



## СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВОГО ФЛЮСА МАРКИ АН-47ДП

**А. В. ЗАЛЕВСКИЙ, В. И. ГАЛИНИЧ**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)  
**Н. Я. ОСИПОВ, В. И. НЕТЯГА, О. П. КИРИЧЕНКО**, инженеры  
(ОАО «Запорож. з-д сварочных флюсов и стеклоизделий»)\*

Изложены результаты испытаний нового плавяного флюса, предназначенного для сварки высокопрочных низколегированных сталей. Флюс, изготовленный по методу двойного рафинирования и получивший марку АН-47ДП, разрабатывался в рамках инновационного проекта Технопарка «ИЭС им. Е. О. Патона».

*Ключевые слова:* дуговая сварка, низколегированные стали, пемзовидный плавяный флюс, формирование металла шва, отделимость шлаковой корки, узкая разделка, ударная вязкость, производство, двойное рафинирование

Непременным условием успешной работы предприятия в рыночной экономике является постоянное обновление продукции. В рамках инновационного проекта Технопарка Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклоизделий» разработан новый плавяный флюс марки АН-47ДП и технология его промышленного производства. Новый флюс, являющийся усовершенствованным вариантом флюса марки АН-47, широко используемого для сварки низколегированных сталей повышенной прочности [1], предназначен для качественного формирования металла швов в специфических условиях сварки — в узкую разделку, при высоких скоростях, угловых соединений и обеспечения стой-

кости металла швов против хрупкого разрушения, оцениваемой по энергии удара 47 Дж при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и 27 Дж при  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в соответствии с требованиями ISO 14171 [2].

Ниже приведены результаты испытаний свойств флюса АН-47ДП применительно к сварке толстолистового низколегированного проката, где наряду с ударной вязкостью металла швов особо важное значение имеет отделимость шлаковой корки. Для испытаний использовали технологию многослойной однодуговой сварки и сварочные проволоки марок ИМТ 9, ИМТ 6 и ИМТ 9Si диаметром 4 мм, предложенные польской фирмой «Multimet». Эти проволоки по классификации ISO 14171:2000 ([2], табл. 5А) соответствуют маркам S2, S2Mo, S2Si. Для сравнения использовали также отечественную сварочную проволоку марки Св-08Г2С диаметром 3 мм, соответствующую по этому стандарту марке SU31 ([2], табл. 5В). Химические составы проволок, основного металла

**Таблица 1. Химические составы основного металла, сварочных проволок и металла швов, мас. %**

Марка материалов	C	Si	Mn	S	P	Mo
Сталь 09Г2С (данные сертификата качества)	0,12	0,56	1,30	0,021	0,018	—
Проволока (данные сертификата качества)						
ИМТ 9 (S2)	0,01	0,07	1,00	0,015	0,017	—
ИМТ 6 (S2Mo)	0,09	0,13	1,02	0,022	0,008	0,477
ИМТ 9Si (S2Si)	0,09	0,20	0,98	0,010	0,011	—
Св-08Г2С	0,06	0,87	1,88	0,017	0,023	—
Металл швов (при сварке проволокой)						
ИМТ 9	0,059	0,316	1,30	0,025	0,017	—
ИМТ 6	0,051	0,378	1,37	0,031	0,012	0,350
ИМТ 9Si	0,053	0,430	1,38	0,022	0,013	—
Св-08Г2С	0,057	0,932	2,01	0,025	0,024	—
Основной металл сталь 09Г2С	0,110	0,604	1,45	0,019	0,021	—

\* В работе принимал участие инж. Р. Н. Баранник.

(сталь 09Г2С толщиной 40 мм) и металла швов представлены в табл. 1.

Особенностями технологии сварки являлись скос кромок под  $20^\circ$  и подварка корня шва с использованием проволоки Св-08Г2С в смеси аргона (82 %) и углекислого газа (18 %), при этом ширина технологического шва составляла около 4 мм. Как показали результаты предварительных экспериментов с использованием высококремнистых марганцевых флюсов марок АН-348-А и АН-60, такая технология сварки отрицательно повлияла на отделимость шлаковой корки из узкой разделки. Поэтому нами были проведены специальные исследования по отделимости шлаковой корки флюса АН-47ДП из узкой разделки.

