



## МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ ШВОВ ТИТАНОМ И БОРОМ ПРИ МНОГОДУГОВОЙ СВАРКЕ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Л. И. ФАЙНБЕРГ, инж., А. А. РЫБАКОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
А. Н. АЛИМОВ, канд. техн. наук (ООО «АРКСЭЛ», г. Донецк),  
Р. РОЗЕРТ, д-р-инж. («Drahtzug Stein Wire & Welding», Германия)

Исследовано микролегирование металла швов титаном и бором при многодуговой сварке труб, которое осуществляется через порошковую проволоку, установленную на одной из дуг. Особенностью этого процесса является применение нейтральных и слабокислых флюсов вместо основных, что улучшает качество формирования швов при повышенной скорости. Определено оптимальное содержание титана и бора, обеспечивающее высокую ударную вязкость металла шва. Производственные испытания процесса сварки с использованием разработанной порошковой проволоки марки ПП-АСФ-1 дали положительные результаты.

*Ключевые слова:* газонефтепроводные трубы, многодуговая сварка, порошковая проволока, микролегирование шва, титан, бор, плавеный нейтральный флюс, основной агломерированный флюс, ударная вязкость

В связи с ростом требований к газонефтепроводным трубам большого диаметра по-прежнему актуальной остается задача повышения ударной вязкости металла швов, выполненных многодуговой сваркой под флюсом. Эффективным способом ее решения является микролегирование швов титаном и бором, что улучшает структуру металла, способствуя образованию игольчатого феррита внутри зерен и подавлению выделений первичного феррита по их границам. Для этой цели за рубежом применяют агломерированные флюсы алюминатно-основного типа АВ (EN 760), которые ограничивают содержание кислорода в швах, в сочетании со сварочной проволокой типа S3Mo-TiB или с порошковой проволокой (ПП), легированной титаном и бором. Разновидностью второго способа является более экономичный процесс FMI (Fluxocord-Micro-Injection), при котором легирование многодугового шва осуществляется посредством ПП (например, FLUX-OCORD 35.25-3D или 35.25-4D), устанавливаемой на одной из дуг [1–5]. Недостатками этих способов являются высокая стоимость импортных агломерированных флюсов и относительно низкие технологические свойства большинства из них при сварке труб толщиной менее 14 мм (узкие швы с высоким усилением).

Цель настоящей работы — совершенствование процесса сварки за счет использования более экономичных и технологичных нейтральных плавеных флюсов типа АН-67 или АН-47 с обеспечением существенного повышения ударной вяз-

кости ( $KCV^{20} = 60...80$  Дж/см<sup>2</sup>) металла швов на трубах текущего производства, выполненных под этими флюсами.

Известно [6–10], что необходимым условием получения металла шва с высоким уровнем ударной вязкости является баланс титана, бора, кислорода, азота, а также активных раскислителей — алюминия, кальция, редкоземельных металлов. Подавление формирования первичного феррита по границам зерен обеспечивается наличием бора, оставшегося после образования оксида  $B_2O_3$  и нитрида BN. Зародышами для формирования игольчатого феррита внутри аустенитного зерна в основном являются дисперсные частицы оксида титана TiO, образовавшиеся в результате соединения титана со свободным кислородом.

При сварке под основным флюсом рекомендуется, чтобы в металле шва присутствовало 0,015...0,030 мас. % Ti, 0,002...0,005 мас. % B, 0,02...0,04 мас. % [O] и не более 0,006...0,008 мас. % [N]. Содержание алюминия обычно постоянно и составляет 0,020...0,025 мас. %. Такое соотношение элементов способствует получению оптимальной структуры металла шва.

