



УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ МЕТАЛЛА ШВА ПУТЕМ УРЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ОКИСЛЕННОСТИ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ ПРИ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

С. Т. РИМСКИЙ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Определена активность растворенного в металле сварочной ванны кислорода с использованием электрохимического метода непосредственно в процессе сварки низколегированной стали в окислительных защитных газах. Обосновано прогнозирование механических свойств металла швов в зависимости от активности кислорода в жидком металле и погонной энергии сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, окислительные защитные газы, сварочная ванна, электрохимический метод, активность кислорода, погонная энергия, металл шва, структура и механические свойства

Известно, что структура и свойства металла сварных швов на низколегированных сталях в значительной степени зависят от содержания в нем кислорода [1, 2]. При дуговой сварке стали в окислительных защитных газах кислород в жидком металле капель и сварочной ванны содержится в различных формах: как в растворенном, так и в химически связанном состоянии в виде частиц оксидов и комплексных включений, находящихся во взвешенном состоянии. Растворимый в металле кислород $[O]_p$ или активность кислорода a_o определяет ход процессов раскисления, рафинирования и вторичного окисления, влияет на конечный состав металла шва, процессы структурообразования и его свойства.

Методы анализа содержания кислорода в металле швов, которые применяются на практике, позволяют оценить его общую концентрацию, т. е. суммарное содержание кислорода $[O]_c$, активного и связанного в химические соединения. Эта операция требует нескольких часов: для отбора пробы, изготовления образца, транспортировки его в лабораторию и анализа методом вакуум-плавления.

Вместе с тем в большой металлургии получает все большее распространение метод оценки активности кислорода в расплавах на основе железа, заключающийся в измерении электродвижущей силы (ЭДС), которая возникает в концентрационном элементе с твердым оксидным электролитом [3]. Важной особенностью этого метода является то, что оксидная фаза, появляющаяся в жидком металле в результате его раскисления, не влияет на уровень генерируемой ЭДС, а значит и на активность кислорода в металле. Следовательно, измерения можно проводить без предварительной выдержки датчика в расплаве, осуществляемой с

целью стабилизации процессов в цепи гальванического элемента, что имеет существенное значение при исследовании кратковременных быстротекущих процессов в сварочной ванне. Диапазон измеряемых значений активности кислорода находится в пределах 0,0001...0,2 мас. % [4].

Содержание растворимого кислорода можно определить электрохимическим методом за 15...20 с, погружая в сварочную ванну кислородный гальванический элемент [5, 6]. Активность кислорода a_o (как величина доступная для прямых измерений принимается в качестве меры окисленности металла сварочной ванны) и определение суммарного содержания кислорода $[O]_c$ в шве взаимно дополняют друг друга, поскольку разность этих измерений $\Delta[O] = [O]_c - a_o$ характеризует содержание кислорода, связанного в химические соединения, т. е. содержание оксидных и комплексных включений в металле [6].

Кислород, участвуя в металлургических реакциях при сварке плавлением, в зависимости от его концентрации в расплаве может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на технологическую прочность [7, 8], склонность к образованию пор [8], показатели механических свойств сварных швов [9].

В настоящей работе анализируются механические свойства и структура металла швов во взаимосвязи с изменением активности кислорода в металле сварочной ванны непосредственно в процессе сварки низкоуглеродистой стали в окислительных защитных газах.

Для получения данных о содержании растворимого кислорода в расплаве использован электрохимический метод. Принципиальная схема экспрессного контроля активности кислорода a_o в металле сварочной ванны посредством измерения ЭДС, генерируемой в кислородном концентрационном гальваническом элементе на основе твердого электролита, показана на рис. 1. Применяли серийно выпускаемый промышленностью



датчик окисленности из ZrO_2 , стабилизированной Y_2O_3 , с электродом сравнения $Mo-MoO_2$, который погружали в низкотемпературную зону сварочной ванны на глубину 4...6 мм. Расстояние между датчиком, термопарой и дугой составляло 10...12 мм. Локальный замер температуры металла сварочной ванны проводили вольфрамиевой термопарой ВР 5/20. Для регистрации ЭДС, наводимой в датчике и термопаре, использовали цифровые вольтметры с диапазоном измерения напряжения от нуля до 1000 мВ.

