

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

А. А. БАБИНЕЦ<sup>1</sup>, И. А. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>, А. И. ПАНФИЛОВ<sup>2</sup>, В. А. ЖДАНОВ<sup>1</sup>, И. И. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ООО «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  $\Delta U_p$ , 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 % CO<sub>2</sub>) и открытой дугой самозащитной порошковой проволокой (система защиты CaO+TiO<sub>2</sub>+MgO+CaF<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 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  $\gamma_o$  (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).

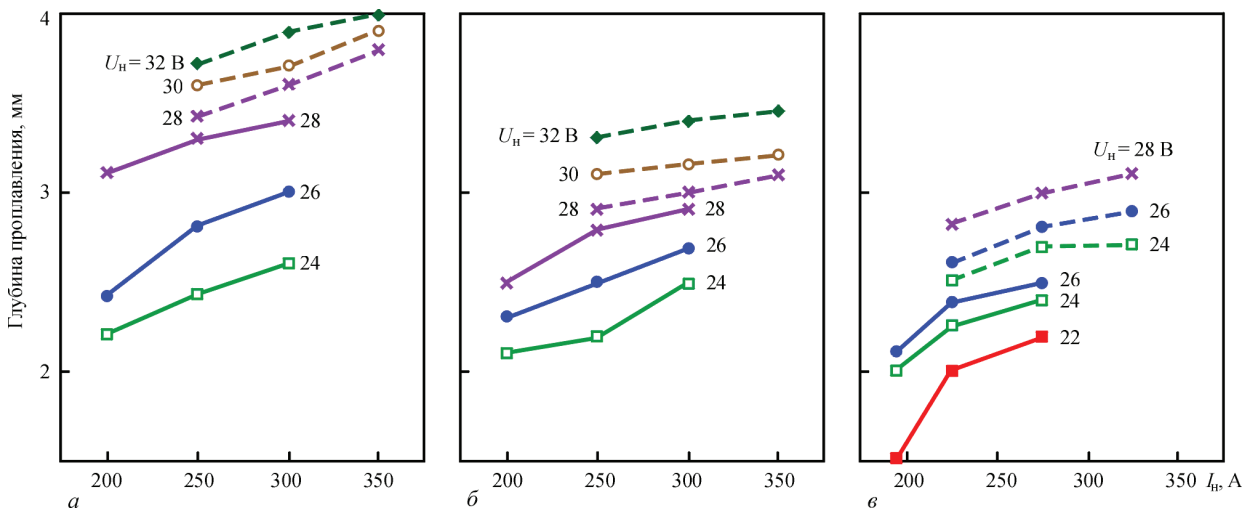


Рис. 1. Влияние тока на глубину проплавления при наплавке под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) (сплошные линии — проволока диаметром 1,8; штриховые — 2,8 мм)

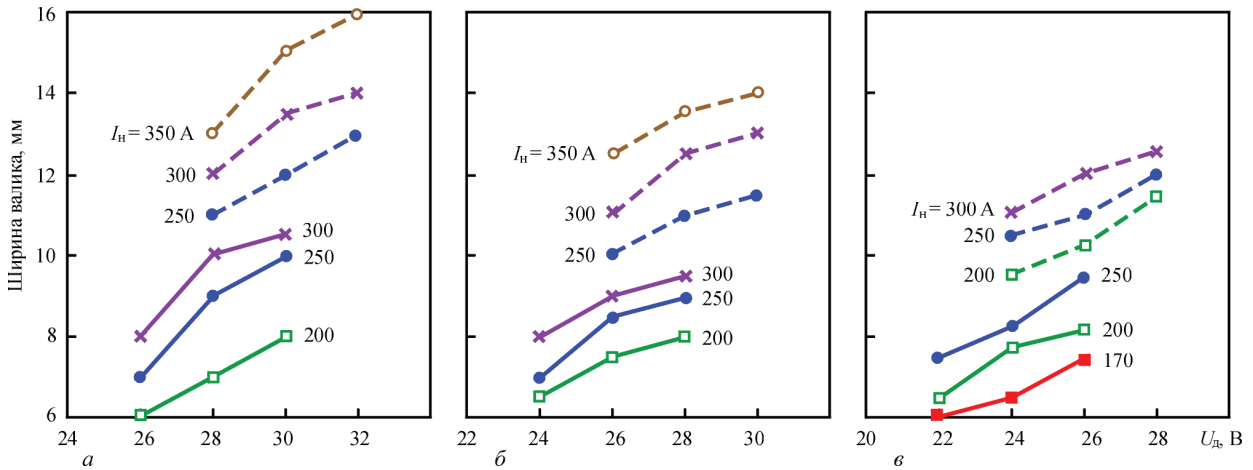


Рис. 2. Влияние напряжения дуги на ширину валика при наплавке под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) (сплошные линии — проволока диаметром 1,8; штриховые — 2,8 мм)