При выборе способа легирования шва применение ПП (процесс FMI) предпочтительно по следующим причинам:

использование проволоки сплошного сечения типа S3Mo-TiB в сочетании с нейтральными флюсами вместо основных агломерированных флюсов требует увеличения содержания в ней бора и титана, в результате чего повышается твердость и жесткость проволоки, что еще более усугубляет трудности, возникающие при ее изготовлении и применении;

вариант с микролегированием металла шва через флюс представляется недостаточно надежным из-за низкой металлургической активности бора



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

Материал	C	Mn	Si	Mo	Ni	Cr	Ti	B	Al	Nb	S	P
Сварочная проволока:												
S3Mo-TiB	0,08	1,3	0,28	0,52	0,05	He опр.	0,165	0,0164	0,017	0,013	0,01	0,018
Св-08ХМ	0,10	0,6	0,29	0,61	0,17	1,2	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	<0,025	<0,030
Св-08Г1НМА	0,09	1,5	0,41	0,70	0,70	0,1	» »	» »	» »	» »	<0,015	<0,020
Основной металл сталь 10Г2ФБ	0,11	1,7	0,32	<0,03	He опр.	He опр.	» »	» »	0,04	0,007	0,016	0,016

и титана, которые содержатся в плавленном флюсе в виде оксидов;

ПП можно изготавливать небольшими партиями, оперативно изменяя ее состав в зависимости от марки основного металла и условий сварки.

На начальном этапе работ определено оптимальное содержание титана и бора в швах, выполненных на хладостойкой стали 10Г2ФБ, которую применяют для труб ответственного назначения. Контрольные соединения стальных пластин толщиной 18,7 мм сваривали с двух сторон тремя или четырьмя дугами под флюсами АН-67Б и АН-47П (последний выпускает ОАО «Запорожстеклофлюс»). Погонная энергия процесса сварки составляла 5 кДж/мм. Опытные ПП с различным содержанием титана и бора устанавливали на второй дуге, а на остальных — экономичную молибденсодержащую проволоку сплошного сечения Св-08ХМ.

Для сравнения в некоторых опытах использовали проволоку S3Mo-TiB и агломерированные флюсы ОР 132 (фирма «Oerlikon») и ОК 10.74 (фирма ESAB). Химический состав основного металла и сварочных материалов приведен в табл. 1 и 2.

Применение ПП не привело к существенным изменениям режима сварки и качества формирования швов. Горение дуги на ПП было несколько менее стабильным, чем на проволоке сплошного сечения, что объясняется отсутствием омеднения. Ударную вязкость металла швов определяли на образцах с острым надрезом типа IX (ГОСТ 6996-66), которые отбирали из последнего шва или места пересечения швов.

В результате экспериментов установлено, что при сварке под указанными плавленными флюсами содержание кислорода и азота в металле шва изменяется соответственно в пределах 0,045...0,070

и 0,0077...0,0110 мас. %, т. е. оно выше, чем при сварке под основным флюсом, при этом массовая доля алюминия остается неизменной. Оптимальное для повышения ударной вязкости содержание титана в металле шва составляет 0,022...0,038 мас. %, а бора — 0,0025...0,0065 мас. %. При содержании титана менее 0,018 мас. % положительный эффект отсутствовал, а при более 0,038 мас. % ударная вязкость резко снижалась. Как видно из табл. 3, при сварке с использованием нейтральных плавленных флюсов микролегирование титаном и бором повышает ударную вязкость  $KCV^{20}$  металла шва в 2,0...2,5 раза (п. 2 и 4) по сравнению вариантами сварки, в которых оно отсутствовало (п. 1 и 3).

Увеличение содержания бора вплоть до 0,0100 мас. % не приводило к снижению ударной вязкости металла шва, однако ввиду опасности образования трещин его предельное содержание ограничили 0,0065 мас. %. Такое значение близко к рекомендуемому в работе [8] оптимальному содержанию бора при  $N \leq 80$  ppm и  $O = 330...380$  ppm. Оно определяется соотношением  $B = 0,7N + 15$  ppm и равно 0,0071 мас. % при  $N = 80$  ppm.

