



ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ ПРИ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА

С. В. ДРАГАН, канд. техн. наук, Ю. А. ЯРОС, инж. (Нац. ун-т кораблестроения им. Адм. С. О. Макарова, г. Николаев)

Рассмотрено влияние энергетических параметров системы «дуга–источник питания» при комбинированной вольт-амперной характеристике источника питания и постоянной скорости подачи сварочной проволоки на стабильность процесса сварки при воздействии возмущений по длине дуги.

Ключевые слова: дуговая сварка, источник питания, саморегулирование сварочной дуги, стабильность процесса, технологические возмущения, комбинированная вольт-амперная характеристика, плотность тока

При выполнении автоматической сварки под флюсом стабильность дугового процесса [1] и постоянство геометрических размеров шва являются одними из основных условий получения качественного соединения.

Снижение силы тока до предела, при котором еще существует стабильный дуговой процесс при $v_{\text{под}} = \text{const}$, при сохранении требуемой глубины проплавления металла актуально для многих практических задач (сварке и наплавке разнородных металлов, сварке корневых швов в многопроходных швах, сварке двухслойных сталей, сварке термоупрочненных сталей и др.). Для обеспечения стабильности сварочного процесса применяют источники питания с жесткими и пологопадающими внешними характеристиками, а при необходимости снижения плотности тока — специальные схемы сварочных головок с системами стабилизации длины дуги [2]. Однако и в этих случаях не обеспечивается стабильность процесса сварки под флюсом при токах плотностью ниже $40 \dots 30 \text{ А/мм}^2$ вследствие неустойчивости системы дуга–источник питания (Д–ИП) [2].

Цель настоящей работы — обеспечение стабильности процесса и параметров швов при дуговой сварке под флюсом на токах плотностью менее 30 А/мм^2 с учетом влияния технологических возмущений (изменения вылета электрода), обусловленных погрешностями сборки соединений под сварку, наличием прихваток или неровностями наплавляемой поверхности.

Известно [3], что устойчивость системы Д–ИП как необходимое условие стабильности процесса дуговой сварки достигается при положительном значении коэффициента динамической устойчивости K_y в рабочей точке и достаточной интенсивности саморегулирования. Следовательно, стабильность процесса дуговой сварки на малых

плотностях тока может быть достигнута изменением взаимного положения статических характеристик дуги (СХД) и вольт-амперной характеристики (ВАХ) источника при сохранении $K_y > 0$. В данной работе рассматривается возможность осуществления стабильного процесса дуговой автоматической сварки под флюсом проволокой диаметром $2 \dots 5 \text{ мм}$ на токах плотностью ниже 30 А/мм^2 путем использования источников питания с комбинированной ВАХ.

Комбинированная характеристика состоит из двух ветвей: крутопадающей в диапазоне рабочих токов ($\kappa = 0,15 \dots 0,2 \text{ В/А}$) и пологопадающей ($\kappa = 0,02 \dots 0,04 \text{ В/А}$), включающейся автоматически при снижении напряжения в дуге до минимального значения, достаточного для поддержания горения дуги.

Известно, что при питании от источника тока с жесткой или пологопадающей ВАХ, при малых плотностях тока в электроде, при кратковременных уменьшениях длины дуги наблюдается резкое увеличение тока в электроде, а при возрастании длины дуги — обрывы дуги из-за низкого напряжения $U_{\text{х.х}}$ холостого хода источника (рис. 1, а). При питании дуги от источника тока с крутопадающей ВАХ и резких уменьшениях длины дуги (при пересечении прихватки) вследствие недостаточного увеличения тока и низкой интенсивности процесса саморегулирования происходят нарушения процесса, вызванные короткими замыканиями (рис. 1, б).