Испытывали флюс промышленного производства, показатели качества которого соответствовали ТУ У 05416923.049–99 и ГОСТ Р 52222. Перед сваркой его просушивали при температуре  $300^\circ\text{C}$  в течение трех часов при толщине слоя флюса в противне 30...40 мм. Качество сушки флюса контролировали по количеству и размерам пор в шлаковой корке, полученной при наплавке валика на зачищенную поверхность пластины при напряжении дуги 43 В (согласно рекомендации ТУ У 05416923.049–99). Контроль пор в шлаковой корке не выявил.

Как известно, отделимость шлаковой корки флюса при сварке не является стандартизированным показателем его качества, поэтому отсутствует и единая методика ее оценки. Однако плохая отделимость корки увеличивает затраты ручного труда, времени и материалов при изготовлении сварной конструкции. Поэтому при выборе флюса для сварки в разделку отделимость шлака оценивают, как правило, только качественно в каждом конкретном случае сварки. Так, принято считать, что флюс имеет хорошую отделимость, если на простроганной поверхности стальной пластины корка отделяется от поверхности металла шва самопроизвольно, без применения каких-либо инструментов (молотка, зубила и т. п.). Почти все существующие флюсы отличаются такой способностью при сварке нелегированных или низколегированных сталей, поскольку такие флюсы обеспечивают хорошую стабильность дугового процесса и не содержат в своем составе компонентов, способных образовывать на поверхности контакта шлака с металлом химические соединения с кристаллической решеткой последнего. Кроме того, на отделение шлака благоприятно влияет отсутствие ограничений для растекания шлака по поверхности жидкого металла сварочной ванны. Однако при сварке стыков с глубокой разделкой, характерных для конструкций из толстолистового проката, ситуация существенно ухудшается — корка с первого прохода в большинстве

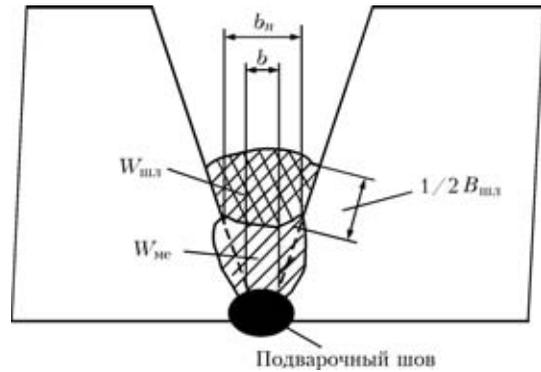


Рис. 1. Схема заполнения металлом шва и шлаковой коркой разделки стыка (обозначения см. в тексте)

случаев сварки без применения инструмента не удаляется из стыка.

Из анализа схемы образования металла шва и шлаковой корки в разделке стыка (рис. 1) следует, что ширина  $B_{шл}$  площади контакта шлака со стенками разделки зависит от объема  $W_{шл}$  и ширины металла шва в самом узком месте разделки (параметра  $b_n$ ). Однако при постоянстве тока и скорости сварки объем шлака  $W_{шл}$  является функцией напряжения дуги  $U_d$ , следовательно, при  $b = \text{const}$  возрастание  $U_d$  увеличивает ширину  $B_{шл}$  и, таким образом, ухудшает отделимость шлаковой корки. Кроме того, в общем случае причины ухудшения отделения шлака могут быть следующие: плохое формирование металла шва (наличие подрезов, острых углов по линии перехода, выступов и «гребенок» по оси шва), что обуславливает механическое заклинивание шлака; влияние коэффициента линейного расширения шлака; прилипание корки к поверхности металла шва, обусловленное химическими составами сварочных материалов.

Как показывает практика, наиболее трудно корка удаляется из самой глубокой части стыка с наименьшим расстоянием между его стенками. Спроецировав перечисленные выше факторы на описываемый случай сварки, можно предположить, что именно прилипание корки к поверхности стенок стыка является решающим фактором, влияющим на отделимость шлаковой корки при сварке в узкую разделку, поскольку используемые сварочные материалы при отсутствии разделки проблем с отделением шлака не имели. Из этого следует, что при постоянстве режима сварки объем шлака также постоянный и ширина  $B_{шл}$  зависит только от ширины шва предыдущего прохода, т. е. расстояния между стенками стыка, измеряемого по поверхности наплавленного металла (параметр  $b_n$ ) и напряжения дуги.

