

УДК 621.791.754

© Иванов В.П.¹, Размышляев А.Д.², Лаврова Е.В.³**УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ ЗОНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ
СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ**

Проведены исследования формирования зоны проплавления при сварке хромоникелевых аустенитных сталей в среде защитных газов. Изучалось влияние параметров режима и вида газовой среды на формирование зоны проплавления. Определены основные параметры управления глубиной и формой проплавления. Разработаны модели формирования зоны проплавления для сварки в среде аргона и углекислого газа. Для построения моделей применяли метод множественного регрессионного анализа. Использованы зависимости третьего порядка, позволяющие учитывать явления переноса электродного металла и изменение теплофизических свойств свариваемых материалов при расчете формы зоны проплавления и показавшие достаточно хорошую сходимость с результатами измерений.

Ключевые слова: сварка в среде защитных газов, сварочная ванна, зона проплавления, математическая модель, управление формированием.

Іванов В.П., Розмишляєв О.Д., Лаврова О.В. Управління формуванням зони проплавлення при зварюванні плавким електродом в середовищі захисних газів. Проведено дослідження формування зони проплавлення при зварюванні хромонікелевих аустенітних сталей в середовищі захисних газів. Вивчався вплив параметрів режиму і виду газового середовища на формування зони проплавлення. Визначено основні параметри управління глибиною і формою проплавлення. Розроблено моделі формування зони проплавлення для зварювання в середовищі аргону і вуглекислого газу. Для побудови моделей застосовували метод множинного регресійного аналізу. Використано залежності третього порядку, що дозволяють враховувати явища переносу електродного металу і зміни теплофізичних властивостей матеріалів при розрахунку форми зони проплавлення і показали досить хорошу збіжність з результатами вимірів.

Ключові слова: зварювання в середовищі захисних газів, зварювальний ванна, зона проплавлення, математична модель, управління формуванням.

V.P. Ivanov, O.D. Razmushlyayev, O.V. Lavrova. Control of penetration zone GMAW. Thermal properties of the base metal, shielding medium and the nature of the electrode metal transfer to a great extent determine the penetration area formation in gas-arc welding. It is not always possible to take into account the influence of these factors on penetration front forming within the existing models. The aim of the work was to research the penetration area forming in gas-arc welding. The research of the penetration area forming in gas-arc welding of CrNi austenitic steels was made. The parameters of the regime as well as the kind of the gaseous medium influence on the formation of the penetration zone were studied. The article shows a linear proportional relationship between the electrode feed rate and the size of the base metal plate. The penetration area formation mode for welding in argon and carbon dioxide have been worked out. Diameter, feed rate and the speed of the electrode movement have been chosen as the main input parameters. Multiple regression analysis method was used to make up the modes. The relations of the third order that make it possible to take into account the electrode metal transfer and

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ « Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, ivanov_v_p@pstu.edu

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ « Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, razmushlyayev_o_d@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ « Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, lavrova_o_v@pstu.edu

thermal properties change of the materials to be welded were used. These relationships show quite good agreement with the experimental measurements in the calculation of the fusion zone shape with consumable electrode in argon and carbon dioxide. It was determined that the shape of the melting front curve can be shown as a generalized function in which the front motion parameters depend on feed rate and the diameter of the electrode. Penetration zone growth time is determined by the welding speed and is calculated as a discrete function of the distance from the electrode with the spacing along the movement coordinate. The influence of the mode parameters on the formation of the fusion zone has been investigated and the ways to manage and stabilize the weld pool formation have been identified. The modes can be used to develop effective ways to manage and control the welding process. Making up of the control systems as well as surfacing control involve the selection of the parameters that directly influence the formation of the melting zone as well as the use of these parameters as control signals in real time regime. The influence of the mode parameters on the formation of the fusion zone has been investigated and the ways to manage and stabilize the weld pool formation have been identified. The penetration zone modes formation for the fixed and moving electrodes have been worked out. The relations were calculated through statistical processing of macrosections penetration zones parameters measurement results, the macrosections being obtained by means of arc welding in shielding gases for various diameters of the electrode and various feed rate ranges (current), according to the arc time and its speed of movement.