Рассмотрим работу системы Д–ИП с комбинированной ВАХ источника (рис. 1, в) при изменениях длины дуги. Точка с на рис. 1, в соответствует установленной длине дуги, а точки а, б, д, е — отклонениям, вызванным колебаниями ее длины. В точке с значение коэффициента динамической устойчивости $K_y \gg 0$, т. е. автоматически обеспечивается необходимое условие устойчивого горения дуги. При возникновении возмущений, вызывающих уменьшение длины дуги, СХД смещаются в положение, соответствующее точке е, которая также характеризует состояние устойчивого горения дуги. Однако при работе сис-

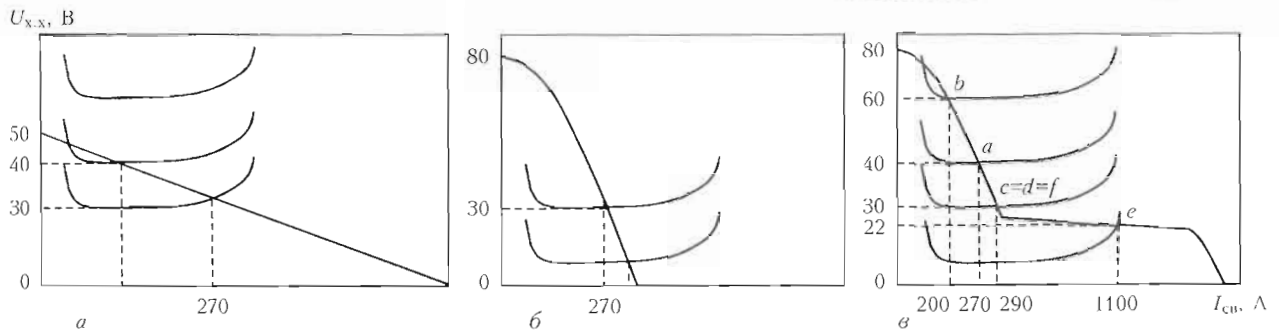


Рис. 1. Изменение положения СХД [4] относительно ВАХ источника питания при различных возмущениях длины дуги: а — пологопадающая ВАХ ($\kappa = 0,02$ В/А); б — крутопадающая ($\kappa = 0,15$ В/А); в — комбинированная

темы на падающем участке комбинированной ВАХ источника интенсивность саморегулирования дуги крайне мала, вследствие чего возвращение дуги к исходной длине происходит значительно медленнее, чем в диапазоне токов, соответствующих жесткой СХД. Такое протекание процесса наблюдается при любом положении СХД, вплоть до участка перехода крутопадающей ветви ВАХ в пологопадающую. При сокращении длины дуги до критического значения система переходит к режиму работы с использованием жесткого участка ВАХ, на котором обеспечивается высокая интенсивность саморегулирования, предотвращающая короткое замыкание дугового промежутка. В этом случае положение точки *e* будет определяться только величиной и скоростью нарастания возмущений. При возникновении возмущений, вызывающих удлинение дуги, высокое напряжение холостого хода источника ($U_{x,x} = 80$ В) поддерживает устойчивость системы ДИП, не допуская обрыва дуги.

Таким образом, комбинированная ВАХ источника питания позволяет обеспечить стабильный дуговой процесс в области малых плотностей тока в электроде.

Для подтверждения эффективности использования комбинированной ВАХ были проведены экспериментальные исследования.

Сварку выполняли трактором ТС-77 с постоянной скоростью подачи проволоки. Формирование комбинированной ВАХ для питания дуги осуществлялось путем параллельного включения двух тиристорных выпрямителей: ВДМ 25-630 с блоком балластных реостатов (крутопадающая) и ВДУ 25-1202 (пологопадающая ветвь ВАХ).

Таблица 1. Режимы сварки образцов

Диаметр электродной проволоки $d_{э}$, мм	Сварочный ток $I_{св}$, А (плотность тока j , А/мм ²)	Напряжение на дуге U_d , В
2	120...130 (38,2...95,5)	28...30
3	170...300 (24,1...42,5)	
4	220...500 (17,5...39,8)	30...32
5	280...500 (14,3...25,5)	

Осциллограммы тока и напряжения записывали с помощью электронного осциллографа IRIS и регистрировали на персональном компьютере. Размеры шва оценивали по макрошлифам с шестикратным увеличением.

