УДК 621.791.92 DOI: http://dx.doi.org/10.15407/as2019.03.03

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ПРОПЛАВЛЕНИЕ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

И.А. Рябцев[1], А.А. Бабинец[1], И.П. Лентюгов[1], Э.В. Турык[2]
[1]ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
[2]Институт сварки. г. Гливице, Польша. E-mail: Eugeniusz.Turyk@is.gliwice.pl

Исследовано влияние скорости подачи электродной проволоки на проплавление основного металла и геометрические размеры наплавленных валиков при дуговой наплавке под флюсом. В экспериментах использовали четыре порошковые проволоки диаметром 1,2; 1,6; 1,8 и 2,0 мм. Регулирование скорости подачи осуществляли в диапазоне от минимального значения $V_{под.min}$, при котором возможен для данных условий стабильный процесс наплавки, и до максимального значения $V_{под.max}$ = 450 м/ч, которое определялось характеристиками используемой наплавочной установки. Установлено, что при наплавке с использованием высоких скоростей подачи проволоки, для каждого диаметра проволоки существует такое оптимальное соотношение величины скорости подачи и других параметров наплавки, при котором повышение этой скорости приводит к снижению глубины проплавления и доли основного металла в наплавленном при возрастающем токе наплавки. Результаты, полученные в данной работе, были успешно использованы при износостойкой дуговой наплавке стальных листов толщиной 3 мм, а также могут быть использованы при выборе режимов дуговой наплавки других деталей, которые в наибольшей степени удовлетворяют условиям их эксплуатации и требованиям к наплавленному металлу и проплавлению основного металла. Библиогр. 10, табл. 4, рис. 5.

Ключевые слова: дуговая наплавка, режимы наплавки, скорость подачи электродной проволоки, проплавление основного металла, формирование наплавленного металла, порошковая проволока, наплавленный металл

Одной из основных характеристик различных способов наплавки является величина проплавления основного металла и, как следствие, доля основного металла в наплавленном металле (ДОМ). Как правило, при дуговой наплавке электродными проволоками доля основного металла в наплавленном металле колеблется в пределах 30…50 %, в результате, чтобы выйти на заданный химический состав наплавленного металла, необходимо наплавлять 4-5 слоев. Таким образом, уменьшение величины проплавления и ДОМ должно улучшать технико-экономические показатели процесса дуговой наплавки, и разработка мер по их снижению остается актуальной задачей [1].

Широко известно, что качество формирования наплавленного металла, его состав и структура, а также глубина проплавления основного металла и ДОМ, в основном, зависят от режимов наплавки [1–5]. К главным параметрам режима наплавки относят значение тока (скорость подачи электродной проволоки); полярность и род тока; напряжение дуги; скорость наплавки; диаметр (сечение) электродного материала; шаг наплавки; а при наплавке тел вращения — смещение с зенита или надира. Из них при разработке технологии дуговой наплавки конкретных деталей обычно задают величину тока и напряжения, скорость наплавки и диаметр (сечение) электродного материала [1, 5–8]. Такие параметры, как род и полярность тока, величина вылета электродной проволоки и т. п. оказывают меньшее влияние на глубину проплавления и ДОМ, форму и размеры наплавленных валиков [6]. При этом, выбранный режим наплавки в первую очередь должен обеспечивать хорошее формирование наплавленного металла и минимальное, но достаточное проплавление основного металла или ранее наплавленного слоя [1].

Из упомянутых показателей режимов дуговой наплавки электродной проволокой на глубину проплавления основного металла и ДОМ наибольшее влияние оказывает ток наплавки. Увеличение силы тока приводит к резкому увеличению глубины проплавления и образованию высоких и узких валиков (рис. 1) [3]. При этом следует помнить о необходимом условии наплавки, а именно — поддержании устойчивого дугового процесса. Для этого скорость подачи электродной проволоки должна быть равна скорости ее плавления, чтобы в процессе наплавки не было коротких замыканий или обрывов сварочной дуги [5, 7].