Keywords: weld pool, penetration zone, a mathematical model, the control of formation.

Постановка проблеми. Эффективность расплавления и переноса металла электрода в сварочную ванну при сварке плавлением определяется не только энергетическими показателями дуги, но и теплофизическими характеристиками основного металла и электрода, подаваемого в сварочную ванну. Известные расчетные методики [1] позволяют адекватно определять такие количественные показатели эффективности расплавления, как глубина и ширина шва, а также площадь зон проплавления и наплавки, однако, прогноз формы проплавления и показателей качества сварного соединения в ряде случаев представляет собой сложную научно-практическую задачу. Теплофизические свойства основного металла, вид защитной среды и характер переноса, при прочих равных условиях, в значительной степени влияют на формирование шва. Например, для зоны проплавления при использовании аргона в качестве защитной среды характерна т.н. «грибовидная» форма (*keyhole penetration*), связываемая со струйным видом переноса электродного металла в сварочную ванну (рис. 1). Такая же форма зоны проплавления наблюдается в случаях применения концентрированных источников энергии [2].

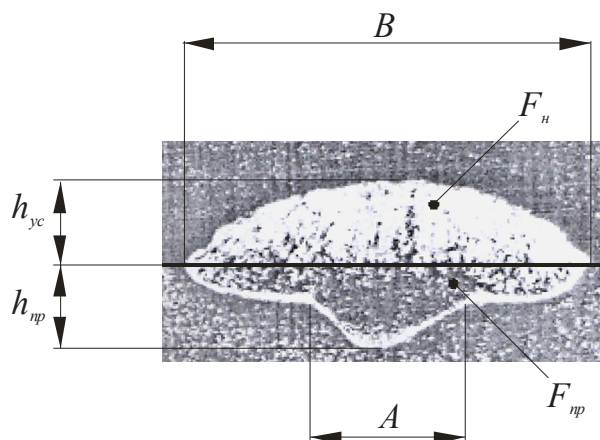


Рис. 1 – Характерная форма и основные геометрические характеристики шва при сварке в среде аргона ($d_s = 1$ мм; $I_{cs} = 210\text{--}220$ А, $v_{cs} = 20$ м/ч, $U_d = 35$ В): h_{np} – глубина проплавления, мм; h_{yc} – высота усиления валика, мм; B – ширина шва, мм; F_n – площадь наплавленного металла, мм²; F_{np} – площадь проплавления основного металла, мм²

Прогнозировать формирование зоны проплавления подобной формы в рамках модели теплопроводности затруднительно, поскольку не удастся построить линию зоны проплавления, отличную от эллипсоидной, не прибегая к приемам суперпозиции изотермы за счет введения дополнительных коэффициентов [2], учитывающих перенос жидкого металла при сварке плавящимся электродом. Детерминированные модели, основанные на системе уравнений Навье-Стокса [3], слишком громоздки и сложны в решении для применения на практике.

В то же время для оперативного управления процессом сварки, разработки систем автоматизированного проектирования и контроля необходимы соответствующие модели и методики, позволяющие оперативно рассчитывать профиль зоны проплавления и возможные дефекты на линии сплавления шва при изменении технологических параметров процесса сварки.

Анализ последних исследований и публикаций. Наличие такой грибовидной формы, по нашему мнению, объясняется различной скоростью протекания двух процессов – формированием зоны проплавления и зоны наплавки [4]. Классическая форма сечения шва возможна при согласовании параметров обоих процессов, т. е. когда $A = B$ (см. рис. 1). Как показывают результаты экспериментов [5], начальные моменты формирования обеих зон совпадают, но момент завершения формирования зоны проплавления зачастую наступает раньше, чем сформировалась зона наплавки, движение жидкого металла прекращается и область проплавления начинает интенсивно кристаллизоваться. Наплавленная часть, которая продолжает увеличиваться по ширине и высоте за счет переноса электродного металла, уже не поступающего в основную, выходит за пределы зоны проплавления и создает грибовидную форму шва.

