва плотный. Не обнаружено также дефектов в виде трещин, пор, недопустимых скоплений шлаковых включений и непроваров. При исследовании микроструктуры металла сварного соединения обращает внимание очень высокий уровень чистоты по неметаллическим включениям. Имеющиеся неметаллические включения типа сложных оксисульфидов марганца отличаются мелкой (не более 0,001 мм) дисперсностью и являются одиночными. Структура металла шва состоит из отпущенного бейнита и ферритной составляющей, для которой характерна мелкозернистость (размер зерна № 8–9 баллов).

В микроструктуре металла ЗТВ вблизи границы сплавления сварного соединения участки крупного зерна отсутствуют, вместо них формируется мелкодисперсная бейнитно-ферритная структура. По мере удаления от границы сплавления размер зерна несколько уменьшается, структура металла представляет собой мелкодисперсный бейнит.

Металл шва отличается твердостью $HV\ 235 \dots 240$, характерную для структуры отпущенного бейнита. Твердость металла ЗТВ возле границы сплавления несколько повышена (до $HV\ 250 \dots 255$), а по мере удаления от границы сплавления она снижается до уровня твердости основного металла — $HV\ 180 \dots 185$.

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 свидетельствовали о том, что физико-механические свойства, сопротивление хрупкому разрушению, циклическая прочность, коррозионная стойкость, а также данные металлографических исследований сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных ААрДС в узкую разделку с применением сварочной проволоки Св-08Г1НМА, полностью отвечают предъявляемым требованиям.

На основании полученных результатов принято техническое решение ТР-Н.1234.АРС.72–04 о возможности применения ААрДС неплавящимся электродом в узкую разделку кромок при ремонте (монтаже) главных циркуляционных трубопроводов Ду850 энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000.

Производственная аттестация. С целью проверки возможности практического выполнения ААрДС в узкую разделку кромок для соединения

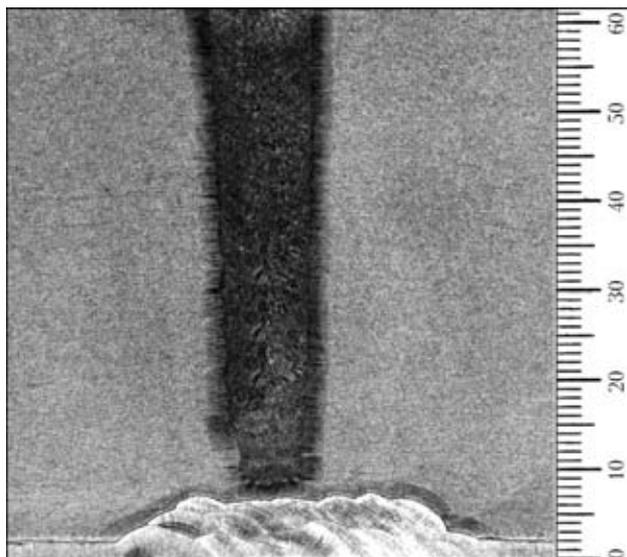


Рис. 9. Макрошлиф контрольного сварного соединения стали 10ГН2МФА, полученного ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar

элементов ГЦТ Ду850 применительно к Южно-Украинской АЭС проведена первичная производственная аттестация технологии выполнения сварных соединений (в аттестации участвовали также сотрудники ОП «Атомремонтсервис» В. Н. Адаменко, В. И. Подъячев, Ф. Ф. Мельник, А. В. Бегун и сотрудники ОП «Южно-Украинская АЭС» С. И. Шмалько и И. Д. Долматов.). В соответствии с разработанной технологической инструкцией по ААрДС в узкую разделку кромок элементов трубопроводов Ду850 из плакированной стали 10ГН2МФА в производственных условиях получен контрольный кольцевой стык обечаек диаметром 990 мм с толщиной стенки 70 мм. Сваренный стык был подвергнут термообработке по режиму, рекомендованному в [5]. Результаты неразрушающего контроля показали высокое качество контрольного сварного соединения. Все применяемые методы 100 %-го контроля (ВИК, травление, КК, УЗК, РГК) подтвердили отсутствие дефектов и соответствие качества сварных соединений существующим требованиям [6].

Разрушающий контроль выполняли на образцах, вырезанных из контрольного сварного соединения. При этом в соответствии с [6] определены прочность сварного соединения, стойкость

против межкристаллитной коррозии, а также проведены испытания на статический изгиб и металлографические исследования.

Результаты разрушающего контроля показали, что контрольное сварное соединение по всем показателям полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям [6]. Вид макрошлифа производственного контрольного сварного соединения стали 10ГН2МФА, полученного ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar, представлен на рис. 9.

Исходя из изложенного выше можно заключить, что для соединения элементов ГЦТ Ду850 из стали 10ГН2МФА с патрубками ПГ рекомендуется ААрДС в узкую разделку кромок в смеси 70 % He + 30 % Ar с применением сварочной проволоки Sv-08Г1НМА диаметром 0,8...0,9 мм. Указанная технология обеспечивает высокое качество и необходимые служебные свойства сварных соединений стали 10ГН2МФА. Разработанная и аттестованная технология ААрДС в узкую разделку кромок согласована с Государственным комитетом по ядерному регулированию Украины и рекомендована для применения на АЭС.

1. *К вопросу* выбора технологии сварки элементов ГЦТ Ду850 при замене парогенераторов ПГВ-1000М на АЭС / А. К. Царюк, В. Ю. Скульский, В. В. Волков, и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 10. — С. 41–47.
2. ПН АЭГ-7-009–89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. — М.: Энергоатомизд, 1990. — 190 с.
3. ПН АЭГ-7-008–89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомизд, 1990. — 169 с.
4. Бродский А. Я. Технология дуговой электросварки в инертной среде. — М.: Машгиз, 1951. — 166 с.
5. Бродский А. Я. Аргодуговая сварка вольфрамовым электродом. — М.: Машгиз, 1956. — 396 с.
6. ПН АЭГ-7-010–89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. — М.: Энергоатомизд, 1990. — 124 с.
7. ПН АЭГ-7-002–89. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомизд, 1989. — 525 с.
8. Куран Р. И., Цыба В. И., Царюк А. К. Термообработка сварных соединений главного циркуляционного трубопровода Ду850 при замене парогенераторов ПГВ-1000М на Южно-Украинской АЭС // Сварщик. — 2004. — № 1. — С. 32–34.

Automatic narrow-gap argon-arc welding in a gas mixture of 70 % He + 30 % Ar, using 0.8-0.9 mm diameter welding wire Sv-08G1NMA, was employed to join elements of the main circulation piping (MCP) Dn850 of clad steel 10GN2MFA to steam generator branch pipes. The technology suggested passed the research and industrial certification to advantage, was approved by the State Inspection Body of the State Nuclear Control Committee of Ukraine, and is recommended for joining the Dn850 MCP elements in replacement of steam generators at NPS. The automatic narrow-gap argon-arc welding technology will allow a substantial reduction of labour intensity in welding operations, increase in productivity, decrease in the amount of deposited metal and level of residual welding stresses, assurance of the high quality of welded joints, and a considerable decrease in a dose of the radiation effect on the personnel performing welding operations.

Поступила в редакцию 06.11.2005,
в окончательном варианте 12.12.2005