

СВАРКА АТIG КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Д. Р. БАЙИЧ, инж. (Техн. ун-т, г. Подгорица, Черногория),
М. М. САВИЦКИЙ, д-р техн. наук, Г. М. МЕЛЬНИЧУК, А. Ф. ЛУПАН, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучена эффективность применения сварки конструкционных низколегированных углеродистых и теплоустойчивых сталей вольфрамовым электродом в инертном газе с активирующим флюсом (сварка АТIG). Показано, что увеличение проплавающей способности дуги на пониженных токах может инициировать образование в соединениях структурных составляющих, повышающих прочность и снижающих пластичность металла. Для устранения влияния этого фактора на конструктивную прочность соединений целесообразно их подвергать отпуску, в том числе местному, совмещенному с автопрессовкой, используемой для получения удовлетворительной геометрии шва.

Ключевые слова: аргодуговая сварка, активирующий флюс, формирование шва, автопрессовка, конструкционные стали, химический состав, механические свойства, структура металла

Выполненные в ИЭС им. Е. О. Патона исследования в области металлургии сварки высокопрочных сталей и сплавов титана показали, что интенсификация окислительно-восстановительных реакций в дуге с инертной атмосферой малыми дозами химически активных элементов увеличивает глубину проплавления свариваемого металла и улучшает качество сварных соединений [1]. На основе эффекта активации в настоящее время разрабатываются перспективные технологические процессы сварки неплавящимся и плавящимся электродами в инертных газах [2]. Причем в некоторых странах, в частности США и Японии, эти работы были включены в перечень приоритетных направлений развития сварки [3, 4]. В ИЭС им. Е. О. Патона накоплен большой опыт применения активаторов для многих классов сталей — от высоколегированных до низкоуглеродистых кипящих. Целью настоящей работы было ознакомление читателей с некоторыми новыми результатами, касающимися сварки конструкционных углеродистых низколегированных и теплоустойчивых сталей.

Использование эффекта активации при сварке неплавящимся электродом конструкционных сталей, как показали наши исследования, существенно улучшает технологические и экономические показатели сварочных технологий (табл.1). В связи с увеличением глубины проплавления на стали толщиной 5...16 мм не требуется разделка кромок, сокращается количество проходов и суммарное время сварки, уменьшается расход присадочного металла, защитного газа и электроэнергии.

Что касается элементов-активаторов, то их стоимость в общем балансе затрат не-

значительна из-за малого расхода. Экспериментально установлено, что при использовании в качестве активатора кислорода его расход, отнесенный к массе расплавляемого металла, должен составлять около 0,02 %. Это количество кислорода можно получить из основного металла, например, при сварке слабораскисленных сталей. Однако в виду кратковременного пребывания расплавленного металла в жидком состоянии и непостоянства содержания кислорода в стали разных плавок обеспечить его равномерное поступление в междуэлектродный промежуток довольно сложно, а интенсификация его выделения из глубинных слоев сварочной ванны может привести к образованию пор. Более стабильные результаты дает введение кислорода через защитную атмосферу [5]. Но и в этом случае возникают определенные трудности с обеспечением точной подачи кислорода и защиты вольфрама от окисления.

Таблица 1. Затраты материалов и времени на погонную длину шва 1 м при сварке сталей способами TIG и АТIG

Способ сварки	Толщина свариваемого металла, мм	Количество проходов	Время сварки, мин	Расход		
				провода, кг	аргона, м ³	электроэнергии, кВт·ч
TIG						
односторонняя	5	3	26	0,28	0,26	1,10
	8	4	34	0,50	0,34	1,49
	10	5	40	0,64	0,43	1,95
двусторонняя	12	5	43	0,78	0,43	1,90
	14	7	60	0,81	0,60	2,60
	16	9	77	1,10	0,77	3,40
АТIG						
односторонняя	5	1	7	0,06	0,07	0,13
	8	1	15	0,08	0,15	0,63
	10	1	20	0,10	0,20	0,87
двусторонняя	12	2	24	0	0,24	0,88
	14	2	30	0	0,30	1,10
	16	2	40	0	0,40	1,53