Известно, что при выполнении второго (наружного) шва трубы ударная вязкость металла первого (внутреннего) шва уменьшается на 20...30 % вследствие дисперсионного упрочнения. Благодаря микролегированию создается «запас» ударной вязкости, который (несмотря на снижение этого показателя при повторном нагреве) обеспечивает приемлемое ее значение для металла первого шва и места перекрытия швов. Так, например,  $KCV^{20}$  металла последнего шва, выполненного под флюсом АН-67Б, составила 178 Дж/см<sup>2</sup> (п. 2, табл. 3), а места перекрытия швов — 132 Дж/см<sup>2</sup>. При этом, однако, возможно локальное снижение ударной

Таблица 2. Химический состав (мас. %) флюсов

Флюс	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	CaF <sub>2</sub>	MnO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>
АН-67Б	35...40	<10,0	—	11...16	14,0...18,0	12...16	4,0...7,0	<1,0	—
АН-47П	10...18	12,0...17,0	6...10	8...13	10,0...16,0	27...30	4,0...7,0	0,8...3,0	3,5...5,0
ОР 132	23...26	3,5...6,0	20...24	13...16	6,5...8,5	17...20	2,0...3,5	1,3...3,2	—
ОК 10.74	21...26	5,0...7,0	19...25	16...20	5,0...7,0	19...24	<1,3	—	—



Таблица 3. Химический состав (мас. %) и ударная вязкость металла швов, выполненных под флюсами

№ п/п	Флюс	Сварочная проволока	C	Si	Mn	Mo	Cr	Ti	B	[O]	[N]
<i>Плавленные</i>											
1	АН-67Б	Св-08ХМ	0,09	0,27	1,63	0,14	0,26	—	—	0,045	0,008
2		Св-08ХМ+ПП	0,07	0,30	1,60	0,22	0,37	0,030	0,0044	0,047	0,007
3	АН-47П	Св-08Г1НМА	0,10	0,48	1,63	0,20	—	—	—	0,047	0,010
4		Св-08ХМ+ПП	0,08	0,30	1,67	0,27	0,31	0,028	0,0034	Не опр.	Не опр.
<i>Агломерированные</i>											
5	ОК 10.74	Св-08Г1НМА	0,06	0,43	1,60	0,30	—	0,011	—	0,037	0,005
6		Св-08ХМ+ПП	0,07	0,41	1,62	0,28	0,36	0,036	0,0053	0,032	0,005
7		S3MoX–TiB	0,07	0,45	1,78	0,22	—	0,026	0,0025	0,022	0,006
8	ОР 132	Св-08Г1НМА	0,08	0,30	1,74	0,33	—	0,011	—	0,051	0,008
9		S3Mo–TiB	0,07	0,31	1,67	0,29	0,36	0,024	0,0019	0,048	0,008

Примечания. 1. Содержание в металле швов алюминия составило 0,02...0,03 мас. %, а в металле швов, выполненных с применением проволоки Св-08Г1НМА, содержание никеля — от 0,18 до 0,22 мас. %. 2. Образцы типа IX для испытания на ударный изгиб отбирали из последнего слоя шва.

Окончание табл. 3

№ п/п	Флюс	Сварочная проволока	KCV, Дж/см <sup>2</sup>		
			0	-20 °C	-40 °C
<i>Плавленные</i>					
1	АН-67Б	Св-08ХМ	Не опр.	82	49
2		Св-08ХМ+ПП	183	178	135
3	АН-47П	Св-08Г1НМА	76	49	Не опр.
4		Св-08ХМ+ПП	Не опр.	122	87
<i>Агломерированные</i>					
5	ОК 10.74	Св-08Г1НМА	168	153	111
6		Св-08ХМ+ПП	102	63	Не опр.
7		S3Mo–TiB	Не опр.	187	151
8	ОР 132	Св-08Г1НМА	147	104	98
9		S3Mo–TiB	216	205	195

вязкости на участках шва, где температура повторного нагрева превышает 750 °C [7].

