

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ Порошковой проволокой на проплавление основного металла и формирование наплавленного металла

А. А. БАБИНЕЦ¹, И. А. РЯБЦЕВ¹, А. И. ПАНФИЛОВ², В. А. ЖДАНОВ¹, И. И. РЯБЦЕВ¹

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²ООО «Стил Ворк». 50005, г. Кривой Рог, ул. Тбилисская, 13

Исследовано влияние способов автоматической дуговой наплавки на проплавление основного металла, качество формирования и геометрические размеры наплавленных валиков. В экспериментах использовали девять партий порошковых проволок (тип наплавленного металла 25Х5ФМС) диаметром 1,8; 2,4 и 2,8 мм для наплавки под флюсом, в защитных газах и открытой дугой. Наплавка осуществлялась в широком диапазоне режимов: $I_n = 150 \dots 450$ А; $U_n = 20 \dots 34$ В, при одной скорости наплавки 20 м/ч. Установлено, что наибольшее влияние на формирование наплавленных валиков оказывает напряжение дуги. При этом диапазон значений напряжений ΔU_p , при котором обеспечивается хорошее формирование наплавленных валиков и отсутствие пор, не совпадает при наплавке разными способами проволокой одного диаметра. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при выборе способа дуговой наплавки, режимов наплавки, которые в наибольшей степени удовлетворяют условиям эксплуатации и требованиям к наплавленному металлу для конкретных деталей. Эти результаты будут также использоваться в базах данных при разработке компьютерных программ для роботизированных аддитивных технологий дуговой наплавки. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: дуговая наплавка, режимы наплавки, аддитивные технологии наплавки, порошковая проволока, наплавленный металл, проплавление, формирование наплавленного металла

Порошковая проволока является одним из наиболее универсальных электродных материалов для механизированной и автоматизированной дуговой наплавки (сварки) [1–3]. К основным преимуществам порошковой проволоки, по сравнению с другими электродными материалами, можно отнести достаточно простую адаптацию ее химического состава к составу и свойствам наплаваемых деталей, высокую стабильность горения дуги, относительно небольшое разбрызгивание электродного металла и хорошее формирование наплавленных валиков [4–8].

В зависимости от способа наплавки порошковые проволоки можно разделить на три класса: для наплавки под флюсом, в среде защитных газов и открытой дугой (самозащитные) [1, 9].

Широко известно, что режимы наплавки оказывают существенное влияние на проплавление основного металла и качество формирования наплавленного металла [1–10]. Однако в большинстве случаев данные, представленные в отмеченных работах, носят разрозненный характер, так как описывают свойства наплавленного металла, полученного разными способами с применением различных наплавочных материалов и режимов наплавки. Кроме того, при разработке технологии наплавки различных деталей часто необходимо

обеспечить не только качество и заданные свойства наплавленного металла, но и определенные геометрические размеры наплавленных валиков, долю основного металла в наплавленном (ДОМН) и т. п. [9].

Целью данной работы является системное исследование влияния различных способов автоматической дуговой наплавки и параметров режима наплавки на проплавление основного металла, качество формирования и геометрические размеры наплавленных валиков при использовании наплавочных материалов одного химического состава и одинаковых диаметров.

Накопление баз данных по режимам разных способов дуговой наплавки, геометрическим размерам наплавленных валиков, значениям ДОМН и величине проплавления с учетом ранее разработанных экспертных систем по технологиям наплавки [11, 12] и предложенной компьютерной системе-советчике по выбору технологии наплавки типовых деталей [13] может послужить в дальнейшем основой для разработки компьютерных программ для роботизированных аддитивных технологий дуговой наплавки.