Ток наплавки тесно связан со скоростью подачи электродной проволоки, и с увеличением последней пропорционально растет ток наплавки. При неизменной скорости наплавки это ведет к увеличению количества наплавляемого металла, попадающего на наплавляемую поверхность в единицу времени, что должно привести к изменению геометрических характеристик наплав-

© И.А. Рябцев, А.А. Бабинец, И.П. Лентюгов, Э.В. Турык, 2019

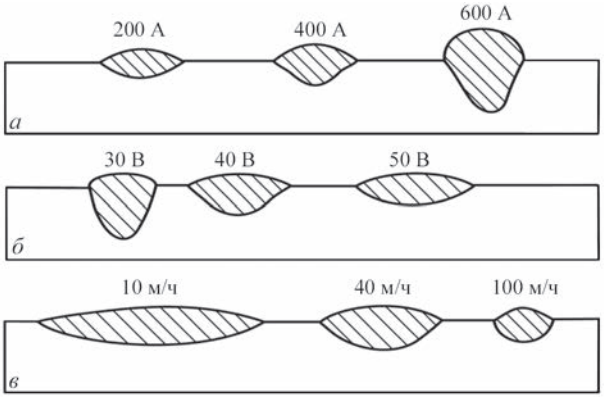


Рис. 1. Влияние параметров режима дуговой наплавки на форму валика [5]: *а* — ток; *б* — напряжение; *в* — скорость

ляемых валиков. В промышленной практике при дуговой наплавке различных деталей скорость подачи электродной проволоки обычно не превышает 200 м/ч, а подающие механизмы большинства существующих наплавочных установок и автоматов рассчитаны на этот показатель, не превышающий 450 м/ч [1].

Целью данной работы является изучение влияния скорости подачи электродной проволоки (тока наплавки) на глубину проплавления основного металла, ДОМ и формирование наплавленных валиков при дуговой наплавке.

Для исследования влияния скорости подачи проволоки на глубину проплавления основного металла при дуговой наплавке, была проведена серия экспериментов по наплавке одиночных валиков порошковыми проволоками диаметром 1,2; 1,6; 1,8 и 2,0 мм под флюсом. Регулирование скорости подачи осуществляли в диапазоне от минимального значения $V_{под.min}$, при котором для данных условий был возможен стабильный дуговой процесс, и до максимального значения $V_{под.max}$ = 450 м/ч, которое, как указывалось выше, определялось характеристиками используемой наплавочной установки У-653, укомплектованной источником питания ВДУ-506.

Наплавка всеми четырьмя порошковыми проволоками осуществлялась при постоянной скорости наплавки $V_н$ = 27 м/ч. Напряжение на дуге