Рис. 1. Емкости для хранения и нанесения активирующего флюса

Эффективным способом введения активаторов в зону сварки является применение активирующих флюсов. В ИЭС им. Е. О. Патона разработана серия активирующих флюсов (высокодисперсных смесей оксидного и оксидно-фторидного типов для разных классов сталей), а также способы их применения в различных условиях [6], которые позволяют получить необходимое количество активаторов в междуэлектродном промежутке при расходе флюса 1... 2 г на погонную длину стыка 1 м. Широкое распространение получил вариант нанесения пастообразного флюса с помощью флюсографа многократного использования, заправляемого из специальных емкостей (рис. 1). При этом компоненты флюса участвуют в обменных реакциях, происходящих на поверхности сварочной ванны, что позволяет микролегировать и модифицировать металл шва с целью улучшения его структуры и свойств. Представленные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что эти операции реальны и управляемы: количество элементов, переходящих в металл шва, соответствует их содержанию во флюсе.

Указанный расход флюса практически не влияет на состав отработанных газов в месте расположения сварочного поста. Оценка интенсивности выделения твердой составляющей сварочного аэрозоля (ТССА)* показала, что в процессе сварки в аргоне низколегированной стали марки 12Х1МФ на предельных токах (до 300 А) с применением оксидного флюса ВС-2э ТССА составляет 0,274 г на погонную длину шва 1 м. Это преимущественно оксиды хрома (0,0179), марганца (0,0156), титана (0,0139), кремния (0,0175) и железа (0,1625). При расходе аргона 0,2 м³ на погонную длину шва

* Авторы благодарят О. Г. Левченко и его сотрудников за выполненную оценку.

Таблица 2. Химический состав и механические свойства металла различных участков сварного соединения

Участок сварного соединения	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	O ₂	N ₂
ОМ	0,18	0,33	1,52	0,05	0,02	< 0,005	0,013	0,015	0,0021	0,0061
Шов	0,16	0,31	1,50	0,07	0,02	< 0,005	0,012	0,015	0,0025	0,0051
ОМ	0,11	0,23	0,80	0,23	0,05	0,01	0,015	0,017	0,0020	0,0086
Шов	0,09	0,21	0,81	0,27	0,05	0,01	0,013	0,017	0,0023	0,0078
ОМ	0,17	0,25	0,32	1,31	2,82	0,35	0,002	0,010	0,0018	0,0080
Шов	0,16	0,22	0,30	1,35	2,81	0,33	0,002	0,010	0,0023	0,0071

Примечание. Здесь ОМ — основной металл.

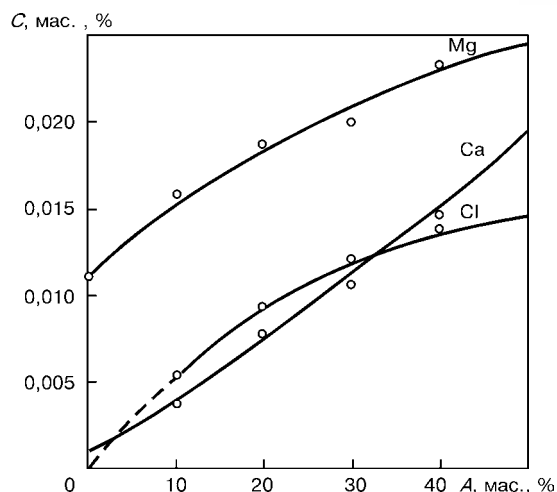


Рис. 2. Зависимость массовой доли элементов в металле шва С от их содержания в активирующем флюсе А

1 м общее количество аэрозолей не превышает 0,1 мас. %, т. е. применение сварки АТИГ не требует дополнительных средств для защиты персонала, поскольку может выполняться в тех же условиях, что и сварка ТИГ. Не требуется также специализированное сварочное оборудование, так как условия возбуждения и горения дуги в целом определяются защитным газом, а активаторы действуют в локальных зонах междуэлектродного промежутка.