При использовании основных агломерированных флюсов микролегирование швов титаном и бором целесообразно в случае, если необходимо обеспечить высокую ударную вязкость при температуре ниже -20 °C. Так, KCV<sup>20</sup> металла швов, выполненных на стали 10Г2ФБ проволокой Св-08Г1НМА под флюсами ОК 10.74 и ОР 132 с основностью 1,4...1,5, не превышало 153 Дж/см<sup>2</sup> (п. 5 и 8, табл. 3). Микролегирование титаном и бором повысило этот показатель — KCV<sup>40</sup> > 150 Дж/см<sup>2</sup>.

Вследствие меньшей окислительной способности указанных флюсов оптимальное содержание титана и бора в металле шва (и соответственно в ПП) должно быть ниже, чем при сварке под нейтральными флюсами АН-67Б и АН-47П. В наших экс-

периментах при сварке проволокой S3Mo–B содержание указанных элементов в металле шва составило соответственно 0,024...0,026 и 0,0019...0,0025 мас. % (п. 7 и 9, табл. 3). Полученные результаты (с учетом содержания кислорода и азота) не противоречат приведенным выше рекомендациям применительно к основным агломерированным флюсам.

При использовании в сочетании с агломерированными флюсами ПП не скорректированного состава содержание титана и бора в металле шва составило соответственно 0,0360 и 0,0053 мас. %, что превысило их оптимальное содержание и привело к резкому уменьшению его ударной вязкости (п. 6, табл. 3).

Состав металла швов, выполненных под флюсом ОК 10.74 проволоками S3Mo–TiB и Св-08ХМ+ПП (п. 6 и 7, табл. 3) отличается в основном содержанием титана и бора. Из этого следует, что корректировка состава ПП путем снижения содержания титана и бора позволит достичь при сварке под основными агломерированными флюсами таких же высоких результатов, как и при использовании проволоки S3Mo–TiB.

Учитывая жесткие требования к содержанию микролегирующих элементов в металле шва, необходимо с высокой точностью обеспечить однородность состава ПП по ее длине. После доработки технологии изготовления ПП выполнена серия двенадцатиметровых наплавов на трубах с контролем химического состава металла шва через каждые 0,5 м его длины. Стандартное отклонение содержания в металле шва титана и бора составило соответственно ±0,0010 и ±0,0002 мас. %, т. е. не более 12,5 % диапазона изменения их оптимального содержания в металле шва — 0,016 мас. % Ti и 0,004 мас. % B.



Т а б л и ц а 4. Зависимость состава металла швов, выполненных на стали 10Г2ФБ под флюсом АН-67Б с использованием проволоки сплошного сечения Св-08ХМ, от режима горения дуги на ПП

Количество дуг	I, А	U, В	v <sub>св</sub> , м/ч	Массовая доля элементов, %						
				С	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	В
1	900	30	38	0,12	0,37	1,89	0,23	0,17	0,118	0,0212
		37		0,10	0,37	1,93	0,21	0,14	0,099	0,0170
3	850	30	80	0,10	0,33	1,63	0,28	0,15	0,027	0,0042
	900	37		0,10	0,33	1,65	0,27	0,15	0,026	0,0044

Примечания. 1. I — ток дуги; U — напряжение на дуге, где установлена ПП. 2. Режим трехдуговой сварки: I<sub>1</sub> = 1150 А, U<sub>1</sub> = 37 В; I<sub>2</sub> = 850...900 А, U<sub>2</sub> = 30...37 В; I<sub>3</sub> = 1000 А, U<sub>3</sub> = 45...47 В; v<sub>св</sub> = 80 м/ч; ПП установлена на второй дуге.

Опытно-промышленные партии ПП производили в две стадии последовательно на двух заводах. Вначале заготовку, заполненную флюсовым сердечником, изготавливали в Германии на заводе фирмы «Drahtzug Stein Wire & Welding». Затем ее доставляли в Украину на предприятие «АРКСЭЛ», где выполняли финишные операции (термообработку, волочение, перемотку на потребительские катушки), а также проводили испытание и контроль готовой проволоки. В ходе производственных испытаний установлено, что увеличение диаметра ПП с 4,0 до 4,5 мм повышает стабильность процесса многодуговой сварки на токе более 800 А. При этом разница между массой 1 пог. м ПП диаметром 4,5 мм и проволоки сплошного сечения диаметром 4,0 мм не превышает 4 %.