Материалы и методики исследований. Для проведения исследований было изготовлено девять партий опытных порошковых проволок для

наплавки под флюсом (АН-26П), в защитных газах (82 % Ar+ 18 % CO₂) и открытой дугой самозащитной порошковой проволокой (система защиты CaO+TiO₂+MgO+CaF₂+Al₂O₃) диаметрами 1,8; 2,4 и 2,8 мм. Металлическую часть шихты порошковых проволок рассчитывали таким образом, чтобы получить наплавленный металл одного типа — 25Х5ФМС. Для наплавки использовали универсальную наплавочную установку У-653, укомплектованную источником питания ВДУ-506. Наплавка порошковыми проволоками различных типов и диаметров осуществлялась на пластины из стали Ст.3 толщиной 15 мм в широком диапазоне режимов: ток наплавки I_n от 150 до 450 А; напряжение U_n от 20 до 34 В. Регистрацию и контроль электрических параметров режима наплавки осуществляли при помощи разработанной компьютерной информационно-измерительной системы [13]. Скорость наплавки во всех экспериментах оставалась постоянной — 20 м/ч, так как в диапазоне 20...40 м/ч при прочих неизменных параметрах скорость наплавки практически не влияет на геометрические размеры наплавленных валиков [9].

В процессе экспериментов проводили экспертную оценку качества формирования наплавленных валиков, наличие пор и др. Для замеров основных геометрических параметров наплавленных валиков на макрошлифах, вырезанных из наплавленных заготовок, использовали инструментальный микроскоп БМИ-1. Среднее значение γ_o (ДОМН) определяли по шести-восьми поперечным сечениям для каждого наплавленного валика по формуле

$$\gamma_o = \frac{F_o}{F_o + F_n} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где F_o, F_n — площади сечения расплавленного основного и наплавленного металлов, соответственно.

Полученные данные заносили в общую для каждого способа таблицу. В качестве примера ниже приведена таблица с характеристиками отдельных валиков, наплавленных под флюсом, в среде защитных газов и открытой дугой порошковыми проволоками диаметром 1,8 мм.

Влияние способов и режимов наплавки на геометрические размеры наплавленных валиков и ДОМН. Основными параметрами режима наплавки являются: значение, полярность и род тока; напряжение дуги; скорость наплавки; диаметр электрода и шаг наплавки [9]. При наплавке тел вращения к основным параметрам также относят смещение с зенита (наплавка наружных поверхностей) или надира (наплавка внутренних поверхностей).

Одними из важнейших характеристик способа наплавки являются величина проплавления и доля основного металла. Широко известно, что с уменьшением проплавления и ДОМН не только сокращается расход дорогостоящих наплавочных материалов, но и улучшается качество и эксплуатационные свойства наплавленных деталей. Согласно (1), величина ДОМН зависит от площади поперечного сечения расплавленного основного и наплавленного металлов. Таким образом, ДОМН будет уменьшаться, если рост площади наплавки происходит быстрее, чем рост площади расплавленного основного металла.

На рис. 1–3 приведены экспериментальные данные о глубине проплавления основного металла, ширине наплавленных валиков и ДОМН для проволок диаметром 1,8 мм (сплошные линии) и диаметром 2,8 мм (штриховые линии) при наплавке тремя разными способами: под флюсом (а), в среде защитных газов (б) и открытой дугой (в).