Для определения минимальных значений силы тока использовали плоские образцы из стали 09Г2 размерами 300×150×16 мм. Для оценки влияния технологических возмущений изготовили специальные образцы с фрезерованным по середине длины образца поперечным прямоугольным пазом шириной 50 мм и глубиной 5 мм. Сварку выполняли со скоростью $v_{св} = 6...47$ м/ч под флюсом ОСЦ-45 проволокой Св-08А (табл. 1).

На рис. 2 представлены результаты определения минимальной силы тока, обеспечивающей стабильный процесс сварки, в зависимости от диаметра электродной проволоки. Там же для сравнения приведены данные для сварочных головок, работающих на переменном и постоянном токе, полученные ранее Б. Е. Патонем и И. И. Фруминым [1]. Как видно из рис. 2, комбинированная ВАХ источника позволяет снизить допустимую силу тока для стабильной работы сварочных головок при отсутствии технологических возмущений.

Влияние экспериментальных режимов сварки на размеры шва (рис. 3) выборочно представлено в табл. 2 и описывается следующими регрессионными зависимостями: глубина проплавления $h = 0,0088I_{св} - 0,0066v_{св} + 0,027d_{э} - 0,57$, ширина наплавки $e = 0,0059I_{св} - 0,19v_{св} + 0,966d_{э} + 13,66$,

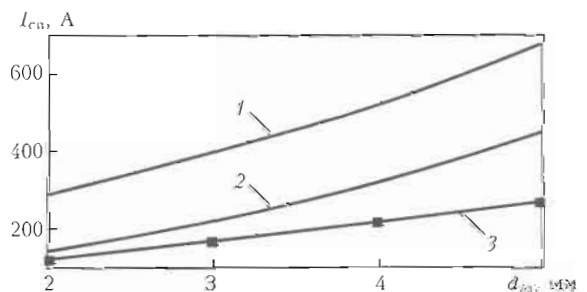


Рис. 2. Зависимость минимальной силы тока от диаметра электродной проволоки: 1, 2 — соответственно переменный и постоянный ток [1]; 3 — комбинированная ВАХ (экспериментальные данные)

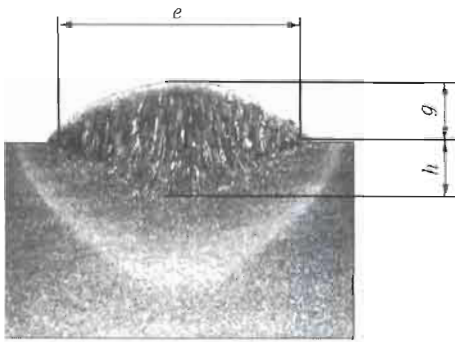


Рис. 3. Макрошлиф наплавленного валика (обозначения см. в тексте)

высота валика $g = -0,0035I_{св} - 0,054v_{св} + 0,55d_3 + 2,88$.

Для оценки влияния технологических возмущений на стабильность сварочного процесса на малых плотностях тока валики наплавляли поперек паза, чтобы смоделировать препятствие, резко изменяющее длину дуги на 5 мм. Режим сварки: $I_{св} = 280...290$ А, $U_d = 30...32$ В, $v_{св} = 18$ м/ч.

После изучения внешнего вида и шлифов продольного сечения шва установлено, что наплавленные валики можно разделить на шесть участков, характеризующих воздействие технологического возмущения (поперечного паза) на размеры шва. Границы участков отмечены маркерами I-V (рис. 4). Маркер I — начало прямоугольного паза (удлинение дуги); II — окончание отработки системой возмущения и стабилизация процесса после удлинения дуги; III — начало зоны, подверженной влиянию укорочения дуги; IV — конец прямоугольного паза (укорочение дуги); V — граница участка, на которую оказало влияние укорочение дуги. Участок A (рис. 4) длиной около 15 мм соответствует зоне возмущения при удлинении дуги. На этом участке высота наплавленного слоя снижается по сравнению с исходной, равной 4 мм, до 3 мм, глубина проплавления — с 3 до 1 мм. Однако сплавление наплавленного металла с основным гарантировано даже в момент резкого изменения профиля пластины. Ширина валика в конце участка A увели-