В формировании зоны проплавления, наряду с теплопередачей, значительный вклад вносят потоки жидкого металла электрода, распределение скоростей и картина течений которых изменяет кривизну фронта и размеры зоны плавления. Известны работы, посвященные моделированию явлений переноса электродного металла при сварке в среде защитных газов [6-8, 9], и способы влияния на формирование сварного шва [10, 11-12]. Тем не менее, возможности прогнозируемо влиять на эти изменения и оперативно управлять формой зоны проплавления за счет изменения параметров режима в настоящее время изучены не в полной мере.

Цель статьи – исследование процесса формирования зоны проплавления при электродуговой сварке в среде защитных газов, определение основных технологических параметров, влияющих на это формирование, и разработка математической моделей и методик расчета зоны проплавления для разработки эффективных способов управления процессом сварки.

Изложение основного материала. Эффективность процесса плавления основного металла в большинстве случаев определяется размерами зоны проплавления, в частности, глубиной и формой, поэтому установление функциональных взаимосвязей этих параметров и технологических факторов представляет научный и практический интерес.

Были проведены исследования формирования зоны проплавления при сварке хромоникелевых аустенитных сталей в среде защитных газов. Производили автоматическую сварку в углекислом газе по ГОСТ 8050-76 и в аргоне по ГОСТ 10157-79 (не менее 99,992% Ar). В качестве основного металла использовали пластины из стали 12X18H10T 300x150 мм толщиной 4, 6, 8, 10 и 15 мм. Для сварки в среде углекислого газа использовали проволоку Св-08Х20Н9Г7Т (ГОСТ 2246-70) диаметров 1,2 мм и 2 мм, в среде аргона – проволоку 12X18H10T (ГОСТ 8143-72) диаметров 1,0 мм и 1,6 мм. Параметры режима приведены в таблице. Во всех случаях вылет электрода составлял 15 мм, расход газа – 15 л/мин. Контролировали также длину дуги и характер переноса электродного металла (см. табл.).

Таблица

Диапазоны изменения параметров режима сварки

№	Параметры режима:				Длина дуги, мм	Характер переноса электродного металла	Газ
	Сила тока $I_{св}$, А	Скорость сварки, $v_{св}$, м/ч	Диаметр электрода $d_э$, мм	Напряжение на дуге $U_д$, В			
1	250–260	20	1,0	35	5–6	струйный	Ar
2	210–220	20	1,0	30–31	3	мелкокапельный	
3	160–180	20	1,0	22	1–2	мелкокапельный	
4	130–140	20	1,0	22	2	мелкокапельный	

Продолжение таблицы

5	160–180	40	1,0	22	2	мелкокапельный		
6	220	40	1,0	30–31	2	мелкокапельный		
7	255–260	40	1,0	35	5–6	струйный		
8	260	60	1,0	35–36	6	струйный		
9	220–225	60	1,0	30–31	4	мелкокапельный		
10	220	60	1,0	22–23	1–2	капельный		
11	300	20	1,2	35	2	мелкокапельный		CO ₂
12	250	20	1,2	35	2	мелкокапельный		
13	200–210	20	1,2	30	1,5–2	капельный		
14	250	40	1,2	35	2	капельный		
15	250	60	1,2	35	2	капельный		

Размеры зоны проплавления определялись по макрошлифам, полученных полировкой и травлением смесью азотной и соляной кислот поперечных темплетов наплавленных валиков. Исследовали параметры зоны проплавления, изображенные на рис. 1. Как показали результаты исследований, во всем диапазоне изменения технологических параметров сохраняется линейная пропорциональная зависимость глубины проплавления от силы сварочного тока, (рис. 2, а).

Установлено также аналогичное влияние размеров (толщины) пластин основного металла на эффективность проплавления. Так, увеличение толщины основного металла приводит к снижению глубины проплавления (рис. 2, б), что связано с изменением условий теплоотвода от зоны расплавления.