С целью проверки сделанного предположения была проведена наплавка валиков в канавки специального образца из стали 09Г2С, который имитировал реальный стык с глубокой разделкой (рис. 2). Канавки имели разный исходный



Т а б л и ц а 2. Режимы сварки и результаты испытаний флюса АН-47ДП на отделимость шлаковой корки

№ шва-прохода (параметр соединения $b_p$ , мм)	№ участка	$U_{дг}$ , В	$I_{св}$ , А	$v$ , м/ч	Формирование шва	Отделимость шлаковой корки	Средняя толщина наплавленного слоя, мм	Марка проволоки (диаметр, мм)	
1-1 (4)	1	30	550...600	31,5	Отличное	Удовлет.	4	Св-08ГА (4)	
	2	34				Неуд.	4		
	3	38				» »	—		
	4	42				Неуд.	—		
1-2 (6,9)*	1	29	550...600	31,5	Отличное	Отличная	4		
	2	30				» »	4		
	3	31				Удовлет.	3,5		
	4	32				» »	3		
1-3 (9,5)*	1	29	550...600	27,8	Отличное	Неуд.	2		
	2	30				Отличная	2		
	3	31				Удовлет.	2,5		
	4	32				Неуд.	2,5		
1-4 (11,3)*	1	31	550...600	27,8	Отличное	Отличная	2		
	2	32				» »			
	3	33				» »			
	4	34				» »			
1-5 (12,8)*	1	32	550...600	27,8	Отличное	Отличная	1,5		
	2	33				» »			
	3	34				» »			
2-1 (5)	1	28	550...600	31,5	Отличное	Отличная	4		
	2	29				» »			
	3	30				» »	Удовлет.		
	4	31				» »	Неуд.		
3-1 (4)	1	30	550...600	31,5	Отличное	Неуд.	4		
	2	31				» »			
	3	32				Удовлет.			
	4	33				» »			
3-2 (6,9)*	1	29	550...600	31,5	Отличное	Отличная	3		
	2	30				» »			
	3	31				» »	Удовлет.		
	4	32				» »	Неуд.		
3-3 (9,1)*	1	30	550...600	31,5	Отличное	Отличная	2,5		
	2	31				» »			
	3	32				» »			
	4	33				» »	Удовлет.		
3-4 (10,9)*	1	31	550...600	31,5	Отличное	Отличная	1,5		
	2	32				» »			
	3	33				» »			
	4	34				» »			
4-1 (4)	1	28	400...450	24,6	Отличное	Удовлет.	Не опр.	Св-08Г2С (3)	
	2	29				» »			
	3	30				» »			
4-2	1	28	500...550	24,6	Отличное	Отличная	»»		
	2	29				Неуд.	Удовлет.		
	3	30				Удовлет.	Неуд.		
4-3	1	28	500...550	24,6	Отличное	Отличная	»»		
	2	29				» »			
	3	30				» »			
5-1 (5)	1	29	500...550	24,6	Отличное	Удовлет.	»»		
	2	30				»»			
	3	31				»»			
5-2	1	29	550...600	27,8	Неуд.	Неуд.	»»		
	2	30				» »			
	3	31				» »			

\* — расчетное значение.

параметр ( $b = 4$  и  $5$  мм), что позволяло изучить отделимость шлака при наихудших условиях сварки, т. е. при наименьших значениях параметра  $b$ , и в широком диапазоне напряжения на дуге

и определить оптимальный режим сварки, при котором достигаются наилучшие условия отделения шлака.