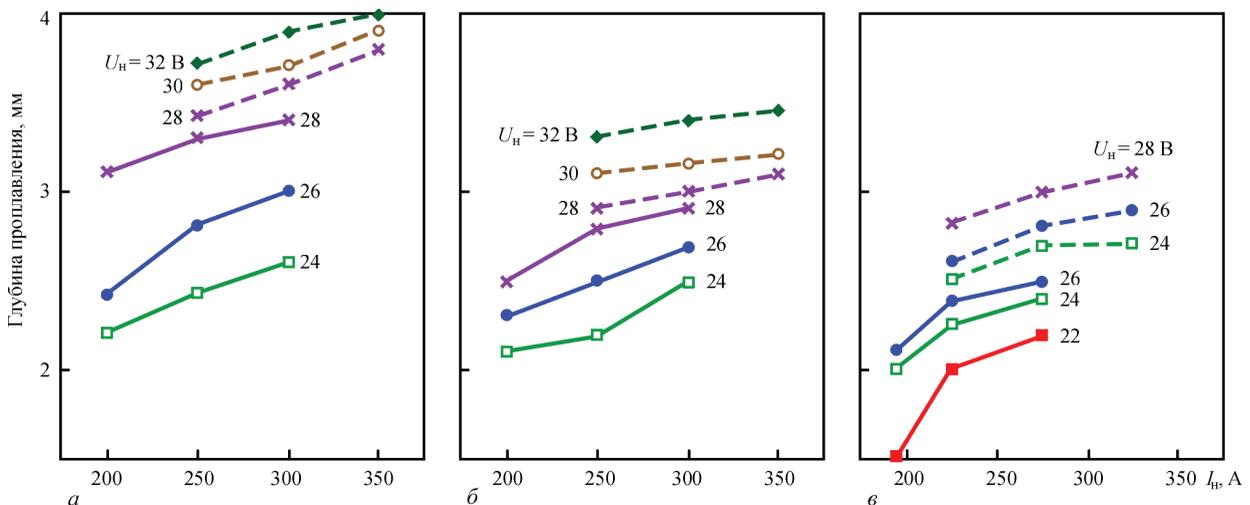


Рис. 1. Влияние тока на глубину проплавления при наплавке под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) (сплошные линии — проволока диаметром 1,8; штриховые — 2,8 мм)

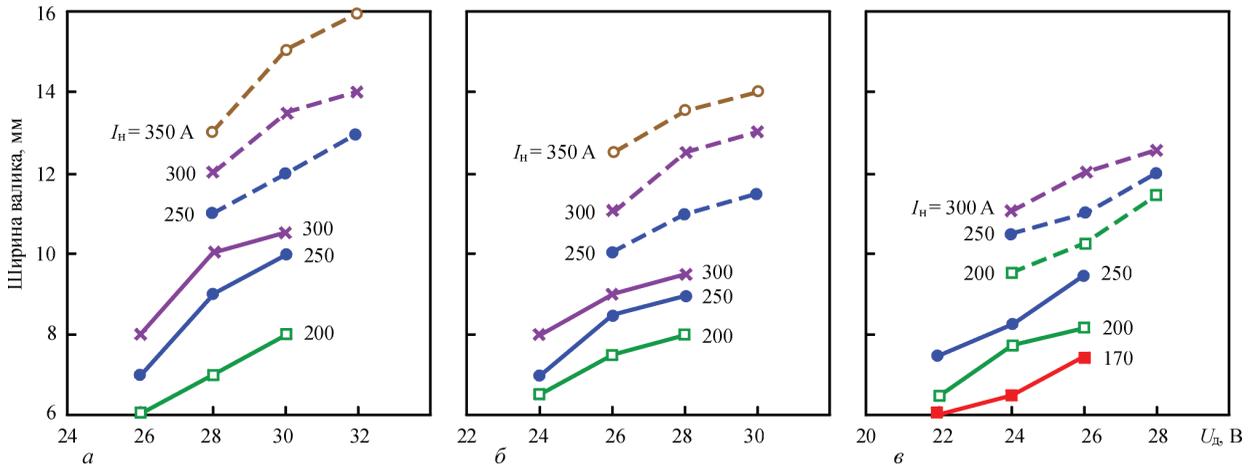


Рис. 2. Влияние напряжения дуги на ширину валика при наплавке под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) (сплошные линии — проволока диаметром 1,8; штриховые — 2,8 мм)