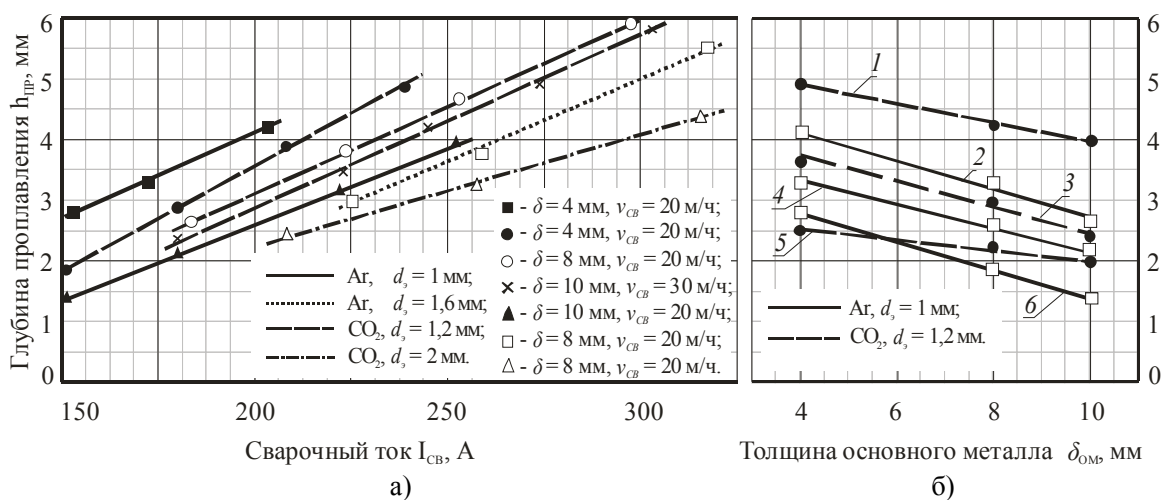


Рис. 2 – Зависимость глубины зоны проплавления от силы тока (а) и толщины основного металла(б): 1 – $I_{св} = 240$ А; 2, 3 – $I_{св} = 200$ А; 4, 5 – $I_{св} = 170$ А; 6 – $I_{св} = 150$ А; ($v_{св} = 20$ м/ч)

При дальнейшем увеличении толщины основного металла графики зависимостей глубины проплавления для типов защитной среды и близких сечений электрода сходятся к некоторой асимптотической линии, отличаясь, в основном, интервалами изменения тока, характерных для применяемых диаметров электрода (рис. 3, а). Это говорит о том, что в разрабатываемых моделях в качестве независимого параметра целесообразно использовать скорость подачи электрода (плотность тока). Сила тока не может использоваться в качестве независимого параметра, поскольку при увеличении диаметра электрода существенно снижается эффективность проплавления, если значение силы тока остается неизменной.

Зависимость глубины проплавления от скорости сварки имеет вид обратной пропорции (рис. 3, б) для всех исследуемых диаметров. Характер зависимости позволяет использовать скорость перемещения электрода в качестве второго независимого параметра модели.

Для построения модели применяли метод множественного регрессионного анализа. По результатам значений величины среднего отклонения расчетной линии зоны проплавления бы-

ли выбраны полиномы третьей степени, показавшие достаточно хорошую сходимость с результатами измерений макрошлифов. Использование зависимостей третьего порядка позволяет более адекватно осуществлять расчет формы зоны проплавления с учетом теплофизических свойств и переноса электродного металла.