На основании полученных данных разработаны ПП марок ПП-АСФ-1-2, ПП-АСФ-1-3 и ПП-АСФ-1-4 для многодуговой сварки под флюсом (ТУУ 28.7-31206116-008–2003 с Изменением № 1). На указанные ПП получен патент Украины и положительное решение на заявку на изобретение [11, 12].

Разработку состава ПП проводили с учетом типовых заводских режимов многодуговой сварки, которым соответствовали определенные диапазоны отношений суммы скоростей подач электродных проволок сплошного сечения к скорости подачи ПП. При использовании электродных проволок сплошного сечения диаметром 4,0 мм и ПП диаметром 4,5 мм, установленной на второй дуге, это отношение для трех- и четырехдуговой сварки составляло соответственно 1,1...1,9 и 1,5...2,7. В производственных условиях с учетом допуска на состав ПП, изменений их состава по длине проволоки, колебаний режимов сварки, различных типов разделки кромок и значений коэффициента перемешивания шва рекомендуется, чтобы режимы трех- и четырехдуговой сварки соответствовали более узкому диапазону указанных отношений (1,3...1,7 и 1,8...2,4), что гарантирует оптимальное микролегирование шва.

С целью расширения диапазона режимов сварки возможна установка ПП, кроме второй, и на

других дугах, поскольку ограниченное изменение режима горения дуги не оказывает существенного влияния на переход титана и бора из ПП в металл шва. Например, в условиях трехдуговой сварки при увеличении напряжения на второй дуге на 7 В (ток 850...900 А) содержание титана в металле шва уменьшилось на 0,001 мас. %, а бора практически не изменилось (табл. 4). Однако устанавливать ПП на первую дугу нежелательно из-за избыточного количества наплавляемого металла, которое для ПП диаметром 4,5 мм на 20...30 % выше, чем для проволоки сплошного сечения диаметром 4,0 мм, а также соответствующего снижения провара. Кроме того, применять ПП на первой и последней дугах не рекомендуется в связи с возможностью возникновения неоднородности шва [13].

Результаты лабораторных испытаний промышленной партии ПП № 232 марки ПП-АСФ-1-3 при трехдуговой сварке контрольного сварного соединения из стали 10Г2ФБ под флюсом АН-67Б (I<sub>1</sub> = 1220 А; U<sub>1</sub> = 34 В; I<sub>2</sub> = 825 А; U<sub>2</sub> = 38 В; I<sub>3</sub> = 980 А; U<sub>3</sub> = 43 В; v<sub>св</sub> = 85 м/ч) приведены ниже:

металл шва имел следующий химический состав, мас. %: 0,074 С; 0,30 Si; 1,60 Mn; 0,32 Cr; 0,27 Mo; 0,027 Al; 0,030 Ti; 0,0044 В;

среднее значение ударной вязкости металла шва при температуре испытаний 0, –20 и –40 °С составило соответственно 183, 177 и 135 Дж/см<sup>2</sup>;

твердость металла шва не превышала HV 237, что удовлетворяет требованиям действующей нормативной документации на газопроводные трубы.

Результаты испытания шва на статическое растяжение, полученные на образцах типа II (ГОСТ 6996–66), приведены в табл. 5.