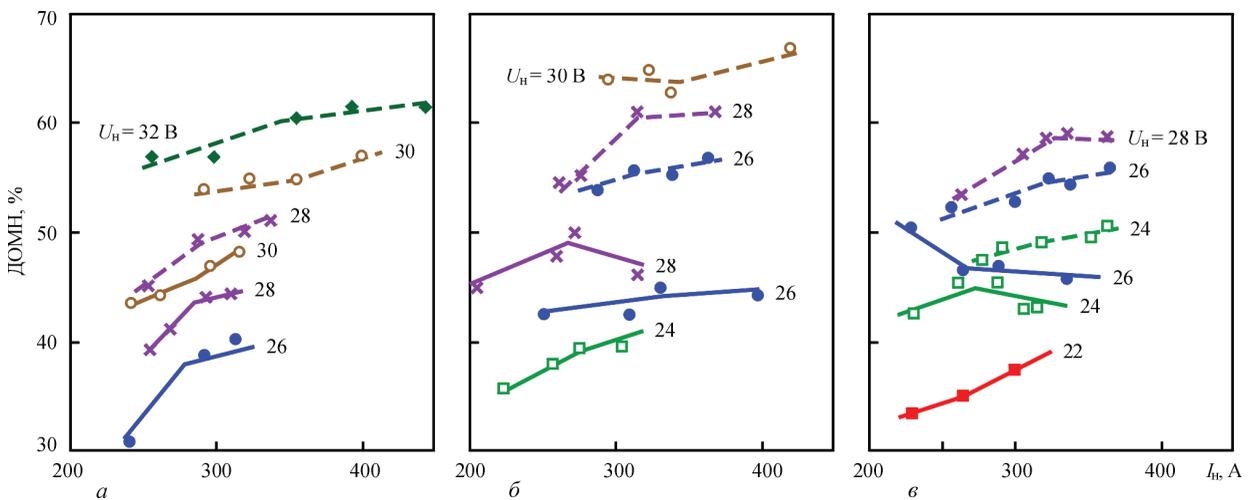


Рис. 3. Влияние тока и напряжения дуги на ДОМН при наплавке под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) (сплошные линии — проволока диаметром 1,8; штриховые — 2,8 мм)

Как видно из рис. 1 и 2, увеличение электрических параметров режима наплавки приводит к росту глубины проплавления основного металла и ширины наплавленных валиков. Наиболее существенно это проявляется при наплавке под флюсом. Увеличение тока и напряжения приводит к практически пропорциональному росту ДОМН (рис. 3). Это объясняется тем, что увеличение силы тока приводит к увеличению эффективной тепловой мощности дуги, вследствие чего увеличиваются глубина проплавления и скорость плавления электрода.

Установлено, что при одинаковом режиме наплавки проволокой одного диаметра меньшее значение ДОМН можно получить при наплавке под флюсом. Очевидно, это связано с большим тепловым КПД данного процесса за счет лучшего теплообмена между дугой и основным металлом и отсутствием теплопотерь на излучение и разбрызгивание электродного металла. Как следствие, рост площади наплавки происходит быстрее роста площади расплавленного основного металла.

При этом обеспечить минимально возможное проплавление с учетом качественного формирова-

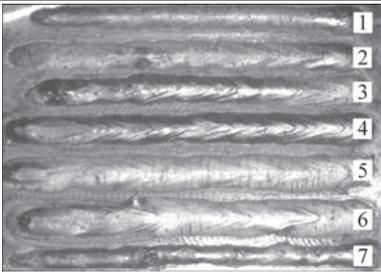
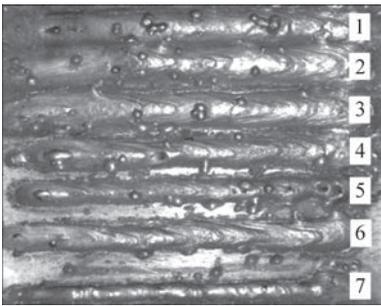
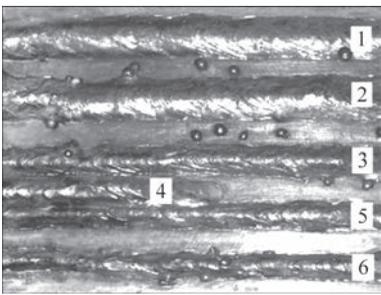
ния наплавленных валиков (см. ниже) возможно в случае наплавки открытой дугой проволокой диаметром 1,8 мм. Также следует отметить, что для каждого способа характерны области с практически неизменной или даже уменьшающейся величиной ДОМН при росте тока и напряжения, что также объясняется соотношением величин электрических параметров режимов наплавки.