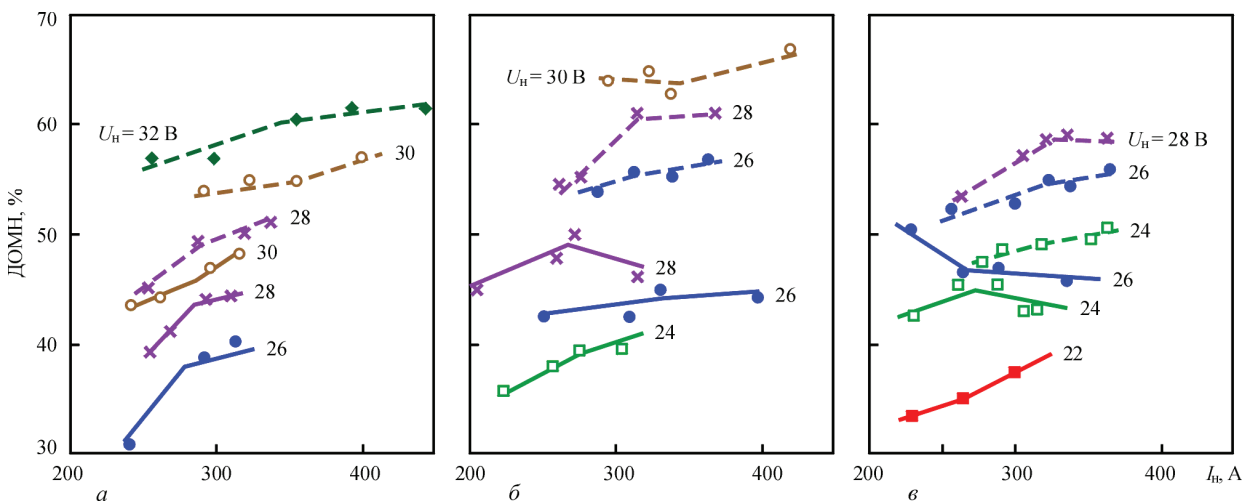


Рис. 3. Влияние тока и напряжения дуги на ДОМН при наплавке под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) (сплошные линии — проволока диаметром 1,8; штриховые — 2,8 мм)

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.

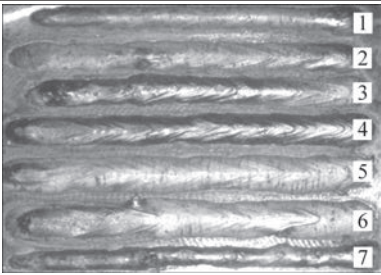
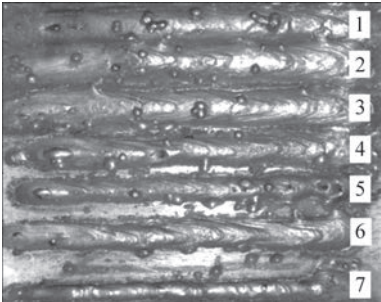
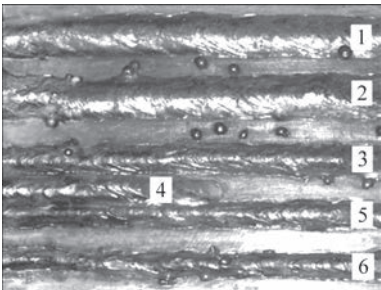
При этом обеспечить минимально возможное проплавление с учетом качественного формирова-

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:  $I_n = 220 \dots 300$  А,  $U_n = 28 \dots 30$  В; для проволоки диаметром 2,4 мм:  $I_n = 250 \dots 350$  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  $U_n = 28 \dots 32$  В и  $I_n = 250 \dots 400$  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:  $\Delta U_T$  — 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  $\Delta U_T$  и  $\Delta U_{оп}$  могут значительно отличаться друг от друга по величине. При этом диапазон режимов, в котором