Характерной особенностью сварки АТИГ является образование узких швов с глубоким проплавлением основного металла без разделки кромок: коэффициент их формы при U-образном проплавлении составляет ≤ 1 (рис. 3, а), а структура состоит из мелкодисперсных дезориентированных кристаллитов, что обуславливает высокую сопротивляемость металла образованию кристаллизационных трещин [2]. Не вступая в дискуссию со сторонниками не подтвержденного экспериментально предположения Хейпли о первостепенном влиянии на проплавление стали поверхностного натяжения жидкого металла, отметим, что указанная особенность сильно влияет на комплекс технологических и служебных свойств сварных соединений. С одной стороны, она способствует снижению уровня сварочных напряжений и, следовательно, вызванных ими остаточных деформаций. Измерение последних показало, что при сварке АТИГ плоских стыковых соединений продольные и поперечные деформации примерно в два раза меньше, чем при сварке ТИГ, а угловые деформации

Продолжение табл. 2

Участок сварного соединения	Механические свойства					
	σ_b , МПа	σ_s , МПа	δ , %	KCV , Дж/см ² , при T , °С		
				+20	-20	-20
				Без отпуска		Отпуск 650 °С
ОМ	508,0	385,0	26,3	64,7	27,3	30,5
Шов	567,1	437,0	20,6	39,8	17,7	31,9
ОМ	459,7	360,1	29,1	71,1	32,3	34,0
Шов	485,8	375,6	22,9	41,5	23,2	35,3
ОМ	868,6	598,4	27,1	73,4	36,7	37,6
Шов	779,3	670,1	19,0	30,1	18,2	37,0

вообще близки к нулю. Эти результаты коррелируют с данными, полученными при испытаниях сварных соединений на трещиностойкость: при сварке по способу АТИГ стойкость соединений против образования горячих и холодных трещин выше стойкости соединений, выполненных сваркой ТIG [2].

С другой стороны, сварные швы с глубоким проплавлением, сформированные из основного металла без присадочной проволоки, которая, как правило, имеет пониженное содержание углерода, характеризуются более высокой склонностью к закалке, усиливаемой еще и тем, что сварка АТИГ осуществляется с меньшей погонной энергией, и скорость охлаждения сварных соединений возрастает. Последнее способствует более интенсивному образованию закалочных структурных составляющих в металле шва и ЗТВ, которые повышают его прочность, снижая пластичность и вязкость. Как следует из табл. 2, эта тенденция достаточно четко прослеживается в соединениях низколегированных сталей при испытании образцов без последующей термической обработки. Применение высокого отпуска устраняет различие свойств, обусловленное сваркой в пределах данного химического состава стали, в том числе и ударной вязкости при отрицательной температуре. Причем, как свидетельствуют результаты работы [6], этот эффект может быть достигнут посредством не только печной, но и местной термической обработки с использованием сварочной дуги при ее совмещении с выполнением декоративного слоя для улучшения геометрических размеров шва (рис. 3, б). Что касается влияния колебаний химического состава, присущих каждой марке стали, то оно всегда будет проявляться через разброс показателей механических свойств. Однако в отличие от соединений, выполненных другими способами дуговой сварки, изменение показателей механических свойств в нашем случае происходит синхронно для основного металла и металла шва тем более, что они весьма близки по химическому составу и свойствам.