Влияние способов и режимов наплавки на качество формирования наплавленных валиков.

Наплавка под флюсом. При использовании порошковой проволоки диаметром 1,8 мм хорошее формирование наблюдается на режимах: $I_n = 220...300$ А, $U_n = 28...30$ В; для проволоки диаметром 2,4 мм: $I_n = 250...350$ А, при таком же напряжении. Уменьшение $U_n < 28$ В, как и увеличение $U_n > 30$ В для проволок указанных диаметров приводит к получению, соответственно, слишком узких или слишком широких валиков с неравномерным формированием.

Для проволоки диаметром 2,8 мм оптимальный режим наплавки соответствует значениям $U_n = 28...32$ В и $I_n = 250...400$ А. При значениях на-

Влияние режима наплавки порошковыми проволоками диаметром 1,8 мм на формирование наплавленного металла и ДОМН в зависимости от способа наплавки

Номер п/п	Режим наплавки		Формирование (наличие пор)	ДОМН, %	Внешний вид наплавленных валиков
	I_n , А	U_n , В			
Наплавка под флюсом					
1	241	26,9	Удовлетворительное. Узкий валик	30,5	
2	245	27,9	Хорошее	44,0	
3	290	27,8	Плохое	44,5	
4	298	27,7	Плохое	51,3	
5	301	28,9	Хорошее	44,0	
6	311	28,6	Удовлетворительное	48,5	
7	224	26,5	Плохое. Узкий валик	25,5	
Наплавка в защитном газе					
1	237	26,5	Хорошее	42,5	
2	331	26,5	Хорошее	50,0	
3	316	27,3	Хорошее	46,0	
4	272	27,6	Удовлетворительное (поры)	50,0	
5	171	28,3	Удовлетворительное (поры)	49,3	
6	161	26,7	Удовлетворительное	50,0	
7	172	23,0	Удовлетворительное. Узкий валик	25,8	
Наплавка открытой дугой					
1	256	23,4	Хорошее	47,5	
2	239	23,7	Хорошее	45,5	
3	227	22,3	Хорошее. Узкий валик	48,0	
4	236	22,2	Хорошее. Узкий валик	38,5	
5	218	22,3	Хорошее. Узкий валик	51,5	
6	232	23,3	Удовлетворительное. Узкий валик	26,5	

пряжения $U_n < 28$ В и $U_n > 32$ В формирование валиков ухудшается, однако и на таких «неблагоприятных» режимах отмечается отсутствие дефектов в наплавленном металле.

Наплавка в среде защитных газов. При наплавке порошковой проволокой диаметром 1,8 мм хорошее формирование наплавленных валиков наблюдается в диапазоне режимов $U_n = 25...27$ В; $I_n = 250...320$ А. При напряжении $U_n < 25$ В и $U_n > 27$ В отмечается удовлетворительное формирование и отсутствие пор, а при повышении напряжения более 28 В — в наплавленном металле появляются поры, а формирование валиков плохое.

Для проволоки диаметром 2,4 мм диапазон режимов, при которых достигается качественное формирование наплавленных валиков, соответствует $U_n = 26...28$ В; $I_n = 270...350$ А. При напряжении $U_n < 25$ В и $U_n > 28$ В формирование удовлетворительное, поры отсутствуют.