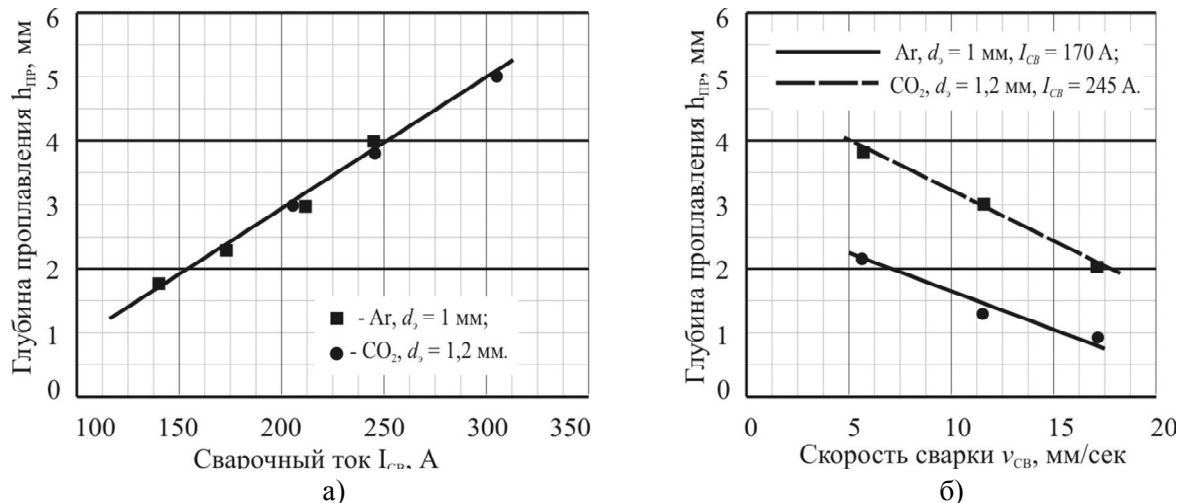


Рис. 3 – Зависимость глубины зоны проплавления от силы тока при толщине металла свыше 10 мм ($v_{св} = 10$ м/ч) (а) и скорости сварки (б)

Исследование полученных расчетных зависимостей показало возможность выражения влияния независимых параметров на изменение формы линии проплавления через обобщенную функцию вида:

$$\bar{V}_i(\bar{x}) = \left[\varepsilon_1 \bar{x}^2 + \varepsilon_2 \exp(\bar{x}) + \frac{\varepsilon_3}{\exp(\bar{x})} + \varepsilon_4 \bar{x} + \varepsilon_5 \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $\bar{V}_i(\bar{x})$ – относительная скорость для i -го интервала времени перемещения;

\bar{x} – относительная координата точки фронта плавления;

ε_i – коэффициенты, представляющие собой функциональные зависимости от технологических параметров, где в качестве основных независимых переменных выступают скорость подачи электрода и его диаметр.

Увеличение скорости роста фронта плавления и уменьшение ее до нуля при начале процесса кристаллизации зоны проплавления происходит неравномерно для точек, расположенных на разном расстоянии от оси шва, что приводит к соответствующей неравномерности линии плавления. Поскольку формула (1) связывает мгновенное приращение скорости с относительной координатой, суммирование приращений $\bar{V}_i(\bar{x})$ в течении некоторого интервала времени t' дает положение глубины данной точки на линии плавления. Соответствующий интервал времени t' определяется соотношением, связывающим время действия неподвижного источника в данной точке со скоростью его движения для квазистационарного случая [5].

Шаг по времени t' , после которого начинается кристаллизация в области рассматриваемой точки контура, является функцией не только скорости сварки, но и прочих технологических факторов, что позволяет определять его только эмпирическим путем. В то же время, поскольку такая функциональная зависимость имеет общую природу для широкого диапазона входных данных, при их изменении достаточно корректировки коэффициентов, входящих в данную зависимость.

Такой прием позволяет получить контуры сварочных ванн, в которых максимум проплавления находится на определенном расстоянии от оси электрода и с перегибом по длине донной части [3]. Получить такой результат не представляется возможным в случае расчета по схеме мгновенного источника тепла либо по уточненным моделям, не учитывающим конвективные составляющие теплопереноса в сварочной ванне. Кроме того, использование разрабо-

танной методики позволяет оптимизировать параметры режима сварки по условию обеспечения максимальной зоны проплавления при данной мощности источника.

На рис. 4 представлены расчетные и экспериментальные данные влияния технологических параметров на размеры и форму зоны проплавления для сварки плавящимся электродом в среде аргона (а) и углекислого газа (б). Следует отметить, что валики, наплавленные в среде углекислого газа, характеризуются большей площадью поперечного сечения (рис. 4, б), в то время как форма зон проплавления, полученных в среде аргона (рис. 4, а), имеет более ярко выраженную неравномерность по глубине в центре по сравнению с краями швов. Это объясняется тем, что при сварке в аргоне перенос электродного металла в сварочную ванну является мелкокапельным или струйным. В этом случае потоки жидкого металла электрода, в отличие от дуги, ориентированы вертикально по центру активной зоны, двигаясь ко дну ванны, сохраняют свое направление в течении более длительного времени, чем при капельном и крупнокапельном переносе из-за особенностей струйного течения.