С целью соблюдения одинаковых условий наплавки канавка была разделена на четыре участка длиной 150 мм, на каждом из которых режим наплавки отличался от предыдущего только более высоким напряжением дуги (см. табл. 2). Большую часть канавок наплавляли проволокой диаметром 4 мм (Св-08ГА), несколько канавок (для сравнения) заваривали проволокой диаметром 3 мм (Св-08Г2С); значение тока (постоянного, обратной полярности) было неизменным на протяжении одного прохода одной канавки и составляло 550...600 А при сварке проволокой диаметром 4 мм и 500...550 А для проволоки диаметром 3 мм. Скорость сварки при выполнении прохода была постоянной на всем протяжении канавки, однако изменялась на разных проходах в зависимости от предыдущих результатов наплавки. Она была максимальной на первом проходе (31,5 м/ч для проволоки диаметром 4 мм) и минимальной на последнем (24,6 м/ч для проволоки диаметром 3 мм). На всех проходах вылет электрода составлял 40 мм.

Отделимость шлаковой корки из разделки оценивали по трехбалльной системе: отличная — отделение шлака без применения инструмента; удовлетворительная — с применением инструмента без значительного усилия; неудовлетворительная — с применением инструмента и значительных усилий. На каждом проходе также по трехбалльной системе оценивали качество формирования металла швов: отличное — поверхность шва чистая, без подрезов, наплывов и других дефектов формирования; удовлетворительное — незначительное количество мелких неровностей на поверхности шва; неудовлетворительное — шов неровный с подрезами или наплывами.

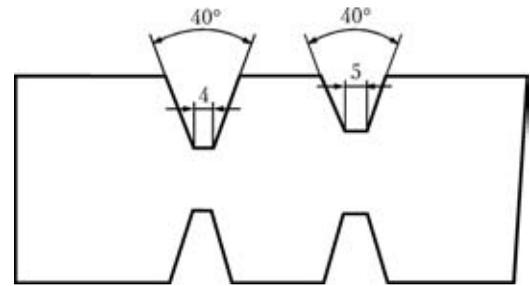


Рис. 2. Сечение пробы для определения отделимости шлаковой корки

Как видно из результатов испытаний флюса АН-47ДП на отделимость шлаковой корки, представленных в табл. 2, а также из рис. 3 и 4, с повышением напряжения на дуге при сохранении остальных условий сварки отделимость шлаковой корки ухудшается. Так, при выполнении первого прохода в канавке с параметром  $b_0 = 4$  мм на первом участке ( $U_d = 30$  В) корка заполнила примерно 1/3 объема разделки (рис. 3, а), на втором ( $U_d = 34$  В, рис. 3, б) — 2/3, третьем ( $U_d = 38$  В, рис. 3, в) — 4/5 и на четвертом ( $U_d = 42$  В, рис. 3, г) корка вышла за пределы разделки. При этом на первом участке корка удалялась практически самопроизвольно, на остальных это требовало значительных усилий. Формирование шва на первом и втором участках было практически одинаково хорошим — без дефектов, с плавным переходом к стенке стыка, причем поверхность шва была вогнутой и гладкой (рис. 3, д, е). Ширина площади контакта шлака со стенкой стыка на корке первого участка составила менее 2 мм (рис. 4, а), на втором — около 4 мм, на остальных участках этот параметр определить не удалось из-за полного разрушения корки при удалении. Следует отметить, что при хорошей отделимости шлаковой корки из разделки последняя, как правило,