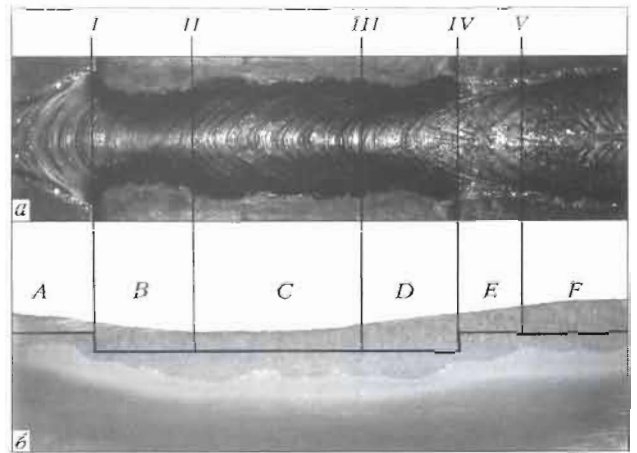


Рис. 4. Формирование наплавленного валика: а — вид сверху; б — продольный макрошлиф

чивается с 24 до 28 мм. Изменения размеров валика на этом участке объясняются стеканием жидкого металла в паз и поддержанием стабильного горения дуги за счет увеличенного напряжения на дуге при работе выпрямителя на падающей ветви комбинированной ВАХ (см. рис. 1, в и рис. 5, а).

На участке B, протяженностью также около 15 мм, между маркерами I и II восстанавливаются высота наплавленного слоя до 4 мм, глубина проплавления до 3 мм; ширина валика в начале участка резко уменьшается до 22 мм, а затем плавно увеличивается до первоначального размера 24 мм. Участок B — зона стабилизации процесса после удлинения дуги. Выпрямитель продолжает работать на падающей ветви комбинированной ВАХ, но напряжение на дуге снижается (см. рис. 1, в).

Участок C длиной 22 мм — зона наплавки по поверхности паза: процесс протекает стабильно, размеры наплавленного валика совпадают с первоначальными до воздействия возмущения.

Продольное сечение наплавленного слоя повторяет профиль паза с допустимыми отклонениями размеров шва. При этом обеспечивается стабильное сплавление наплавленного металла с основным.

Таблица 2. Влияние параметров режима на размеры наплавленного валика

$I_{св}, А (d_3 = 5 \text{ мм}, v_{св} = 36 \text{ м/ч})$			$v_{св}, \text{ м/ч} (d_3 = 5 \text{ мм}, I_{св} = 400 \text{ А})$			$d_3, \text{ мм} (I_{св} = 300 \text{ А}, v_{св} = 25 \text{ м/ч})$		
h	e	g	h	e	g	h	e	g
	300			15			2	
1,9	2,1	11,4	3,2	3,5	19,2	2	2	13
	400			24			3	
2,4	2,5	12,1	3	2,6	14,6	2	2	13,5
	500			36			4	
3,6	2,6	16,7	2,6	1,7	11,4	2,5	2,5	14
	600			47			5	
4,2	2,8	18,5	2,4	1,2	10	2,8	3,5	15,3