По измеренным значениям ЭДС гальванической ячейки и температуре металла сварочной ванны определяли активность кислорода [4]

$$\lg a_o = 2,685 - \frac{10,086E + 5661}{T},$$

где E — ЭДС, генерируемая в цепи концентрационного элемента, мВ; T — температура сварочной ванны, К.

Опытные сварки стыковых соединений с V-образной разделкой кромок на стали ВСтЗсп выполняли на токе обратной полярности проволокой Св-08Г2С диаметром 2 мм в CO_2 и смеси газов $Ar + 20\% CO_2$. Изменение активности кислорода a_o в металле сварочной ванны изучали в зависимости от напряжения на дуге в интервале 28...36 В при фиксированных значениях сварочного тока: 400, 450, 500 А и погонной энергии g/v сварки от 5 до 35 кДж/см. Результаты измерений a_o представлены на рис. 2 и 3.

Как видно из рис. 2, при сварке в смеси $Ar + 20\% CO_2$ активность кислорода a_o в металле сварочной ванны линейно увеличивается с возрастанием напряжения дуги, причем наиболее

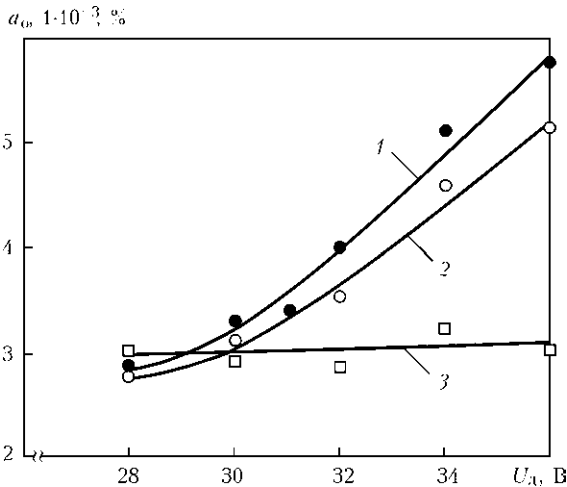


Рис. 2. Изменение активности кислорода a_o в металле сварочной ванны в зависимости от напряжения на дуге при сварке стали в смеси газов $Ar + 20\% CO_2$: 1 — $I_{св} = 400$; 2 — 450; 3 — 500 А

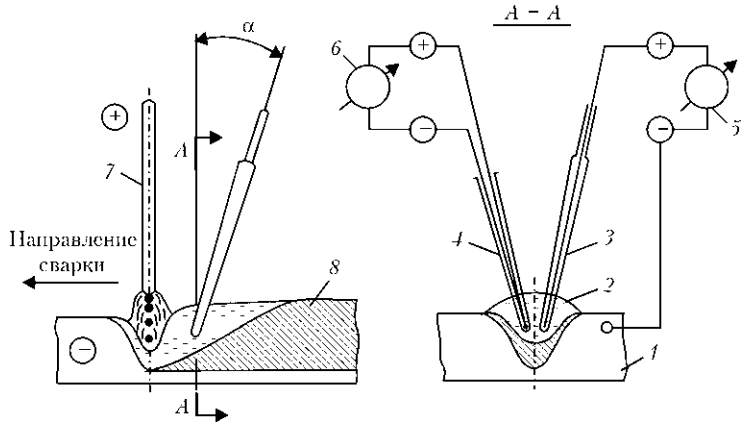


Рис. 1. Принципиальная схема экспрессного контроля активности кислорода в металле сварочной ванны: 1 — свариваемый металл; 2 — сварочная ванна; 3 — датчик окисленности; 4 — термопара; 5, 6 — измерительные приборы; 7 — сварочный электрод; 8 — сварной шов; α — угол наклона датчика и термопары, равный 15...20°

четко это проявляется при токе 400 А. Чувствительность a_o к изменению напряжения дуги уменьшается по мере повышения сварочного тока. При сварке на токе 500 А активность кислорода остается практически неизменной во всем интервале опробованных значений напряжения дуги. Определена область режимов сварки, в которой при неизменных составах защитного газа и сварочной проволоки изменение основных параметров режима ($I_{св}$, U_d , $v_{св}$) не вызывает существенного изменения активности кислорода, т. е. уровня окисленности жидкого металла. Как видно из рис. 3, по мере увеличения погонной энергии g/v сварки окисленность металла сварочной ванны сначала возрастает почти линейно, затем этот рост