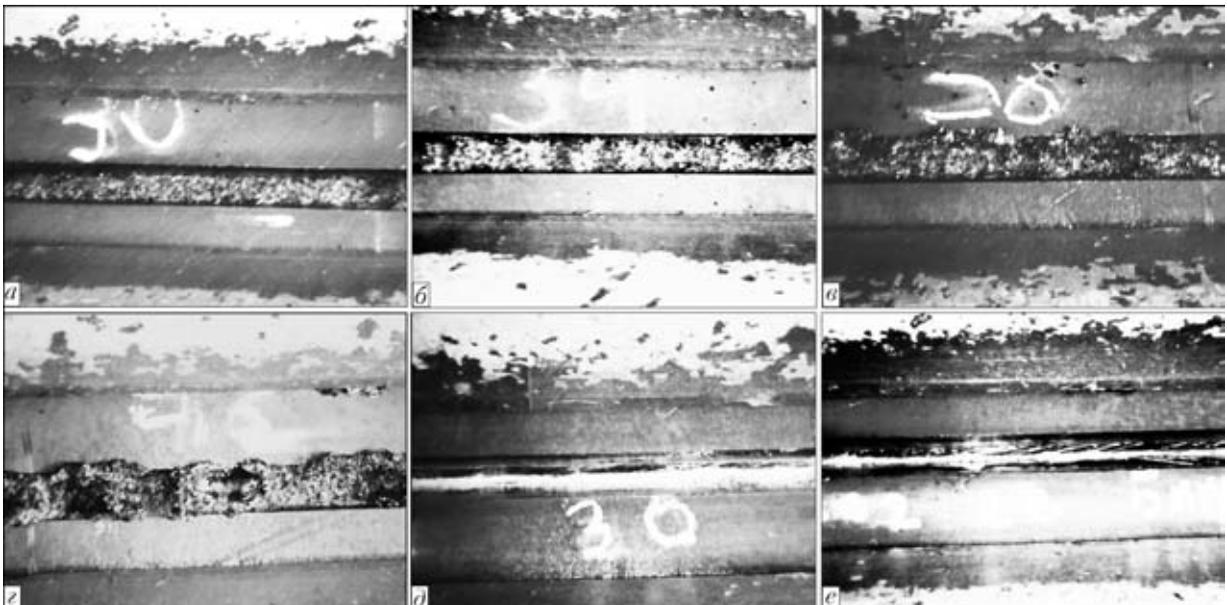


Рис. 3. Внешний вид внутренней поверхности шлаковой корки (а-в) и металла шва (д, е) (описание в тексте)

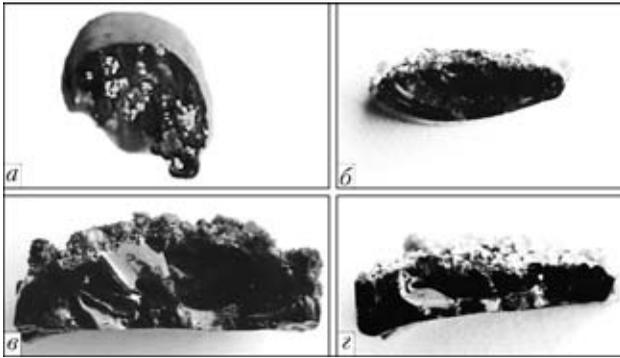


Рис. 4. Вид шлаковой корки при различном характере ее отделимости: а — отличная ( $U_d = 30$  В,  $b_0 = 4$  мм, № 1-1); б — отличная ( $U_d = 34$  В,  $b_3 = 4$  мм, № 1-4); в — неудовлетворительная ( $U_d = 30$  В,  $b_0 = 4$  мм, № 3-2); з — удовлетворительная ( $U_d = 31$  В,  $b_0 = 4$  мм, № 3-2)

имеет выпуклую (эллипсоидную) форму (рис. 4, а, б). При образовании плоской поверхности шва внутри разделки корка имеет угловатую форму (рис. 4, в, з) и отделяется, как правило, с затруднениями. Плохая отделимость шлаковой корки на четвертом участке обусловлена прежде всего неудовлетворительным формированием шва — по оси шва появились горбы и наплывы, а также подрезы и несплавления. Очевидно, что с повышением напряжения дуги в узкой разделке снижается стабильность процесса ее горения и, как следствие, ухудшаются формирование шва и отделимость корки. Следовательно, при данных размерах разделки хорошую отделимость шлака следует ожидать при меньшем напряжении дуги или увеличении параметра  $b$ . Для уточнения этого предположения были проведены расчеты ширины поверхности наплавленного слоя металла (параметров  $b_n$ ) для каждого направленного слоя по формуле:  $b_n = (0,3640 \cdot 2h) + b_0$ , где  $0,3640 = \text{tg } 20^\circ$ ;  $h$  — толщина наплавленного слоя металла. Из данных табл. 2 видно, что по мере заполнения разделки наплавленным металлом (при наложении следующего прохода или уменьшении скорости сварки) параметр  $b$  увеличивается и при постоянстве  $U_d$  отделимость шлаковой корки улучшается (проходы № 3-2, 3-3, 3-4). Такая же закономерность наблюдалась и при сварке проволокой диаметром 3 мм. Однако это справедливо только при стабильном режиме свар-