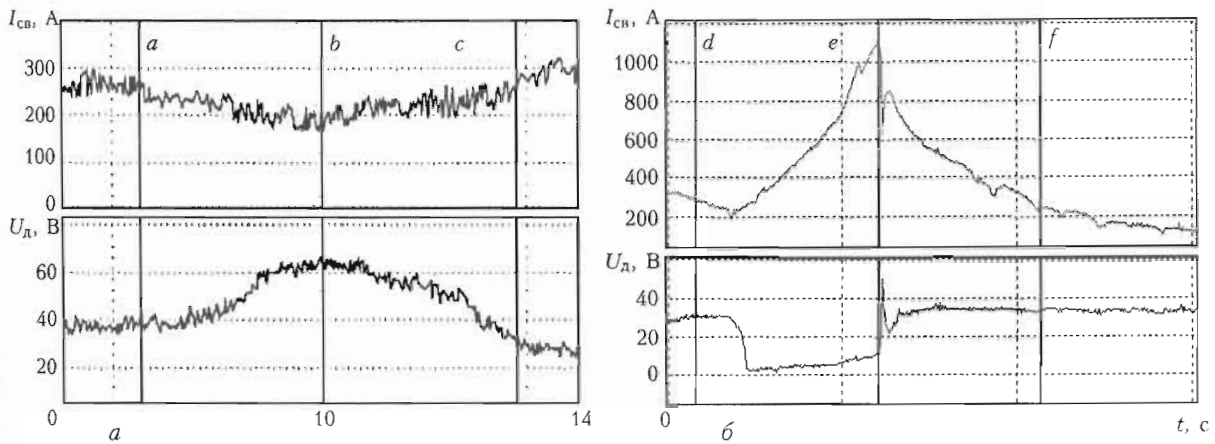


Рис. 5. Осциллограммы тока и напряжения при питании дуги от источника тока с комбинированной ВАХ: а, б — соответственно при увеличении и уменьшении длины дуги

Характер изменения размеров наплавленного валика и глубины проплавления металла при резком изменении длины дуги можно объяснить с помощью известного соотношения между изменением скорости плавления электродной проволоки v_3 и изменениями сварочного тока и напряжения [4]. Для длинной дуги, горящей без коротких замыканий (см. рис. 4, участки А–С), это соотношение запишется в виде

$$v_3 = k_i i - k_u u,$$

где k_i, k_u — коэффициенты саморегулирования по току и напряжению дуги.

Это значит, что увеличение силы тока в дуге приводит к возрастанию скорости плавления электродной проволоки, а повышение напряжения, наоборот, к ее уменьшению.

Удлинение дуги начинается на участке А вследствие стекания жидкого металла в паз. Этот момент времени соответствует отметке а (см. рис. 1, в и 5, а) и характеризуется повышением на 8...10 В напряжения и снижением силы тока на 10...20 А по сравнению с установленными параметрами режима наплавки.

Перемещение сварочного автомата и соответственно сварочной ванны приводит к дальнейшему увеличению длины дуги. Напряжение возрастает до 60 В, ток снижается до 220 А (отметка б на рис. 5, а). Эта отметка находится в районе маркера I и соответствует наибольшей длине дугового промежутка. Описанные изменения параметров режима происходят в течение примерно трех секунд и могут быть представлены как перемещения точки пересечения СХД и ВАХ выпрямителя из положения а в положение б (см. рис. 1, в). Плавным уменьшением сварочного тока и увеличением сварочного напряжения и объясняется на участке А снижение глубины проплавления. При этом высота наплавленного слоя на данном участке уменьшается в результате снижения скорости плавления электродной проволо-

ки, уменьшения количества расплавленного металла и стекания его в паз.

Дальнейший процесс сварки (участок В), как видно из осциллограммы на рис. 5, а, проходит в режиме стабилизации сварочных параметров до уровня отметки с, т. е. сила тока возрастает до 290 А, напряжение снижается до 30 В. Стабилизацию процесса поясняет приведенное выше выражение. В положении СХД, соответствующем точке б, сила сварочного тока и скорость плавления электродной проволоки минимальны и, следовательно, идет процесс, обратный действию возмущения — укорочение длины дуги и восстановление сварочных параметров. Продолжительность процесса стабилизации около 3 с и соответствует плавному перемещению точки пересечения СХД и ВАХ выпрямителя из положения б в положение с (см. рис. 1, в). В полном соответствии с изменением сварочного тока и скорости плавления электродной проволоки изменяются размеры наплавленного валика.

Сопоставив скорость перемещения дуги со скоростью изменения параметров режима на участках А и В, можно считать, что воздействие возмущения и процесс стабилизации режима после резкого удлинения дуги продолжительны во времени и могут рассматриваться в каждый момент времени как статичные. Комбинированная ВАХ выпрямителя в таких условиях обеспечивает стабильное горение дуги под флюсом.

Рассмотрим изменения тока и напряжения в дуге при ее резком укорочении. На участке D, как видно из рис. 1, б, воздействие возмущения, вызывающее укорочение дуги, и стабилизация режима после возмущения — процессы динамические. Продолжительность их не превышает соответственно 0,6 и 0,7 мс.