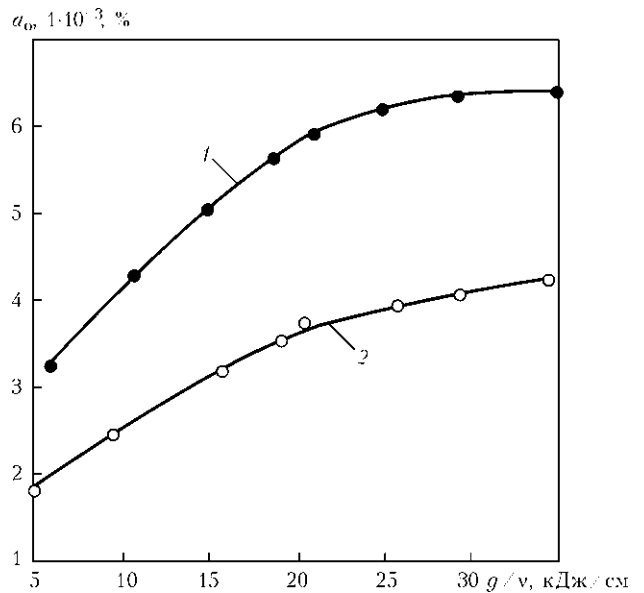


Рис. 3. Изменение активности кислорода a_o в металле сварочной ванны в зависимости от погонной энергии сварки стали в окислительных защитных газах: 1 — CO_2 ; 2 — $Ar + 20\% CO_2$



Механические свойства металла швов, выполненных в окислительных защитных газах на стали ВСтЗсп, в зависимости от погонной энергии сварки и активности кислорода в сварочной ванне

Защитный газ	g/v, кДж/см	[O] _c , мас. %	a _o , мас. %	Δ[O], мас. %	σ _{0,2} , МПа	σ _в , МПа	δ ₅ , %	ψ, %	KCV, Дж/см ² , при T, °C		
									+20	-20	-40
CO ₂	18,4	0,054	0,0056	0,0484	350	420	26,5	55,2	120	60	32
	28,8	0,061	0,0063	0,0547	335	380	25,2	53,4	98	42	16
Ar + 20 % CO ₂	18,4	0,035	0,0034	0,0316	384	530	33,0	66,0	165	115	55
	28,8	0,046	0,0040	0,0420	353	465	29,3	58,6	136	91	43

Примечание. Приведены средние значения по результатам испытаний трех-пяти образцов.

замедляется и в области режимов с погонной энергией выше 20 кДж/см активность a_o остается практически неизменной. Эта закономерность проявляется при сварке в CO₂ и смеси газов Ar + 20 % CO₂, имеющих различную окислительную способность. Такой характер зависимости активности кислорода от параметров режима сварки, по-видимому, можно объяснить, во-первых, увеличением доли основного металла в сварочной ванне, а также повышением содержания паров железа в атмосфере дуги, снижающим парциальное давление окислительных газов, а следовательно, и поглощение кислорода каплями электродного металла.

Дальнейшие исследования позволили оценить влияние погонной энергии сварки на активность кислорода в расплаве и показатели механических свойств швов, выполненных на стали ВСтЗсп в CO₂ и смеси газов Ar + 20 % CO₂ (таблица). Данные таблицы свидетельствуют о том, что с повышением окислительной способности защитной среды значения a_o возрастают. Однако они на порядок ниже общего содержания кислорода [O]_c в металле шва, определенного методом вакуум-плавления.

Изучена структура металла опытных швов с использованием оптического и электронного микроскопов, а также исследован характер γ→α-превращения этого металла в условиях непрерывного охлаждения с помощью чувствительной дилатометрической аппаратуры в сочетании с высокотемпературной металлографией на установке «Ала-Тоо». Для точного измерения температуры использовали термопару Pt – Pt-10 % Rh. Для предотвращения окисления или обезуглероживания образца дилатометр был вакуумирован до давления 2·10⁻⁴ торр, затем заполнен высокочистым аргоном. Для исследования влияния кислорода на особенности распада аустенита в металле швов образцы нагревали до температуры 1250 °C с выдержкой 2 мин при этой температуре, обеспечивающей одинаковый размер зерен. Охлаждение осуществляли со скоростью 5 °C/c в интервале от 800 до 500 °C. Во время этого термического цикла, имитирующего условия сварки, выполняли запись температуры в зависимости от времени удлинения образца с помощью специально проградуированного потенциометра КСП-4.