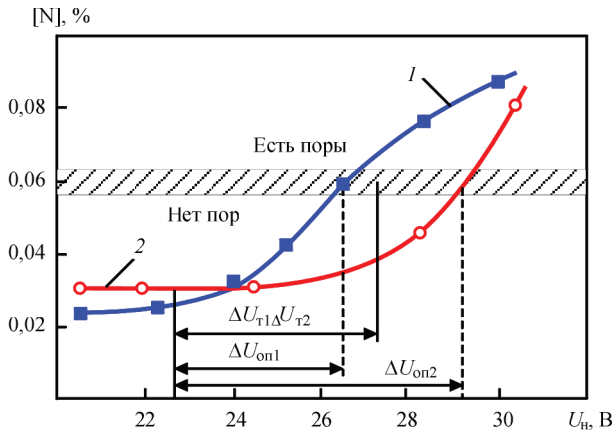


Рис. 4. Влияние напряжения дуги на пористость в наплавленном металле [4] (обозначения см. в тексте)

$\Delta U_T$  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 — рутит, мрамор, флюорит; 2 — рутит, 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.

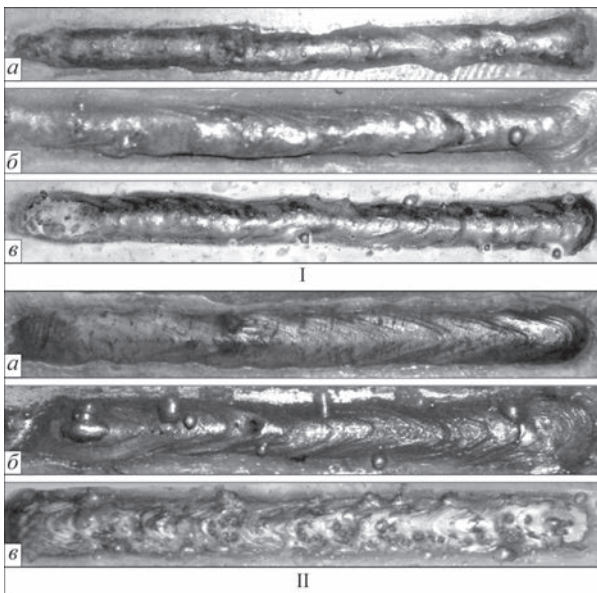


Рис. 5. Внешний вид валиков, наплавленных порошковой проволокой диаметром 1,8 мм под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) на режимах: I —  $U_n = 24$  В,  $I_n = 225$  А; II —  $U_n = 28$  В,  $I_n = 250$  А

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  $\Delta U_T$  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  $\Delta U_T$ , 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

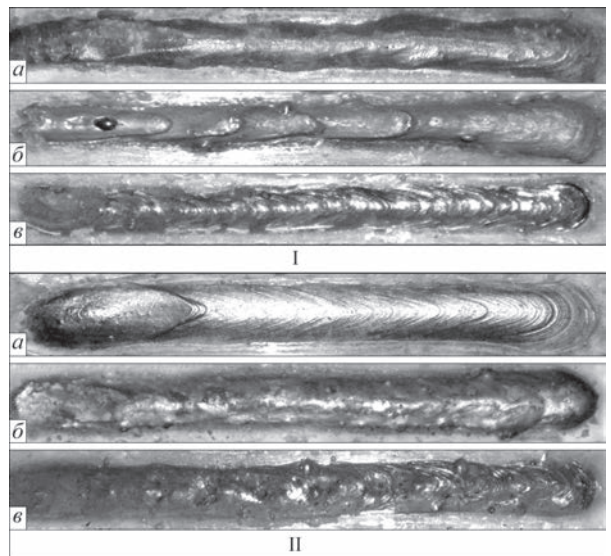


Рис. 6. Внешний вид валиков, наплавленных порошковой проволокой диаметром 2,8 мм под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) на режимах: I —  $U_n = 24$  В,  $I_n = 250$  А; II —  $U_n = 28$  В,  $I_n = 275$  А

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  $\Delta U_{\text{т}}$ , 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  $\Delta U_{\text{т}}$ , 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](http://www.wrtys.com.ua), E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

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