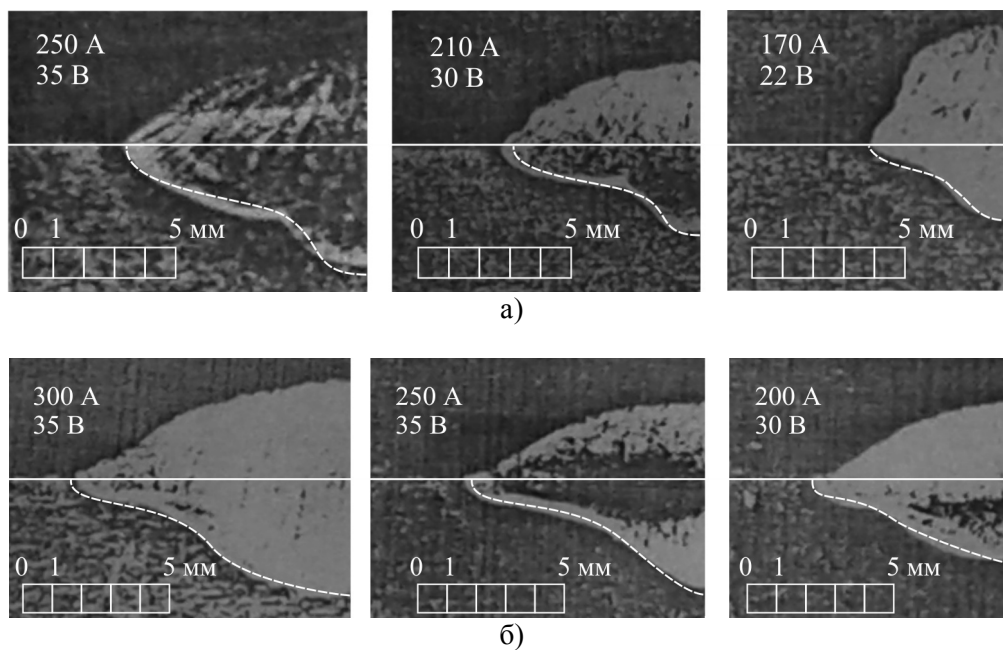


Рис. 4 – Расчетные (пунктир) и экспериментальные контуры сварочных ванн при сварке плавящимся электродом в среде аргона (а) и углекислого газа (б): а) – $d_3 = 1 \text{ мм}$; $v_{CB} = 20 \text{ м/ч}$; б) – $d_3 = 1,2 \text{ мм}$; $v_{CB} = 20 \text{ м/ч}$

При расчете по предлагаемой методике было сделано допущение о том, что толщина основного металла не влияет на движение фронта плавления, т. е. для случаев, когда размеры тела больше критических значений, при которых необходимо учитывать сток или отражение теплового потока от границ тела.

Разработанные модели позволяют более точно определять форму зоны проплавления при сварке в среде защитных газов с учетом явлений переноса и теплофизических свойств свариваемых материалов. В этом случае функция изменения скорости подачи электрода и его перемещения используется в качестве аргументов для расчета формы границы фронта плавления.

Выводы

1. Проведены исследования влияния параметров режима на развитие зоны проплавления при электродуговой сварке в среде защитных газов. Установлено, что форма кривой фронта плавления в исследуемом интервале исходных данных может быть выражена в виде обобщенной функции, в которой параметры движения фронта зависят от скорости подачи и диаметра электрода, а время роста определяется скоростью сварки и рассчитывается как дискретная функция от расстояния до электрода с шагом по координате перемещения.

2. На основании результатов исследований разработаны математические модели формиро-

вания зоны проплавления при сварке в среде аргона и углекислого газа. Основными входными параметрами моделей приняты диаметр, скорость подачи и скорость перемещения электрода.