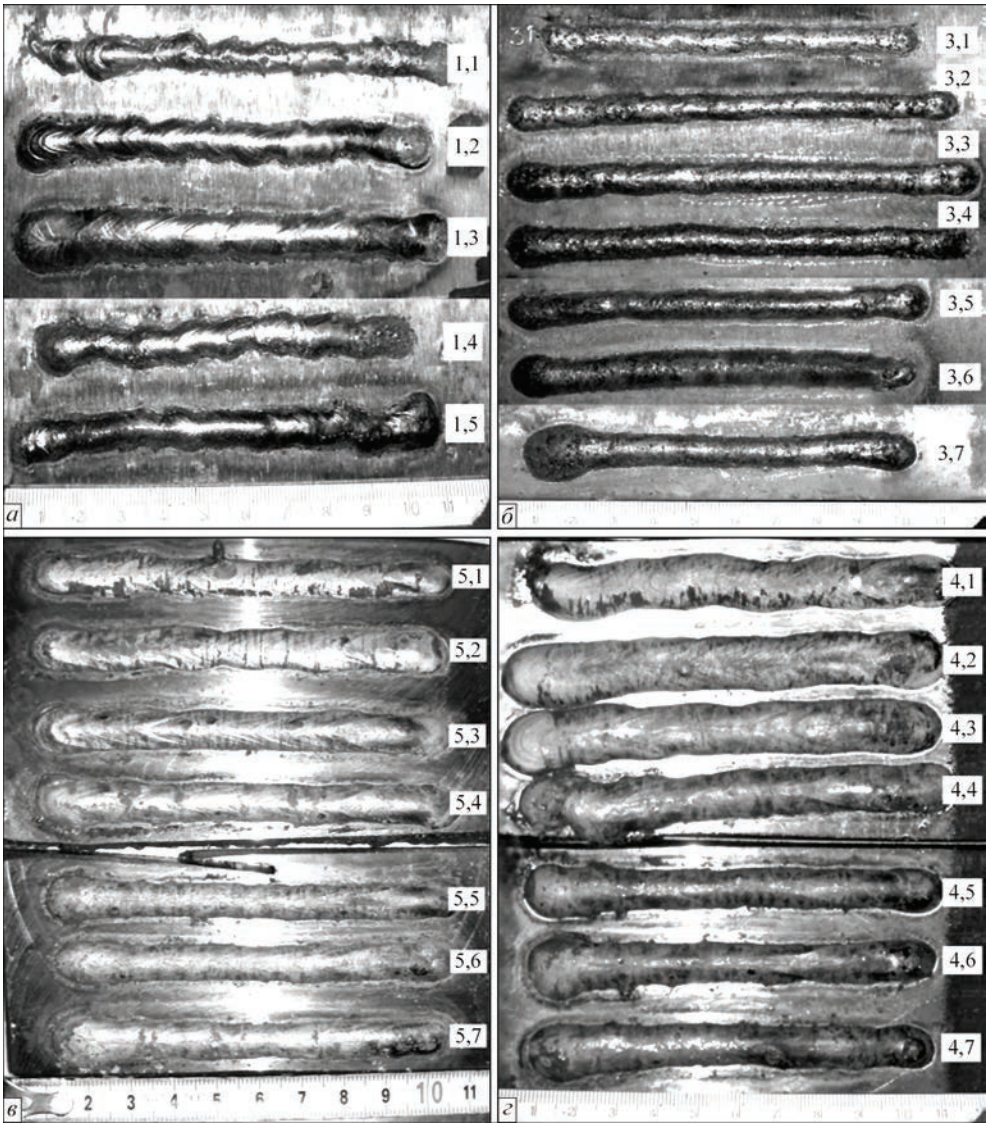


Рис. 2. Внешний вид образцов после наплавки проволоками диаметром: *а* — 1,2 мм; *б* — 1,6; *в* — 1,8; *г* — 2,0

также оставалось постоянным при наплавке проволокой одного диаметра: для проволоки диаметром 1,2 мм — 22 В; для проволоки диаметром 1,6 мм — 24 В и для проволок диаметром 1,8 и 2,0 мм — 26 В. Внешний вид образцов после наплавки приведен на рис. 2.

В процессе наплавки фиксировали значения скорости подачи проволоки и величину тока, которая ей соответствовала. Из наплавленных заготовок изготовляли поперечные макрошлифы, на которых проводили измерения ширины и высоты наплавленных валиков, глубины проплавления, а также рассчитывали ДОМ. Макрошлифы поперечных сечений наплавленных валиков и их размеры приведены в табл. 1–4.

Таблица 1. Влияние скорости подачи проволоки на формирование наплавленных валиков и глубину проплавления основного металла при наплавке проволокой диаметром 1,2 мм

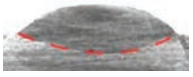
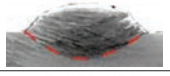
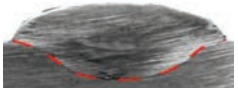
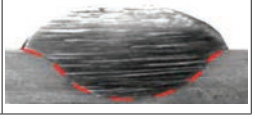
$V_{под}$, м/ч	$I_н$, А	Размеры наплавленных валиков, мм			γ_0, %	Макрошлифы поперечного сечения валиков
		ширина	высота	глубина		
210	110	5,9	1,6	0,87	33	
260	130	7,6	1,7	0,91	34	
[illegible]	**[illegible]**	**7,8**	**1,9**	**0,68**	**[illegible]**	
360	160	7,9	1,9	0,92	31	
405	170	8,1	2,1	1,13	33	
450	190	8,5	2,2	1,17	31	

Таблица 2. Влияние скорости подачи проволоки на формирование наплавленных валиков и глубину проплавления основного металла при наплавке проволокой диаметром 1,6 мм