Установлено, что высокие значения ударной вязкости металла швов и максимальное количество игольчатого феррита в структуре металла швов достигаются при содержании химически связанного кислорода Δ[O] в швах от 0,015 до 0,045 % (рис. 4, а) и изменениях содержания легирующих элементов и примесей в следующих пределах, мас. %: 0,08...0,11 C; 0,40...0,55 Si; 1,2...1,5 Mn; 0,015...0,020 серы и фосфора. Отклонения концентрации кислорода в большую и меньшую сторону от указанного диапазона соп-

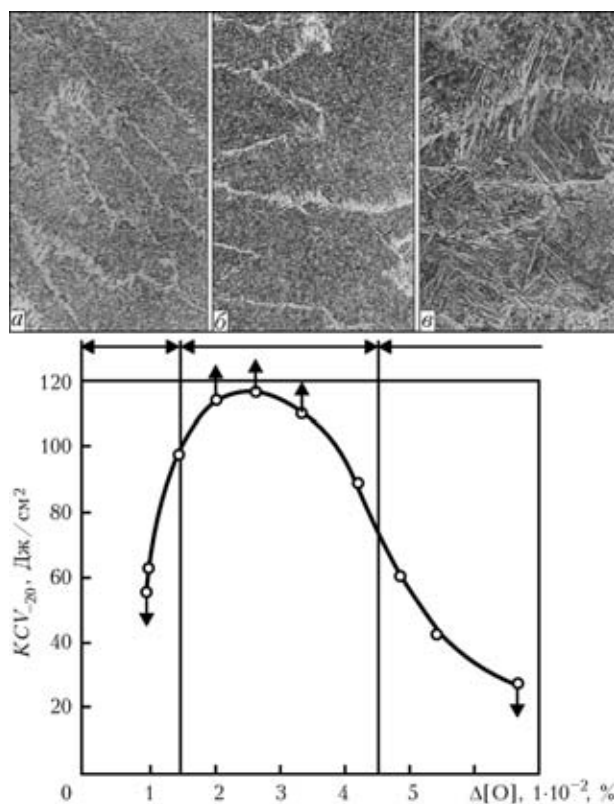


Рис. 4. Влияние кислорода, связанного в химические соединения Δ[O], на ударную вязкость и микроструктуру (×200) металла швов, выполненных в окислительных защитных газах: а — структура игольчатого феррита с бейнитными участками; б — структура, в которой преобладает игольчатый феррит; в — зернограничный феррит и пластинчатые выделения видманштеттового феррита

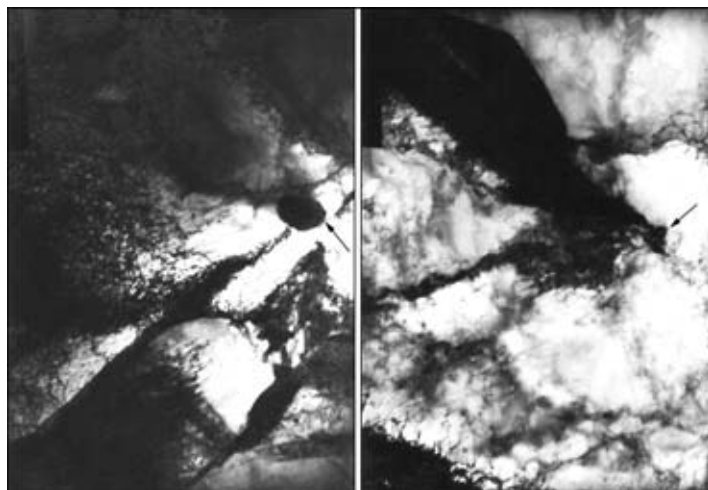


Рис. 5. Микроструктура ($\times 13200$) игольчатого феррита в металле швов, сваренных в смеси $Ag + 20\% CO_2$ (стрелками обозначены оксидные включения, связанные с конечными участками ферритных игл)