Список использованных источников:

1. Варуха Е.Н. Расчет глубины проплавления изделия при сварке в углекислом газе / Е.Н. Варуха, А.А. Морозов // Автоматическая сварка. – 2002. – № 8. – С. 20-23.
2. Numerical analysis of keyhole welding of mild steel plate with the plasma arc / S. Tashiro [et al.] // Transactions of JWRI. – 2010. – Vol. 39, № 1. – Pp. 27-31.
3. Размышляев А.Д. Расчетная оценка влияния конвекции жидкого металла на размеры сварочной ванны при дуговой наплавке / А.Д. Размышляев, В.Р. Маевский // Автоматическая сварка. – 1999. – № 8. – С. 22-24.
4. Дмитрик В.В. Численное решение краевых задач теории электродуговой сварки на основе схемы Галеркина / В.В. Дмитрик, В.И. Калиниченко // Доповіді НАН України. – 2002. – № 5. – С. 101-108.
5. Иванов В.П. Повышение эффективности процесса электродуговой наплавки управлением гидродинамикой сварочной ванны / В.П. Иванов // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ» – Маріуполь, 2013. – Вип. 26 – С. 150-160.
6. Tatsukawa I. Influence of filler metal on weld bead penetration and shape in automatic TIG arc welding / I. Tatsukawa, S. Satonaka, M. Inada // Welding Society Proceedings. – 1987. – Vol. 5, № 2 – Pp. 187-193.
7. Choi S.K. Dynamic simulation of metal transfer in GMAW, Part 1: Globular and spray transfer modes / S.K. Choi, C.D. Yoo, Y.S. Kim // Welding Journal. – 1998. – Vol. 77, № 1. – Pp. 38-s-44-s.
8. Experiment and numerical simulation in temperature distribution and welding distortion in GMA welding / S. Yamane [et al.] // Transactions of JWRI. – 2010. – Vol. 39(2), № 2. – Pp. 190-192.
9. Park H. Analysis of weld geometry considering the transferring droplets in gas metal arc welding / H. Park, S. Rhee // JSME international Journal (series C). – 2001. – Vol. 44, № 3. – Pp. 856-862.
10. Lu S. Weld shape variation and electrode oxidation behavior under Ar- (Ar-CO₂) double shielded GTA welding / S. Lu, H. Fujii, K. Nogi // Journal of Materials Science & Technology. – 2010. – № 26(2), – Pp. 170-176.
11. Saito K. Influence of the oxide film on the weld penetration phenomena of stainless steel / K. Saito // Memoirs of Fukui university of technology. – 1995. – Vol. 25, Part I. – Pp. – 89-96.
12. Размышляев А.Д. Эффективность процесса проплавления основного металла при дуговой наплавке проволокой под флюсом / А.Д. Размышляев, М.В. Миронова // Сварочное производство. – 2011. – № 7. – С. 3-8.

Bibliography:

1. Varuha E.N. The calculation of the depth of penetration of the product during welding in carbon dioxide / E.N. Varuha, A.A. Morozov // Automatic Welding. – 2002. – № 8. – Pp. 20-23. (Rus.)
2. Numerical analysis of keyhole welding of mild steel plate with the plasma arc / S. Tashiro [et al.] // Transactions of JWRI. – 2010. – Vol. 39, № 1. – Pp. 27-31.
3. Razmyshlyaev A.D. The estimated impact of liquid metal convection in the weld pool sizes in arc surfacing / A.D. Razmyshlyaev, V.R. Maevskiy // Automatic Welding. – 1999. – № 8. – Pp. 22-24. (Rus.)
4. Dmitrik V.V. Numerical solution of boundary value problems of the theory of electric arc welding on the basis of the Galerkin's scheme / V.V. Dmitrik, V.N. Kalinichenko // NAU reports. – 2002. – № 5. – Pp. 101-108. (Rus.)
5. Ivanov V.P. Improving the efficiency of electric arc welding process by control of weld pool hydrodynamics / V.P. Ivanov // Reporter of the Priazovskyi state technical university : Collection of scientific works / SHEE «PSTU». – Mariupol, 2013. – Issue 26. – Pp. 150-160. (Rus.)
6. Tatsukawa I. Influence of filler metal on weld bead penetration and shape in automatic TIG arc welding / I. Tatsukawa, S. Satonaka, M. Inada // Welding Society Proceedings. – 1987. – Vol. 5, № 2 – Pp. 187-193.
7. Choi S.K. Dynamic simulation of metal transfer in GMAW, Part 1: Globular and spray transfer modes / S.K. Choi, C.D. Yoo, Y.S. Kim // Welding Journal. – 1998. – Vol. 77, № 1. – Pp. 38-s-44-s.