$V_{под}$, м/ч	$I_н$, А	Размеры наплавленных валиков, мм			γ_0, %	Макрошлифы поперечного сечения валиков
		ширина	высота	глубина		
175	170	6,7	1,6	1,24	41	
210	190	7,1	2,1	1,45	38	
260	220	8,2	2,3	1,85	40	
310	260	7,8	2,5	2,49	46	
[illegible]	**[illegible]**	**7,4**	**3,6**	**2,21**	**[illegible]**	
405	320	9,9	3,5	3,04	40	
450	350	8,5	3,9	4,6	47	

На основе полученных данных были построены зависимости влияния скорости подачи электродной проволоки на глубину проплавления основного металла (рис. 3) и ДОМ (рис. 4). Установлено, что с повышением скорости подачи электродной проволоки возрастает высота наплавленного валика, глубина проплавления, а также незначительно изменяется ширина валика (рис. 3, табл. 1–4). При этом с увеличением диаметра используемой порошковой проволоки эти зависимости усиливаются. Так, например, для проволоки диаметром 1,2 мм увеличение скорости подачи проволоки с 210 до 405 м/ч приводит к увеличению высоты валика в 1,3 раза, а для проволоки диаметром 2,0 мм этот же параметр в этом же диапазоне скоростей подачи возрастает в 2,4 раза, что связано с пропорциональным увеличением количества наплавляемого металла на единицу длины валика.

При постепенном повышении скорости подачи проволоки, а, следовательно, величины сварочного тока — от минимально возможного значения, при котором наблюдается стабильный процесс, до максимального значения, которое обеспечивается механизмом подачи установки, практически для всех диаметров исследуемых проволок отмечается некоторое снижение ДОМ (рис. 4). Это объясняется тем, что с увеличением силы тока и скорости подачи проволоки при неизменной скорости наплавки, скорость роста площади наплавленного металла значительно превышает скорость роста площади проплавления, и наплавленные валики получают «грибообразную» форму. Особенно это характерно при наплавке порошковыми проволоками диаметром 1,6 мм и более.

Таблица 3. Влияние скорости подачи проволоки на формирование наплавленных валиков и глубину проплавления основного металла при наплавке проволокой диаметром 1,8 мм

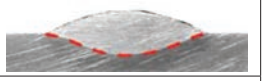
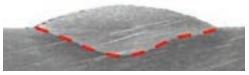
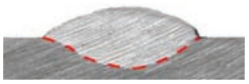
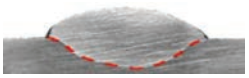
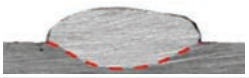
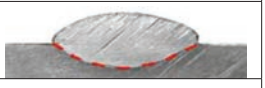
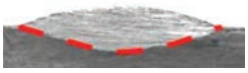
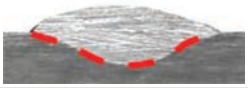
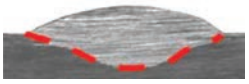
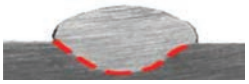
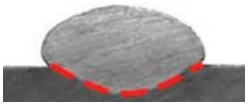
$V_{под}$, м/ч	$I_н$, А	Размеры наплавленных валиков, мм			γ_0, %	Макрошлифы поперечного сечения валиков
		ширина	высота	глубина		
175	200	9,9	1,7	1,74	48	
210	240	10,9	1,9	1,86	45	
260	280	9,9	3,2	3,04	45	
310	310	9,7	3,3	3,35	46	
360	330	9,3	3,6	2,99	38	
405	**[illegible]**	**9,3**	**3,7**	**2,70**	**38**	
450	390	8,7	3,8	3,74	39	

Таблица 4. Влияние скорости подачи проволоки на формирование наплавленных валиков и глубину проплавления основного металла при наплавке проволокой диаметром 2,0 мм

$V_{под}$, м/ч	$I_н$, А	Размеры наплавленных валиков, мм			γ_0, %	Макрошлифы поперечного сечения валиков
		ширина	высота	глубина		
175	250	11,7	1,7	1,94	51	
210	290	11,9	1,9	2,34	50	
260	320	12,0	2,3	2,57	48	
310	350	10,2	2,6	3,32	48	
360	380	8,8	3,7	3,4	42	
405	410	9,2	4,4	3,6	38	
450	**450**	**9,7**	**4,7**	**2,57**	**[illegible]**	

Вместе с тем также было установлено, что при наплавке проволокой каждого диаметра существует определенный диапазон, в котором пропорциональность влияния скорости подачи проволоки на глубину проплавления нарушается. В этом диапазоне с увеличением скорости подачи (при возрастающем токе) происходит снижение глубины проплавления (рис. 3, заштрихованные области).