Наплавку проволокой диаметром 2,8 мм рекомендуется вести на режимах: $U_n = 27...29$ В; $I_n = 270...350$ А. В диапазонах $U_n = 25...26$ В и $U_n = 30...32$ В формирование наплавленных валиков удовлетворительное, поры отсутствуют. При напряжении $U_n < 25$ В и $U_n > 32$ В отмечается плохое формирование наплавленного металла и наличие пор.

Наплавка открытой дугой. Для данного способа наплавки хорошее формирование и отсутствие пор в большинстве случаев характерны только для определенного диапазона режима наплавки. Однако при наплавке открытой дугой следует различать два диапазона режимов по напряжению дуги: ΔU_T — диапазон, при котором обеспечивается хорошее формирование, минимальное разбрызгивание, допустимая ДОМН и $\Delta U_{оп}$ — диапазон, при котором отсутствуют поры [4].

Для разных типов наплавленного металла и составов шихты порошковых проволок ΔU_T и $\Delta U_{оп}$ могут значительно отличаться друг от друга по величине. При этом диапазон режимов, в котором

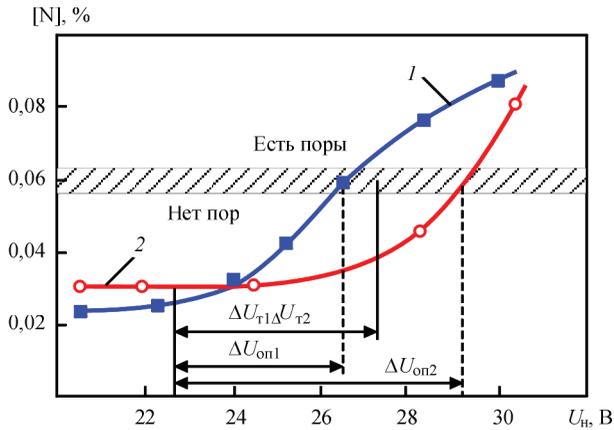


Рис. 4. Влияние напряжения дуги на пористость в наплавленном металле [4] (обозначения см. в тексте)

ΔU_T и $\Delta U_{оп}$ совпадают — является наиболее предпочтительным для наплавки. В качестве иллюстрации, на рис. 4 показано влияние напряжения дуги на пористость наплавленного металла при наплавке самозащитными проволоками с одинаковым содержанием металлической части шихты, но с разным составом газо- и шлакообразующих материалов: 1 — рутил, мрамор, флюорит; 2 — рутил, флюорит, фторцирконат кальция, слюда [4].

Проведенные исследования показали, что для самозащитной проволоки диаметром 1,8 мм хорошее формирование наплавленных валиков и отсутствие пор характерно для режимов $U_n = 22...24$ В при токе $I_n = 200...250$ А. При напряжении $U_n < 22$ В форма валиков узкая, формирование удовлетворительное. При $U_n > 24$ В практически во всем диапазоне токов отмечается значительное количество пор и плохое формирование валиков. Также с повышением тока и напряжения увеличивается разбрызгивание металла.

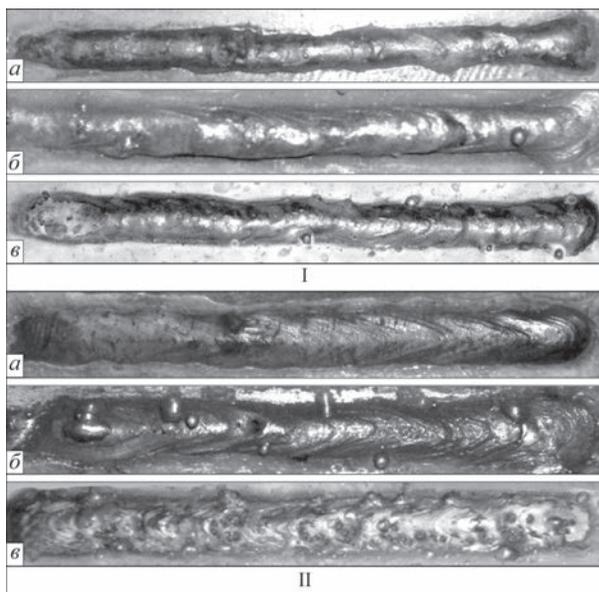


Рис. 5. Внешний вид валиков, наплавленных порошковой проволокой диаметром 1,8 мм под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) на режимах: I — $U_n = 24$ В, $I_n = 225$ А; II — $U_n = 28$ В, $I_n = 250$ А