8. Experiment and numerical simulation in temperature distribution and welding distortion in GMA welding / S. Yamane [et al.] // Transactions of JWRI. – 2010. – Vol. 39(2), № 2. – Pp. 190-192.
9. Park H. Analysis of weld geometry considering the transferring droplets in gas metal arc welding / H. Park, S. Rhee // JSME international Journal (series C). – 2001. – Vol. 44, № 3. – Pp. 856-862.
10. Lu S. Weld shape variation and electrode oxidation behavior under Ar- (Ar-CO₂) double shielded GTA welding / S. Lu, H. Fujii, K. Nogi // Journal of Materials Science & Technology. – 2010. – № 26(2), – Pp. 170-176.
11. Saito K. Influence of the oxide film on the weld penetration phenomena of stainless steel / K. Saito // Memoirs of Fukui university of technology. – 1995. – Vol. 25, Part I. – Pp. – 89-96.
12. Razmyshlyayev A.D. The effectiveness of the process of base metal penetration in wire submerged arc surfacing / A.D. Razmyshlyayev, M.V. Mironova // Welding Production. – 2011. – № 7. – Pp. 3-8. (Rus.)

Рецензент: В.И. Щетинина,
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 25.05.2016

УДК 621.793.7

© Григоренко Г.М.¹, Коржик В.Н.², Адеева Л.И.³, Туник А.Ю.⁴,
Степанюк С.Н.⁵, Карпец М.В.⁶, Дорошенко Л.К.⁷, Лютик Н.П.⁸, Чайка А.А.⁹

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОМ НАПЫЛЕНИИ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ СО СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКОЙ И НАПОЛНИТЕЛЯМИ В₄С и В₄С+ZrO₂

Проанализированы металлургические процессы взаимодействия, происходящие при плазменно-дуговом напылении между стальной оболочкой и карбидными наполнителями порошковых проволок В₄С и В₄С с добавкой наноразмерного порошка ZrO₂. В результате взаимодействия ферритной оболочки проволоки с наполнителями в модельных слитках образуются бориды железа, легированные углеродом, а ферритная матрица содержит боридные и карбоборидные эвтектики. Средняя микротвердость карбоборидов и матрицы высокая – 17,78; 16,40 и 8,69; 9,95 ГПа соответственно для слитков с В₄С и В₄С+ZrO₂. Наиболее качественные покрытия с низкой пористостью (~1%), ламелярной структурой, состоящей из ферритной матрицы, упрочненной дисперсными боридами Fe, были получены при большем тепловложении. Добавка 0,5% нанопорошка ZrO₂ ускоряет реакции образования дисперсных боридов железа, способствует их равномерному распределению в структуре и повышению микротвердости покрытия до 7,0 ГПа.

Ключевые слова: плазменно-дуговое напыление, порошковая проволока, карбидный наполнитель, нанопорошок, фазовые превращения, дисперсное упрочнение покрытий, бориды и бороцементит железа, микротвердость.

¹ академик, профессор, ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, office22@paton.kiev.ua

² д-р техн. наук, Гуандунский Институт сварки (Китайско-украинский Институт сварки им. Е.Ю.Патона), КНР; ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, ynkorzhzyk@qq.com

³ канд. техн. наук, ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, admila2016@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, allatunik@gmail.com

⁵ канд. техн. наук, ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, s.m.stepanyuk@gmail.com

⁶ д-р техн. наук, ИПМ им. И.М. Францевича, г. Киев, mkarpets@ukr.net

⁷ мл. науч. сотр., ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, allatunik@gmail.com

⁸ мл. науч. сотр., ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, allatunik@gmail.com

⁹ науч. сотр. ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев, vn@paton.kiev.ua