Наиболее существенно такая зависимость проявляется при наплавке проволокой диаметром 1,2 мм. В случае наплавки при скорости подачи электродной проволоки $V_{под}$ = 310 м/ч наблюдается не только снижение глубины проплавления на 25 % в сравнении с наплавкой при скорости подачи $V_{под}$ = 260 м/ч, но и минимальное значение проплавления (0,68 мм) для всего исследуемого диапазона скоростей подачи проволоки. Также для наплавки проволокой диаметром 1,2 мм при скорости ее подачи $V_{под}$ = 310 м/ч характерно снижение ДОМ с 34 до 29 %, что также является минимальным значением для всего исследуемого диапазона.

Было также отмечено, что чем больше диаметр проволоки, тем при большей скорости подачи наблюдается снижение глубины проплавления. Так, для диаметра 1,2 мм этот эффект проявляется при скорости подачи 310 м/ч; для диаметра 1,6 мм — при 360 м/ч; для диаметра 1,8 мм — при 405 м/ч; и для диаметра 2,0 мм — при скорости подачи 450 м/ч.

Однако при этом значения плотности тока J, при котором наблюдается это явление, для всех исследованных диаметров электродной проволоки находятся в довольно узком диапазоне: для диаметра 1,2 мм — плотность тока J = 136 А/мм^2, для диаметра 1,6 мм — J = 144 А/мм^2; для диаметра 1,8 мм — J = 142 А/мм^2 и для диаметра 2,0 мм — J = 143 А/мм^2. Среднее значение плотности тока для всех диаметров составляет $J \approx$ $\approx 140 \pm 4$ А/мм^2. Очевидно, в этом случае устанавливается благоприятный тепловой баланс процесса наплавки, при котором рост площади наплавленного металла выше, чем увеличение площади (глубины) проплавления. Результаты, полученные в данной работе, защищены патентом Украины [9].

Наплавка на повышенных скоростях подачи порошковой электродной проволоки была успеш-

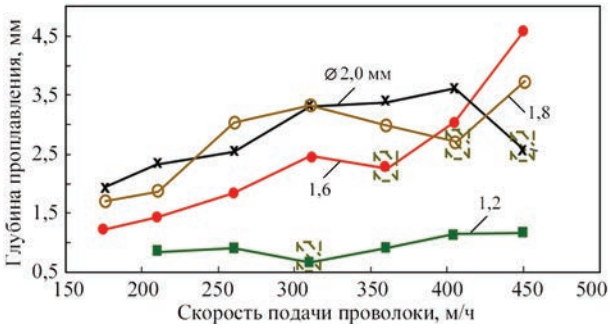


Рис. 3. Влияние скорости подачи проволоки на глубину проплавления: штриховкой выделана зона уменьшения глубины проплавления при возрастающем токе

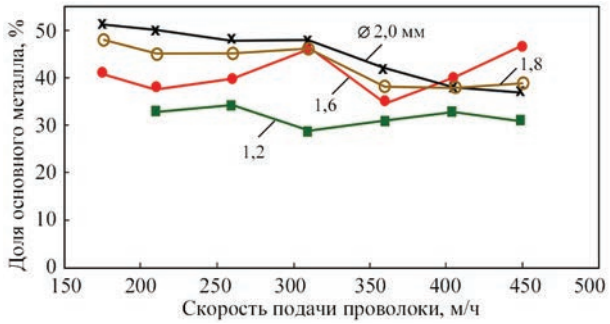


Рис. 4. Влияние скорости подачи электродной проволоки различных диаметров на ДОМ

Рис. 5. Внешний вид стального листа толщиной 3 мм, подготовленного под наплавку (*а*), и фрагмент наплавленного листа (*б*)

но применена при износостойкой дуговой наплавке стальных листов толщиной 3 мм. Известно [10], что одной из основных проблем при наплавке листов такой толщины является возможность появления прожогов в процессе наплавки.