Проволоку ПП-АСФ, помимо проволоки типа Св-08ХМ, можно применять также в сочетании

Т а б л и ц а 5. Механические характеристики металла швов, полученных при испытании на статическое растяжение

Образец	σ <sub>т</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>т</sub> /σ <sub>в</sub>	δ, %	ψ, %
1	596,7	751,9	0,79	27,0	66,3
2	594,7	734,8	0,81	24,0	62,3

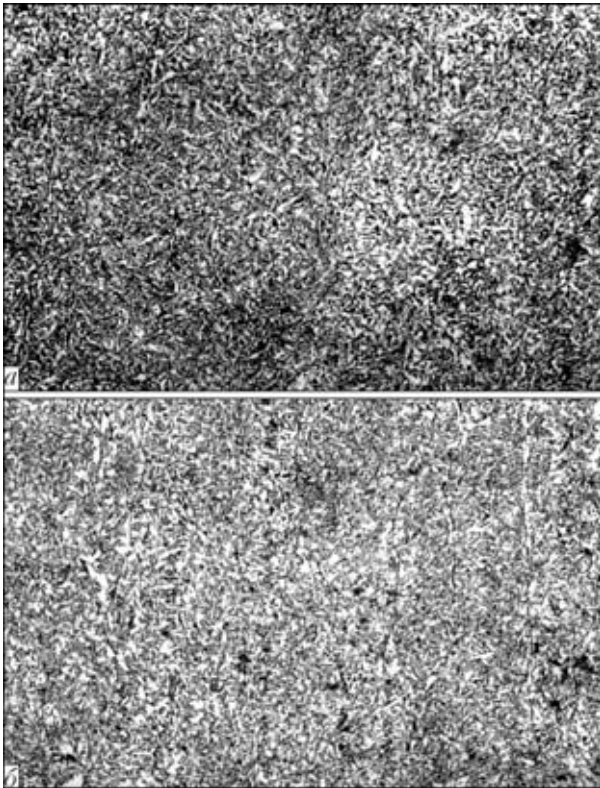


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 500$ , травление в металле) металла швов, выполненных на трубах из стали класса прочности X70, с использованием проволок Св-08ХМ + ПП-АСФ под флюсами АН-67Б (а) и АН-68 (б)

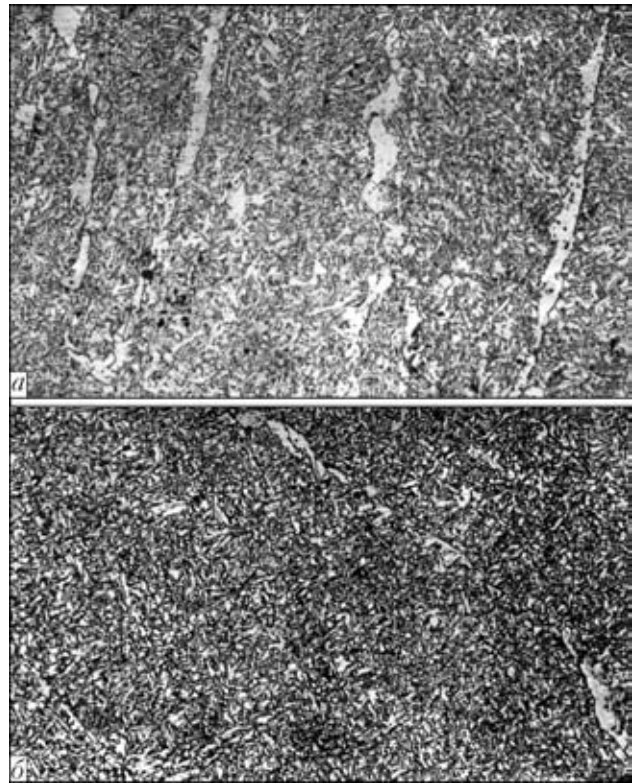


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 500$ , травление в металле) металла швов, выполненных на трубах из стали класса прочности X70 с использованием проволоки Св-08Г1НМА под смесью флюсов 50 % АН-67Б + АН-60 (а) и под флюсом АН-67Б (б)

с проволоками Св-08ГМ (S2Mo). Использование проволоки типа Св-08Г1НМА не приемлемо из-за чрезмерного увеличения содержания в шве марганца и возможных падений значений ударной вязкости ниже допустимого уровня.