При наплавке самозащитными порошковыми проволоками диаметром 2,4 и 2,8 мм устойчивый процесс с хорошим формированием наплавленных валиков и отсутствием в них пор характерен для режимов наплавки $U_n = 23...25$ В; $I_n = 220...300$ А. Для валиков, наплавленных на режимах $U_n < 23$ В и $U_n = 25...27$ В, также характерно отсутствие пор, однако их форму и качество поверхности можно признать недостаточно хорошими. При напряжении $U_n > 27$ В процесс становится нестабильным, валики характеризуются плохим формированием и наличием многочисленных пор.

Таким образом, для исследуемых самозащитных проволок диапазоны ΔU_T и $\Delta U_{оп}$ практически совпадают. Внешний вид наиболее характерных валиков, наплавленных порошковыми проволоками диаметром 1,8 и 2,8 мм на одинаковых режимах тремя разными способами, представлен на рис. 5 и 6.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что на проплавление основного металла главным образом влияет ток наплавки, а на качество формирования наплавленного металла и на стабильность процесса наплавки напряжение дуги. При этом каждому диаметру проволоки соответствует определенный, довольно узкий диапазон ΔU_T , при котором обеспечивается хорошее формирование наплавленных валиков с минимальным проплавлением основного металла. Кроме того, как видно из рис. 5 и 6, этот диапазон для разных способов наплавки проволокой одного состава и диаметра не совпадает. Например, при наплавке проволокой диаметром 1,8 мм на режиме $U_n = 24$ В формирование валика, полученного при наплавке под флюсом — плохое, при наплавке в защитных газах — удовлетворительное, а

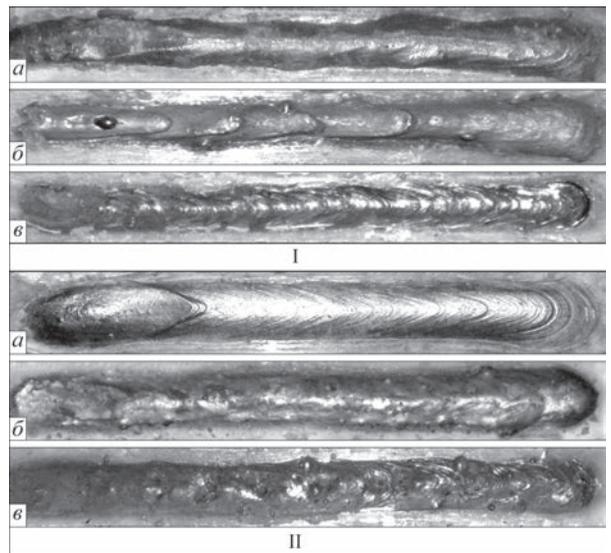


Рис. 6. Внешний вид валиков, наплавленных порошковой проволокой диаметром 2,8 мм под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) на режимах: I — $U_n = 24$ В, $I_n = 250$ А; II — $U_n = 28$ В, $I_n = 275$ А

при наплавке самозащитной проволокой — хорошее (рис. 5, режим I). Обратная зависимость видна при повышении напряжения до 28 В (рис. 5, режим II). Такая же закономерность характерна и при наплавке проволоками диаметром 2,4 и 2,8 мм (рис. 6).

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при выборе режимов наплавки, которые в наибольшей степени удовлетворяют условиям эксплуатации и требованиям к наплавленному металлу для конкретных деталей, а также будут использоваться в базах данных при разработке компьютерных программ для роботизированных аддитивных технологий дуговой наплавки.