Наплавку листов размерами 3×200×300 мм выполняли порошковой проволокой диаметром 1,2 мм под флюсом, на режиме: $V_{под}$ = 310 м/ч (I = = 150 А), U = 22 В, $V_н$ = 30 м/ч, перекрытие соседних валиков ≈ 50 %. Для снижения деформации листов в процессе наплавки применялось приспособление с охлаждаемым медным столом, на котором листы закреплялись при помощи прижимных планок. Внешний вид листа, подготовленного под наплавку и закрепленного в приспособлении, приведен на рис. 5, *а*; а внешний вид фрагмента наплавленного листа — на рис. 5, *б*. Контроль подтвердил качественное формирование наплавленного металла и отсутствие дефектов наплавки в виде прожогов, пор, трещин и других дефектов.

Выводы

1. При дуговой наплавке с использованием высоких скоростей подачи проволоки, для каждого диаметра проволоки существует такое оптимальное соотношение величины скорости подачи и других параметров наплавки, при котором ее повышение приводит к снижению глубины проплавления и ДОМ при возрастающем токе наплавки.

2. Значения плотности тока J, при котором наблюдается снижение глубины проплавления, для всех исследованных диаметров электродной проволоки находятся в узком диапазоне: для диаметра 1,2 мм — J = 136 А/мм^2; для диаметра 1,6 мм — J = = 144 А/мм^2; для диаметра 1,8 мм — J = 142 А/мм^2 и для диаметра 2,0 мм — J = 143 А/мм^2. Среднее значение плотности тока для всех диаметров составляет $J \approx 140 \pm 4$ А/мм^2. В этом случае устанавливается благоприятный тепловой баланс процесса наплавки, при котором рост площади наплавленного металла выше, чем увеличение площади (глубины) проплавления.

3. Результаты исследований были успешно использованы при разработке технологии износостойкой дуговой наплавки под флюсом стальных листов толщиной 3 мм. Контроль подтвердил качественное формирование наплавленного металла и отсутствие дефектов наплавки в виде прожогов, пор, трещин и других дефектов.

Список литературы

1. Рябцев И.А., Сенченков И.К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Киев, Экотехнология.
2. Походня И.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н. (1972) *Сварка порошковой проволокой*. Киев, Наукова думка.
3. Юзвенко Ю.А., Кирилюк Г.А. (1973) *Наплавка порошковой проволокой*. Москва, Машиностроение.
4. Бабинец А.А., Рябцев И.А., Панфилов А.И. и др. (2016) Влияние способов дуговой наплавки порошковой проволокой на проплавление основного металла и формирование наплавленного металла. *Автоматическая сварка*, **11**, 20–25. DOI: https: //doi.org/10.15407/as2016.08.01
5. Фрумин И.И. (1961) *Автоматическая электродуговая наплавка*. Харьков, Металлургиздат.

6. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. (1977) *Технологии и оборудование сварки плавлением*. Москва, Машиностроение.
7. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П. (2003) *Восстановление деталей машин: Справочник*. Иванов В.П. (ред.). Москва, Машиностроение.
8. Иванов В.П., Лаврова Е.В. (2016) Управление формированием зоны проплавления при электродуговой наплавке. *Автоматическая сварка*, **8**, 6–11. DOI: https: //doi.org/10.15407/as2016.11.04
9. Рябцев І.О., Бабінець А.А., Лентюгов І.П. (2018) Спосіб електродугового наплавлення порошковим дротом під флюсом. Україна Пат. № 127598.
10. Бабинец А.А., Рябцев И.А. (2017) Порошковая проволока для износостойкой наплавки тонколистовых конструкций. *Автоматическая сварка*, **1**, 64–67. DOI: https: //doi.org/10.15407/as2017.01.10