Сварка с применением разработанной ПП наружных швов опытных партий труб из стали класса прочности X70 размером (1020...1420) $\times$ (16...19) мм, изготовленных на Харцызском трубном и Выксунском металлургическом заводах, подтвердила эффективность рассматриваемого способа, который позволил увеличить ударную вязкость шва примерно в 2 раза. Испытания показали, что, помимо нейтрального флюса АН-67Б ( $KCV^{20} = 120...180$  Дж/см<sup>2</sup>), можно применять слабокислый флюс типа АН-68 ( $KCV^{20} = 85...100$  Дж/см<sup>2</sup>), состав которого эквивалентен составу смеси флюсов 50 % АН-67Б+АН-60. Использование ПП в сочетании с кислым флюсом АН-60 существенного эффекта не дало вследствие повышенного содержания в металле шва кислорода (0,09...0,11 мас. %).

Металл швов, выполненных многодуговой сваркой проволоками Св-08ХМ и ПП-АСФ-1 под флюсом АН-67Б на трубах из стали класса прочности X70, имел мелкодисперсную структуру\*, содержащую до 85 об. % игольчатого феррита практически при отсутствии межзеренного полигональ-

ного феррита (рис. 1, а). Применение флюса АН-68 приводит к некоторому снижению доли игольчатого феррита и появлению редких прерывистых прослоек межзеренного полигонального феррита толщиной 2...5 мкм (рис. 1, б). Твердость металла швов в обоих случаях составляла  $HV 232...237$ .

Для сравнения на рис. 2 представлены менее благоприятные микроструктуры металла швов, выполненных проволокой Св-08Г1НМА без применения ПП на трубах текущего производства под смесью флюсов 50 % АН-67Б+АН-60 (рис. 2, а) и флюсом АН-67Б (рис. 2, б). Они характеризуются меньшим содержанием игольчатого феррита и большим полигонального, причем содержание межзеренного полигонального феррита составляет 7...11 об. %.

При внедрении процесса многодуговой сварки с применением на одной из дуг ПП, легированной титаном и бором, основной проблемой является обеспечение указанного выше соотношения суммы скоростей подачи проволок сплошного сечения к скорости подачи ПП. Учитывая широкий сортамент труб и диапазон изменения режимов сварки, целесообразно использовать для этой цели средства автоматического регулирования.

Для реализации указанного процесса сварки на станах сварки внутренних швов необходимо обеспечить равнопрочность стыкового соединения концов ПП при замене катушек ввиду больших

\* Металлографический анализ структуры металла швов выполнен ведущим инженером Л. Г. Шитовой.



усилий, которые возникают при протягивании проволоки через проводки длиной до 15 м. Для решения этой задачи требуется специальная подготовка торцов ПП к сварке и применение стыкосварочных машин с программируемым циклом.

## Выводы

1. Микролегирование швов титаном и бором при многодуговой сварке под нейтральными или слабоокисными флюсами в 1,5...2,5 раза увеличивает их ударную вязкость на трубах из сталей типа 10Г2ФБ. Оптимальное содержание в металле шва титана и бора составляет соответственно 0,022...0,038 и 0,0025...0,0065 мас. %.

2. Исследован вариант микролегирования металла шва через ПП, установленную на одной из дуг, в сочетании с проволоками сплошного сечения Св-08ХМ на остальных дугах при сварке под флюсами АН-67Б, АН-68, АН-47П и смесью флюсов 50 % АН-67Б+АН-60. Ударная вязкость  $KCV^{20}$  последнего слоя шва в зависимости от марки флюса составляет 80...180 Дж/см<sup>2</sup>. Помимо проволоки Св-08ХМ, можно применять проволоку типа Св-08ГМ (S2Mo).

3. Отношение суммы скоростей подач проволок сплошного сечения к скорости подачи ПП должно находиться в диапазоне значений, определяемом маркой ПП и условиями сварки.

4. Разработан состав ПП, легированной титаном и бором, марок ПП-АСФ-1-2, ПП-АСФ-1-3 и ПП-АСФ-1-4 (ТУУ 28.7-31206116-008-2003 с Изменением № 1) для многодуговой сварки низколегированных сталей под нейтральными или слабоокисными флюсами в сочетании с проволоками типа Св-08ХМ или Св-08ГМ. Применение указанных ПП дало положительные результаты при изготовлении опытных партий газопроводных труб.