Выводы

1. Установлено, что наибольшее влияние на качество формирования наплавленных валиков оказывает напряжение дуги. При этом диапазон значений напряжения $\Delta U_{\text{г}}$, при котором обеспечивается хорошее формирование наплавленных валиков, не совпадает при дуговой наплавке разными способами проволокой одного диаметра.

2. Наиболее существенно влияние режимов наплавки на геометрические размеры валиков и проплавление основного металла проявляется при наплавке под флюсом. Данный способ обеспечивает наиболее широкий диапазон $\Delta U_{\text{г}}$, однако вместе с тем, для него характерна также большая глубина проплавления основного металла. Обеспечить минимально возможное проплавление при качественном формировании наплавленных валиков возможно в случае наплавки открытой дугой проволокой диаметром 1,8 мм.

3. Определены оптимальные диапазоны режимов наплавки порошковыми проволоками, обеспечивающие получение качественного напла-

вленного металла типа 25Х5ФМС с минимальным проплавлением основного металла.

1. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков. – К.: Наукова думка, 1972. – 223 с.
2. Металлургия дуговой сварки, взаимодействие металла с газами / И. К. Походня, И. Р. Явлошин, А. П. Пальцевич [и др.]. – К.: Наукова думка, 1994. – 444 с.
3. Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой (Обзор) / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, С. Ю. Максимов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12. – С. 34–42.
4. Юзвенко Ю. А. Наплавка порошковой проволокой / Ю. А. Юзвенко, Г. А. Кирилук. – М.: Машиностроение, 1973. – 45 с.
5. Шлепаков В. Н. Современное состояние разработки и применения порошковых проволок для сварки углеродистых и низколегированных сталей / В. Н. Шлепаков, Ю. А. Гаврилюк, А. С. Котельчук // Автоматическая сварка. – 2010. – № 3. – С. 46–51.
6. Шлепаков В. Н. Физико-металлургические и сварочно-технологические свойства газозащитных порошковых проволок для сварки конструкционных сталей / В. Н. Шлепаков // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 56–59.
7. Розерт Р. Применение порошковых проволок для сварки в промышленных условиях / Р. Розерт // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 60–64.
8. Кондратьев И. А. Порошковые проволоки для наплавки стальных валков горячей прокатки / И. А. Кондратьев, И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 99–100.
9. Рябцев И. А. Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев. – К.: Екотехнологія, 2004. – 160 с.
10. Разиков М. И. Автоматическая наплавка в среде углекислого газа / М. И. Разиков. – М.: Машиностроение, 1962. – 212 с.
11. Демченко В. Ф. Компьютерная система проектирования технологий дуговой наплавки / В. Ф. Демченко, И. А. Рябцев, С. С. Козлигина // Автоматическая сварка. – 1998. – № 11. – С. 61–66.
12. Демченко В. Ф. Компьютерная система проектирования технологий восстановления и упрочнения деталей металлургического оборудования / В. Ф. Демченко, И. А. Рябцев, С. С. Козлигина // Тяжелое машиностроение. – 1999. – № 2. – С. 25–26.
13. Компьютерная информационно-измерительная система для исследования процессов дуговой наплавки / И. А. Рябцев, Ю. Н. Ланкин, В. Г. Соловьев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 9. – С. 34–37.

Поступила в редакцию 15.09.2016

WRTYS 2017

IX Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии»

23–26 мая 2017 г.

Киевская область

Совет научной молодежи ИЭС при поддержке Национальной академии наук Украины и Института электросварки им. Е. О. Патона проводит 23–26 мая 2017 г. IX Международную конференцию молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии».

Контакты: www.wrtys.com.ua, E-mail: office@paton.kiev.ua

Тел.: +38 (044) 200-47-83, факс: +38 (044) 528-04-86