ровождаются уменьшением количества игольчатого феррита в структуре. В металле швов с высоким ($0,06...0,07\%$) содержанием кислорода $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение происходит при более высокой температуре от 720 до $680\text{ }^\circ C$, что на $20...30\text{ }^\circ C$ выше по сравнению со швами, содержащими его $0,045\%$ и менее. Понижение температуры начала превращения замедляет диффузионные процессы в области перлитного превращения. В результате основная часть аустенита претерпевает превращение по сдвиговому механизму с образованием мелкодисперсного игольчатого феррита. Обнаружено, что при содержании кислорода в пределах $0,015...0,045\%$ в структуре металла швов содержится $75...80\%$ игольчатого феррита (см. рис. 4, б). Электронно-микроскопические исследования показывают, что образовавшаяся игольчатая фаза не является бейнитом, поскольку по краям игл отсутствуют характерные выделения карбидной фазы (рис. 5). В матрице, окружающей растущую ферритную иглу, наблюдается повышенная плотность дислокаций.

Мелкодисперсные оксидные частицы размером менее $0,1\text{ }\mu m$, присутствующие в металле, являются зародышами ферритной фазы в теле аустенитных зерен, что подтверждается результатами электронно-микроскопических исследований (рис. 5). Уменьшение содержания игольчатого

феррита в швах с концентрацией кислорода менее $0,015\%$ (см. рис. 4, а) можно объяснить уменьшением количества оксидных частиц, т. е. количества центров зарождения ферритной фазы. Такие частицы в зависимости от их количества и размеров способствуют формированию той или иной морфологии ферритной фазы [1], оказывающей влияние на тонкую структуру металла и в итоге — на его склонность к хрупкому разрушению.

Таким образом, количественные данные об активности кислорода в жидком металле сварочной ванны не только дают возможность объяснить наблюдаемые при сварке явления, но и, что более важно, позволяют научно обоснованно планировать тот или иной эффект. В частности, такие данные крайне необходимы при разработке схем легирования новых сварочных проволок, выбора оптимального сочетания защитного газа — проволока, а также при разработке технологии сварки конструкционных сталей, более уверенно прогнозировать механические свойства металла швов.

1. *Cochrane R. C., Kirkwood P. R.* The effect of oxygen on weld metal microstructure // Proc. Intern. conf. on trends in steels and consumables for welding. — London, 14–16 Nov., 1978. — Cambridge: Weld. Inst., 1979. — 1. — P. 103–122.
2. *Куликов И. С.* Раскисление металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 504 с.
3. *Экспрессное определение содержания кислорода в стали / В. И. Явойский, А. Ф. Вишкарев, В. П. Лузгин и др.* — М.: Металлургия, 1975. — 120 с.
4. *Лузгин В. П., Явойский В. И.* Газы в стали и качество металла. — М.: Металлургия, 1983. — 229 с.
5. *А. с. СССР, G 01 N 27/46.* Способ определения активности элементов в расплаве / С. Т. Римский, В. Г. Свецинский, Т. П. Бондаренко и др. — Приор. 22.12.1986.
6. *Определение активности кислорода в жидком металле при сварке стали в защитных газах / В. Г. Свецинский, Т. П. Бондаренко, С. Т. Римский, В. В. Подгаецкий // Автомат. сварка.* — 1988. — № 2. — С. 73.
7. *Римский С. Т., Свецинский В. Г.* Влияние состава окислительной аргоновой смеси на стойкость шва на стали ВСтЗсп против образования кристаллизационных трещин // Там же. — 1977. — № 10. — С. 48–52, 54.
8. *Подгаецкий В. В.* Пори, включения і тріщини в зварних швах. — К.: Техніка, 1970. — 236 с.
9. *Свецинский В. Г., Римский С. Т., Петров Ю. Н.* Особенности тонкой структуры металла швов, сваренных в защитных газах // Автомат. сварка. — 1974. — № 8. — С. 5–8.

Activity of oxygen dissolved in the weld pool metal directly in the process of welding of low-alloy steel in the oxidising shielding gas atmosphere was determined by using the electrochemical method. Prediction of mechanical properties of the weld metal depending on the activity of oxygen in molten metal and on the welding heat input is substantiated.

Поступила в редакцию 24.06.2011