Аналогичная тенденция прослеживается и для сталей, изготовленных по стандартам Украины, с той лишь разницей, что содержание в них примесей (S, P, O₂ и N₂) в 2...3 раза выше. Последнее обстоятельство способствует увеличению разброса результатов испытаний на ударную вязкость. Так, например, при сварке стали 20 без послесварочного

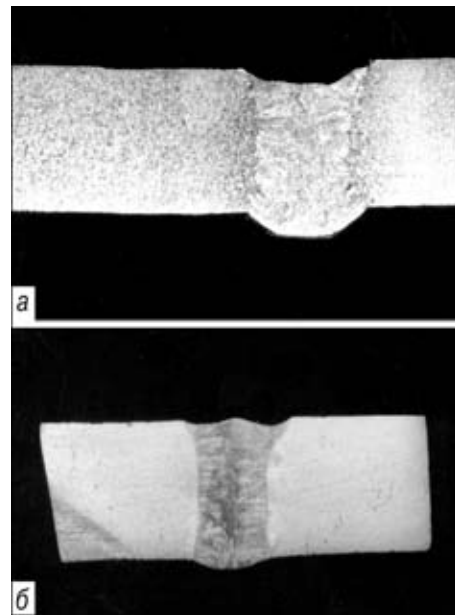


Рис. 3. Сварной шов, выполненный сваркой АТИГ без присадочной проволоки: а — без автоопрессовки; б — с автоопрессовкой

отпуска ударная вязкость KCV^{+20} составила для основного металла 54,1...39,7, а для металла шва 36,3...29,3 Дж/см². Немного лучшие показатели ударной вязкости получены при испытании соединения из сталей 12Х1МФ и 10ХСНД. Однако общая тенденция снижения ударной вязкости литого металла шва непосредственно после охлаждения со сварочного нагрева зафиксирована и в этих случаях, если не применяли послесварочный отпуск. Это обусловлено более высокими скоростями охлаждения сварного соединения при сварке АТИГ и образованием менее пластичных составляющих структуры из-за повышенной концентрации нагрева. При отпуске механические свойства сварных соединений, выполненных сваркой АТИГ, стабилизировались на уровне свойств основного металла. Это позволяет достигать равнопрочности металла всех участков сварного соединения.

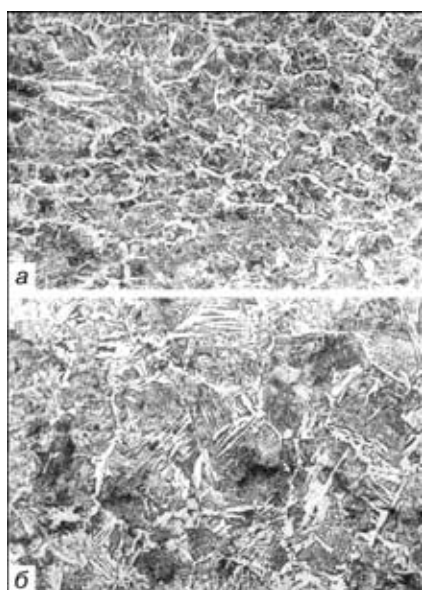
Влияние последующего местного отпуска на механические свойства соединений труб из сталей 20 (размером 8×160 мм), 10ХСНД (6×120 мм) и 12Х1МФ (6×76 мм), применяемых в энергетических установках, представлено в табл. 3. Сварку основного слоя шва в первом случае выполняли на токе 200, а во втором и третьем — 150 А. Для получения декоративного слоя шва (рис. 3) способом автоопрессовки и отпуска металла в предыдущем слое и ЗТВ изменяли скорость сварки таким образом, чтобы обеспечить оптимальное сочетание скоростей распространения тепла и нарастания термических напряжений в сварном соединении в период развития пластического течения металла.

Данные табл. 3 и рис. 3 показывают, что влияние автоопрессовки на форму и качество шва весьма положительное и может быть использовано для практических целей. При этом улучшается его структура. Литая дендритная структура, сформировавшаяся в процессе сварки первого (основного) слоя шва, после автоопрессовки становится менее четкой («размытой») (рис. 4). Аустенитное



Таблица 3. Механические свойства соединений сталей 20, 12Х1МФ и 10ХСНД при сварке АТИГ с автоопрессовкой