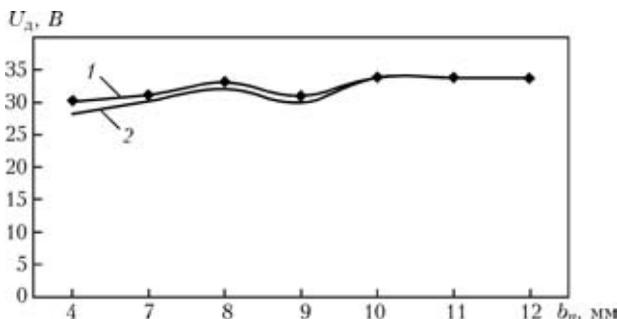


Рис. 5. Зависимость предельного значения  $U_d$  от параметра  $b_n$ : 1 — удовлетворительная отделимость; 2 — отличная

ки — в противном случае отделимость корки ухудшается (проходы № 4-1, 5-1, 5-2).

Характерно, что для каждого значения параметра  $b$  существует предельное значение  $U_d$ , выше которого наблюдается ухудшение отделимости корки (рис. 5). Так, установлено, что для  $b_n = 4 \dots 5$  мм напряжение  $U_d$  составляет 29...30 В, что подтверждают результаты наплавки первого прохода № 1-1, 3-1 ( $b = 4$  мм) и № 2-1 ( $b = 5$  мм): во всех наплавках отделимость корки самопроизвольная или легкая при  $U_d \leq 30$  В. При этом форма поверхности шва была вогнутой, с плавным переходом к основному металлу.

Для сравнения характера отделимости шлаковой корки флюса АН-47ДП с таковым других флюсов, сваривали канавки с  $b_0 = 4$  и 5 мм при напряжении дуги 29, 30, 31 и 32 В под флюсами АН-60 и АН-348-А. Во всех случаях сварки первого прохода корка отделялась с помощью инструмента при значительных усилиях, несмотря на хорошее формирование металла швов на первых участках канавки. При этом объем шлака в разделке во всех случаях заметно больше, чем при сварке под флюсом АН-47ДП. Вследствие плохой отделимости определить ширину площади контакта шлака  $B_{шл}$  со стенками стыка не удалось. Полученный результат указывает, очевидно, на то, что при одинаковом режиме сварки объем расплавленного в единицу времени флюса для разных марок флюсов различен и, следовательно, лучшую отделимость шлаковой корки из разделки обеспечивает флюс с минимальным значением указанного объема, поскольку в этом случае ширина  $B_{шл}$  минимальна.

С учетом полученных результатов исследований сварку контрольных стыков выполняли по следующей технологии: корень шва заваривали проволокой Св-08Г2С в смеси 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>, а затем выполняли проходы под флюсом (пять проходов с каждой стороны). Ток на всех проходах был неизменным (550...600 А для проволоки диаметром 4 мм и 500...550 А для проволоки диаметром 3 мм). Напряжение на дуге и скорость сварки для каждого прохода выбирали из табл. 2 и получали следующие значения: для проволоки диаметром 4 мм: первый проход 28...29 В и 27,8...31,5 м/ч; второй и третий — 29 В и 31,5 м/ч; четвертый — 29...31 В и 27,8 м/ч; пятый — 32 В и 24,6 м/ч.

Для проволоки диаметром 3 мм: первый – четвертый проходы — 29 В и 24,6 м/ч; пятый — 30...32 В и 21,7...27,8 м/ч.