Увеличение глубины проплавления и высоты наплавленного слоя на участке D объясняется возрастанием объема расплавленного металла вследствие препятствия стенки паза растеканию метал-

сверху;
ров ва-
м жид-
льного
яжения
ающей
1, в и
около
иваются
а проп-
участка
но уве-
24 мм.
а после
работать
но нап-
сплавки
табиль-
дают с
дения.
оя пов-
лонени-
тса ста-
па с ос-

4)
g
13
13,5
14
15,3



ла в направлении сварки. Вместе с тем, возрастает количество расплавленного электродного металла из-за резкого увеличения силы тока при укорочении дуги.

Причиной уменьшения глубины проплавления непосредственно перед маркером IV, по-нашему мнению, является изменение положения катодного пятна дуги, находящегося на изделии.

В определенный момент времени расстояние от торца электродной проволоки до дна паза становится больше, чем до стенки паза. Продолжение процесса сварки приводит к короткому замыканию. Сопротивление дугового промежутка резко уменьшается, напряжение падает, сила тока увеличивается (отметка *e* на рис. 5, б). Возмущение, вызывающее укорочение дуги, заканчивается расплавлением дополнительного участка электродной проволоки. Это соответствует скачкообразному (около 0,4 мс) перемещению точки пересечения СХД и ВАХ выпрямителя из положения *d* в положение *e* (см. рис. 1, в). В дальнейшем происходит стабилизация длины дугового промежутка и восстановление параметров режима сварки. Процесс соответствует резкому (около 0,8 мс) перемещению точки пересечения СХД и ВАХ источника питания из положения *e* в положение *f* (см. рис. 1, в).

В целом укорочение дуги и стабилизация сварочных параметров после воздействия возмущения при сварке на малых плотностях тока с

использованием комбинированной ВАХ выпрямителя проходят без обрыва дуги и прерываний сварочного процесса.

Выводы

1. Установлено, что комбинированная ВАХ источника питания обеспечивает стабильный процесс сварки под флюсом головками с постоянной скоростью подачи электродной проволоки на токах плотностью менее 40 А/мм².

2. Получены регрессионные зависимости, связывающие параметры режима сварки с размерами шва, для токов плотностью 15...40 А/мм² при использовании источника питания с комбинированной ВАХ.

3. Комбинированная ВАХ источника питания позволяет стабилизировать параметры режима сварки и размеры шва при воздействии технологических возмущений без обрыва дуги и прерывания сварочного процесса.

1. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В. А. Ленивкин, Н. К. Дюргеров, Х. Н. Сагиров. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
2. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
3. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. — Киев: Виц. шк., 1986. — 296 с.
4. Дятлов В. И. Вольт-амперная характеристика сжатой электрической дуги // Автомат. сварка. — 1961. — № 1. — С. 17-20.

The paper deals with the influence of energy parameters of «arc-powersource» at a combined volt-ampere characteristic of the power source and constant electrode wire feed rate on the stability of the welding process under the impact of disturbances along the arc length.

Поступила в редакцию 30.07.2007

ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ЗАМКОВ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Разработана технология наплавки замков бурильных труб с номинальным диаметром 104...177 мм. Технология предусматривает восстановление замков в два этапа. Вначале производится наплавка самозащитной порошковой проволокой ПП-АН198 для восстановления номинального диаметра труб.

Металл, наплавленный этой проволокой, имеет твердость HB 220...310 и механические свойства на уровне значений основного металла замка — стали 40ХМФА по ГОСТ 4543-71. Затем по номинальному диаметру самозащитной порошковой проволокой ПП-АН199 наплавляют три износостойких пояска, имеющие твердость HRC 42...52.

Для наплавки используется установка У653 с дополнительными роликоопорами, укомплектованная источником питания ВДУ-506. Возможно использование других установок с аналогичными параметрами и технологическими возможностями.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 2

Тел./факс: (38044) 287 63 57

E-mail: ryabtsev@paton.kiev.ua