References

1. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
2. Pokhodnya, I.K., Suptel, A.M., Shlepakov, V.N. (1972) *Flux-cored wire welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Yuzvenko, Yu.A., Kirilyuk, G.A. (1973) *Flux-cored wire surfacing*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A., Panfilov, A.I. et al. (2016) Influence of methods of arc surfacing with flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal. *The Paton Welding J.*, **11**, 17-22. https://doi.org/10.15407/as2016.08.01
5. Frumin, I.I. (1961) *Automatic electric arc surfacing*. Kharkov, Metallurgizdat [in Russian].
6. Akulov, A.I., Belchuk, G.A., Demyantsevich, V.P. (1977) *Technology and equipment of fusion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Panteleenko, F.I., Lyalyakin, V.P., Ivanov, V.P. (2003) *Restoration of machine parts: Refer. Book*. Ed. by V.P. Ivanov. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Ivanov, V.P., Lavrova, E.V. (2016) Controlling penetration zone formation in arc surfacing. *The Paton Welding J.*, **8**, 2-6. https://doi.org/10.15407/as2016.11.04
9. Ryabtsev, I.O., Babinets, A.A., Lentyugov, I.P. (2018) Method of submerged-arc surfacing with flux-cored wire. Pat. 127598, Ukraine [in Ukrainian].
10. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A. (2017) Flux-cored wire for wear-resistant surfacing of thin-sheet structures. *The Paton Welding J.*, **1**, 54-57. https://doi.org/10.15407/as2017.01.10

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОДНОГО ДРОТУ НА ПРОПЛАВЛЕННЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ПРИ ДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ

І.О. Рябцев[1], А.А. Бабінець[1], І.П. Лентюгов[1], Є.В. Турик[2]

[1]ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

[2]Інститут зварювання. м. Глівіце, Польща. E-mail: Eugeniusz.Turyk@is.gliwice.pl

Досліджено вплив швидкості подачі електродного дроту на проплавлення основного металу і геометричні розміри наплавлених валиків при дуговому наплавленні під флюсом. В експериментах використовували чотири порошкові дроти діаметром 1,2; 1,6; 1,8 і 2,0 мм. Регулювання швидкості подачі здійснювали в діапазоні від мінімального значення $V_{под.min}$, при якому можливий для даних умов стабільний процес наплавлення, і до максимального значення $V_{под.max}$ = 450 м/г, яке визначалося характеристиками використовуваної наплавочної установки. Встановлено, що при наплавленні з використанням високих швидкостей подачі дроту, для кожного діаметра дроту існує таке оптимальне співвідношення величини швидкості подачі і інших параметрів наплавлення, при якому підвищення цієї швидкості призводить до зниження глибини проплавлення і частки основного металу в наплавленому при зростаючому струмі наплавлення. Результати, отримані в даній роботі, були успішно використані при зносостійкому дуговому наплавленні сталевих листів товщиною 3 мм, а також можуть бути використані при виборі режимів дугової наплавки інших деталей, які найбільшою мірою задовольняють умовам їх експлуатації та вимогам до наплавленого металу і проплавленню основного металу. Бібліогр. 10, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: дугова наплавка, режими наплавлення, швидкість подачі електродного дроту, проплавлення основного металу, формування наплавленого металу, порошковий дріт, наплавлений метал

INLUENCE OF ELECTRODE WIRE FEED RATE ON BASE METAL PENETRATION IN ARC SURFACING

I.A. Ryabtsev[1], A.A. Babinets[1], I.P. Lentyugov[1], E.V. Turyk[2]

[1]E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150 Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

[2]Institute of Welding, Gliwice, Poland: E-mail: Eugeniusz.Turyk@is.gliwice.pl

Influence of electrode wire feed rate on base metal penetration and geometrical dimensions of deposited beads at submerged-arc surfacing was studied. Four flux-cored wires of 1.2; 1.6; 1.8 and 2.0 mm diameter were used in the experiments. Feed rate regulation was performed in the range from minimum value Vf.min, at which a stable surfacing process can be in place for these conditions, and up to maximum value $V_{f.max}$ = 450 m/h, which was determined by the characteristics of the used surfacing unit. It is found that at surfacing with high wire feed rates, there exists such an optimum ratio of feed rate and other surfacing parameters for each wire diameter, at which increase of this rate leads to reduction of penetration depth and share of base metal in the deposited metal at rising surfacing current. Results, obtained in this work, were successfully applied at wear-resistant arc surfacing of 3 mm steel sheets, and can also be used in selection of modes of arc surfacing of other parts, which to the greatest extent meet their operating conditions, and requirements to deposited metal and base metal penetration. 10 Ref., 4 Tabl., 5 Fig.

Keywords: arc surfacing, surfacing modes, electrode wire feed rate, base metal penetration, deposited metal formation, flux-cored wire, deposited metal

Поступила в редакцию 28.12.2018