При этом после выполнения каждого прохода шов охлаждался на воздухе до температуры ниже 200 °С, а с целью уменьшения деформации стыка пластины переворачивали и выполняли два последующих прохода. Полностью стык заваривали

**Т а б л и ц а 3. Показатели механических свойств сварных соединений, изготовленных под флюсом АН-47ДП на стали 09Г2С толщиной 40 мм проволоками фирмы «Multimet» ИМТ 9 (S2), ИМТ 6 (S2Mo), ИМТ 9Si (S2Si) и проволокой Св-08Г2С (SU31)**

№ шва	Марка проволоки (диаметр, мм)	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\varphi$ , %	Ударная вязкость KCV, Дж/см <sup>2</sup> (энергия удара по ISO-V, Дж) при температуре			
						+20 °С	0 °С	-20 °С	-40 °С
1	ИМТ 9 (4)	409,8 415,3	501,1 500,0	25,3 30,3	63,5 66,0	138,2...148,4 (114,6)	84,0...139,7 (86,8)	51,3...92,8 (53,3)	42,7...48,6 (35,8)
2	ИМТ 6 (4)	492,7 505,2	586,3 587,4	23,7 24,7	59,1 59,8	105,3...116,6 (88,0)	90,0...118,5 (84,5)	73,0...83,8 (61,5)	57,4...71,2 (50,8)
3	ИМТ 9Si (4)	421,7 434,9	523,7 545,4	30,0 31,7	60,0 62,1	134,0...152,6 (117,0)	108,1...120,2 (89,8)	83,4...108,1 (51,4)	42,5...61,2 (39,8)
4	Св-08Г2С (3)	546,6 585,1	642,0 659,4	25,0 27,3	55,4 59,8	158,2...189,7 (140,3)	115,4...142,8 (99,9)	54,5...103,7 (61,3)	56,1...60,0 (46,6)



Рис. 6. Металл шва, сваренный под флюсом АН-47ДП с проволокой ИМТ 9 (пять проходов с каждой стороны)

за пять проходов с каждой стороны, при этом раскладку швов не применяли.

Сварка контрольных стыков показала, что выбранный режим обеспечивал хорошее формирование швов и легкую отделимость шлаковой корки уже на первом проходе. Благодаря физико-механическим свойствам шлака флюса АН-47ДП его корка растрескивалась при охлаждении на всех без исключения последующих проходах и отделялась самопроизвольно.

Процесс заполнения разделки на всех контрольных стыках отличался идентичностью режимов сварки и отсутствием пор, трещин и других дефектов в металле шва (рис. 6).

Показатели механических свойств полученных соединений были выше требуемого (47 Дж при -20 °С). Нейтральный характер шлаковой основы

флюсов, содержащих ZrO<sub>2</sub>, и ее способности противостоять образованию силикатных включений в металле швов [3] позволил при сварке под новым флюсом обеспечить необходимое легирование металла шва при использовании сварочных проволок, содержащих марганец или молибден. Так, если достигнутый уровень ударной вязкости превышал требуемый при всех вариантах сварки на 10...30 %, то для проволок с молибденом (ИМТ 6) и марганцем (Св-08Г2С) заданный уровень хладостойкости сохранился даже при более низкой температуре испытаний (-40 °С). Из этих данных следует, что применение флюса АН-47ДП вполне отвечает требованиям технологии многослойной однодуговой сварки толстостенного проката как в отношении сварочно-технологических свойств (бездефектное формирование швов, легкая отделимость шлаковой корки из глубокой канавки), так и показателей прочности, пластичности и стойкости металла швов против хрупкого излома.

Таким образом, новый плавный флюс марки АН-47ДП, изготовленный методом двойного рафинирования расплава, может быть рекомендован для производства сварных конструкций ответственного назначения из низколегированных сталей в сочетании с проволоками того же класса.

1. Флюс для сварки трубопроводов из низколегированных сталей повышенной прочности / А. В. Залевский, В. И. Галинич, В. В. Подгаецкий и др. // Автомат. сварка. — 1977. — № 3. — С. 49.
2. International standard ISO 14171:2002. Welding consumables — Wire electrodes and wire-flux combinations for submerged arc welding of non alloy fine grain steels — Classification.
3. Залевский А. В., Парфессо Г. И., Маркашова Л. И. О металлургической роли двуокиси циркония в сварочных флюсах // Автомат. сварка. — 1982. — № 4. — С. 54.

The paper gives the results of testing a new fused flux designed for welding higher strength low-alloyed steels. The flux, designated AN-47DP, was developed under the innovation project of the E.O.Paton Electric Welding Institute Technology Park. The flux is produced by the method of double refining.

Поступила в редакцию 25.06.2007