Марка стали	Участок сварного соединения	Температура испытаний, °С	σ_b , МПа	σ_s , МПа	δ , %	ψ , %	Ударная вязкость, Дж/см ²		
							С автоопрессовкой		Без автоопрессовки
							KCU	KCV	KCV
10ХСНД	ОМ	20	736,0	589,4	21,3	66,6	166,3	72,4	72,0
	Шов		751,2	674,3	20,0	55,6	159,1	71,1	23,1
12Х1МФ	ОМ	20	523,9	328,7	23,1	67,3	117,1	67,4	67,4
	Шов		567,1	368,1	26,7	64,1	121,3	69,9	32,6
Ст 20	ОМ	20	440,7	356,1	24,1	65,0	116,7	70,0	69,7
	Шов		499,3	374,4	22,6	71,6	118,1	78,0	29,1
	ОМ	100	495,4	268,3	18,2	62,0			
	Шов	200	547,8	263,5	17,3	58,6			
	ОМ	250	531,7	256,4	16,2	51,4			
	Шов	350	526,2	232,1	18,0	53,3			

Рис. 4. Микроструктура ($\times 200$, уменьш. 4/5) металла шва (а) и металла ЗТВ (б) при сварке с автоопрессовкой

зерно в металле ЗТВ при этом практически не изменяется. Что касается вторичной структуры металла шва, то после сварки в основном слое шва на сталях 10ХСНД и 12Х1МФ ее можно идентифицировать как смесь глобулярного бейнита (HV_{50} 300...330) с мартенситом (HV_{50} 400...410). На участке перегрева металла ЗТВ пластины мартенсита встречаются реже и структура металла в основном представлена бейнитом (HV_{50} 270...350). После проведения автоопрессовки структура металла шва и металла ЗТВ становится более дисперсной. Микротвердость ее составляющих при этом практически не изменяется, снижается только разброс ее значений.

Для обеспечения необходимого сочетания прочностных характеристик сварных соединений с по-

Effectiveness of application of ATIG welding of structural low-alloyed carbon and heat-resistant steels was studied. It was shown that improved arc penetrability at lower currents may initiate formation of structural components in the joints, which increase the strength and lower the ductility of the metal. In order to eliminate the influence of this factor on the structural strength of the joints, it is rational to conduct their annealing, including local annealing combined with self-pressing, used to produce a satisfactory weld geometry.

казателями пластичности и вязкости переплав металла в аргоне всегда имеет положительное значение. Применение активирующего флюса не внесло противопоказаний. Согласно результатам измерений, проведенных с использованием микроскопа «Квантисмет-720», более крупные и вытянутые в цепочки сульфиды и оксиды, присутствующие в основном металле, измельчаются и глобулизируются в швах, выполненных способом АТИГ. Если объемная доля сульфидов в основном металле составляла примерно 0,010, а оксидов 0,004...0,008 %, то в металле шва было обнаружено 0,0075 % сульфидов и 0,0073 % оксидов.

Таким образом, применение сварки АТИГ в комбинации с автоопрессовкой для углеродистых, марганцовистых и низколегированных сталей, используемых в энергетическом оборудовании, позволит повысить качество сварных соединений без применения таких сложных и дорогостоящих технологических приемов, как разделка кромок, объемный печной отпуск, а также специальных присадочных проволок.

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 767 с.
2. Савицкий М. М., Кушниренко Б. М., Олейник О. И. Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами (АТИГ-процесс) // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 20–28.
3. Gordon J. R. Perspectives on welding research and development in the USA // Weld. Review Intern. — 1995. — № 9. — С. 95–108.
4. Технологии сварки и соединений в XXI веке // Jap. Weld. Soc. — 2001. — 70, № 3. — С. 6–18.
5. Способы применения активаторов для сварки в инертном газе / М. М. Савицкий, А. Ф. Лупан, Г. М. Мельничук, О. И. Олейник // Автомат. сварка. — 2000. — № 3. — С. 48–49.
6. Савицкий М. М., Кулик В. М., Бурский Г. В. Особенности дуговой обработки закаляющихся сталей без расплавления // Там же. — 2000. — № 5. — С. 31–36.

Поступила в редакцию 04.03.2002,
в окончательном варианте 27.03.2002