5. При определенном снижении содержания титана и бора проволока типа ПП-АСФ может применяться для сварки под основными агломе-

рованными флюсами с целью повышения ударной вязкости шва при температуре ниже -20 °С.

6. Микролегирование металла швов титаном и бором через ПП, установленную на одной из дуг, может найти применение при многодуговой сварке под флюсом различных конструкций из низколегированной стали.

1. Nies H., Keville B., Schlatter B. Schweißen von Großrohren mit dem Unterpulver — Mehrdrahtverfahren // Oerlikon Schweissmitteilungen. — 1996. — № 131, May. — S. 4–13.
2. Sordi J., Scholz E., Schuster G. Großrohren für Sauer gas — Optimierung des UP-Mehrdrahtschweißens mit Fuelldrahtelektroden // Ibid. — 1990. — № 122, Febr. — S. 11–17.
3. Scholz E., Weiland F. Derzeitige Stand des UP Schweißens mit mikrolegierten Fuelldrahtelektroden // Ibid. — 1984. — № 106, Okt. — S. 4–14.
4. Engindeniz E. Unterpulver — Hohleistungsschweißen mit Fuelldrahtelektroden // Ibid. — 1994. — № 130, April. — S. 11–20.
5. Engindeniz E. Unterpulver — Schweißen mit Fuelldrahtelektroden // Jahrbuch der Schweißtechnik. — Duesseldorf, DVS, 2000. — S. 11–20.
6. Liu Z., Lau T., North T. H. Deposit properties and the Ti–O–B–N balance in submerged arc welding. — S.I., [1987]. — 24 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. II-A-713–87).
7. Study on the toughness of large-heat input weld metal for low temperature-service TMCP steel / Y. Horii, S. Ohkita, M. Wakabayashi, M. Namura // Nippon Steel Techn. Rep. — 1988. — № 37, April. — P. 1–9.
8. Measures for toughness improvement of heavy-walled UOE pipe's submerged arc weld metal / F. Kawabata, S. Sacaguchi, J. Matsuyama, N. Nishiyama. — S.I., [1987]. — 22 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-953–86 II-A-713–87).
9. Подзаецкий В. В. О влиянии химического состава шва на его микроструктуру и механические свойства (Обзор) // Автомат. сварка. — 1991. — № 2. — С. 1–9.
10. Влияние кислорода на образование структуры игольчатого феррита в низколегированном металле сварных швов. (Обзор) / И. К. Походня, В. В. Головки, Л. В. Денисенко, В. Ф. Грабин // Там же. — 1999. — № 2. — С. 3–11.
11. Пат. 74469 Украина, МКИ 7 В 23 К 35/368. Склад порошкового дроту / А. М. Алимов, А. О. Рыбаков, С. Ю. Бать та ін. — Опубл. 15.12.2005.
12. Заявка 2004106363/02 РФ, МКИ 7 В 23 К 35/368. Состав порошковой проволоки / А. Н. Алимов, А. А. Рыбаков, С. Ю. Бать и др. — Опубл. 02.03.2004.
13. Engindeniz E., Berg B., Linden W. Großrohrfertigung für Sauer gasleitungen aus schweißtechnischer Sicht // Jahrbuch der Schweißtechnik. — Duesseldorf: DVS, 2000. — S. 539–544.

Microalloying of the weld metal with titanium and boron in multi-arc welding of pipes, performed through a flux-cored wire placed on one of the arc, was investigated. This process is characterised by the use of neutral and sub-acid fluxes, instead of the basic ones, which is accompanied by improvement of weld formation at increased welding speeds. The optimal content of titanium and boron providing high impact toughness of the weld metal was determined. Industrial tests of the welding process using the developed flux-cored wire of the ПП-АСФ-1 grade yielded positive results.

Поступила в редакцию 17.01.2007