

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ ЗОНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

В. П. ИВАНОВ, Е. В. ЛАВРОВА

ГВУЗ «Приазовский гос. техн. ун-т». 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7.

E-mail: pstu.edu.oitzv@gmail.com

Исследовано влияние параметров режима наплавки на формирование зоны проплавления и определены способы управления и стабилизации процесса формообразования сварочной ванны. Разработаны модели формирования зоны проплавления для неподвижного и движущегося электродов. Расчетные зависимости определяли статистической обработкой результатов измерения параметров зон проплавления макрошлифов, полученных электродуговой наплавкой под флюсом для различных диаметров электрода и применяемых диапазонов скоростей подачи (силы тока) в зависимости от времени горения дуги и скорости ее перемещения. Полученные математические модели формирования зоны проплавления при электродуговой наплавке под флюсом использованы для разработки программного обеспечения и системы управления наплавочным оборудованием. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 9.

Ключевые слова: сварочная ванна, зона проплавления, математическая модель, управление процессом формирования сварочной ванны

Современное сварочное производство требует разработки адекватных моделей процессов, происходящих в сварочной ванне, средств автоматизированного проектирования, инженерного анализа и управления процессами наплавки (CAD–CAE–CAM).

Управление формированием сварочной ванны позволяет обеспечить качество сварного (наплавленного) шва при изменении параметров технологического процесса. В настоящее время разработаны технологии сварки и наплавки как проволочными [1, 2], так и ленточными электродами [3, 4], в которых повышение эффективности обеспечивается не стабилизацией параметров режима, а их изменением по определенным функциональным зависимостям.

При нанесении восстановительных и защитных слоев основное внимание уделяется формированию наплавленного слоя, в то время как основной функцией зоны проплавления является надежное сцепление слоев для сохранения общей работоспособности наплавленного изделия или инструмента. Увеличение зоны проплавления приводит не только к повышению себестоимости наплавки, но и к снижению рабочих свойств наплавленного слоя за счет его перегрева и увеличения доли основного металла в наплавленном.

Размеры зон наплавки и проплавления находятся в прямо пропорциональной зависимости от скорости подачи электрода при заданном типе и материале электрода, а также от условий его плавления [5, 6]. Управление формированием этих зон требует четкого понимания механизма и последовательности их образования и их взаимного влияния. Протекание этих процессов в жидкой фазе

обуславливает необходимость определения временных и скоростных характеристик движения фронта плавления как основу для построения математических моделей формирования шва.

Целью работы является исследование процесса формирования зоны проплавления при электродуговой наплавке под флюсом, определение эффективных способов управления параметрами этой зоны, а также создание технологии, оборудования и систем управления для реализации такой технологии.

В соответствии с поставленной задачей изучали динамику формирования зоны проплавления при наплавке неподвижным электродом под флюсами АН-60 и АН-348А пластин из малоуглеродистой стали (350×240×30 мм) на стальной подложке. Наплавку проводили проволочным электродом Св-08А (используемые диаметры проволоки и параметры режима наплавки приведены в таблице). Время горения дуги фиксировали с помощью таймера (от 5 до 10 образцов на каждом исследуемом интервале). После наплавки провели порезку образцов абразивным кругом таким образом, чтобы линия реза проходила по оси симметрии наплавленной точки. Шлифы обрабатывались 20%-ным раствором азотной кислоты для выявления зоны проплавления. На рис. 1 представлены образцы макрошлифов поперечных сечений швов при наплавке электродом 4 мм. После статистической обработки результатов замеров параметров зоны проплавления построены аппроксимационные полиномиальные зависимости ее развития при наплавке электродами различных диаметров и времени горения дуги (рис. 2).

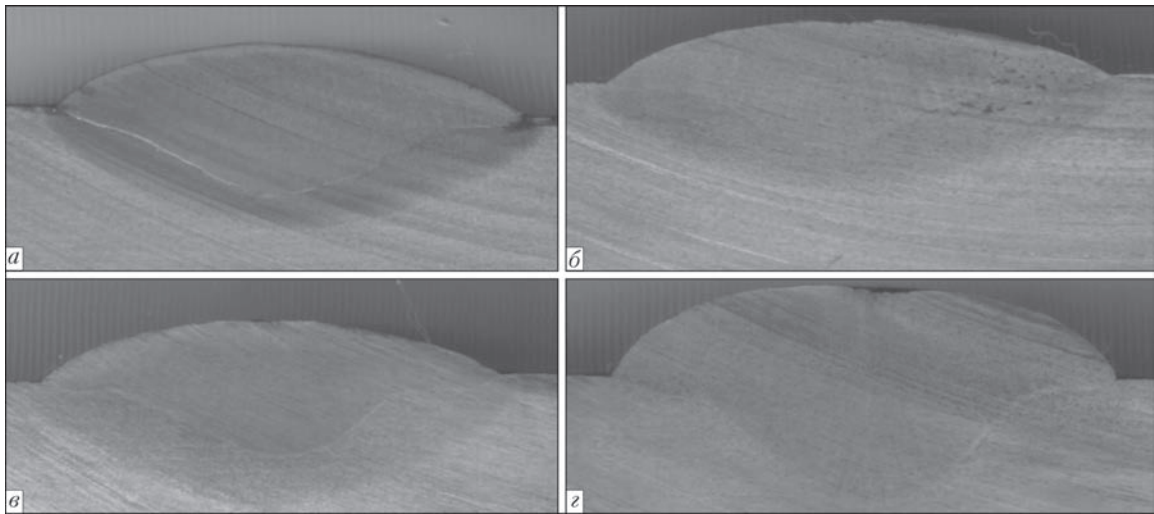


Рис. 1. Поперечные сечения наплавленных образцов при разном времени горения дуги, с: а — 2; б — 5; в — 7; г — 10 ($d_3 = 4$ мм; $I_H = 600 \dots 650$ А, $v_H = 33 \cdot 10^{-3}$ м/с, $U_d = 30 \dots 32$ В)

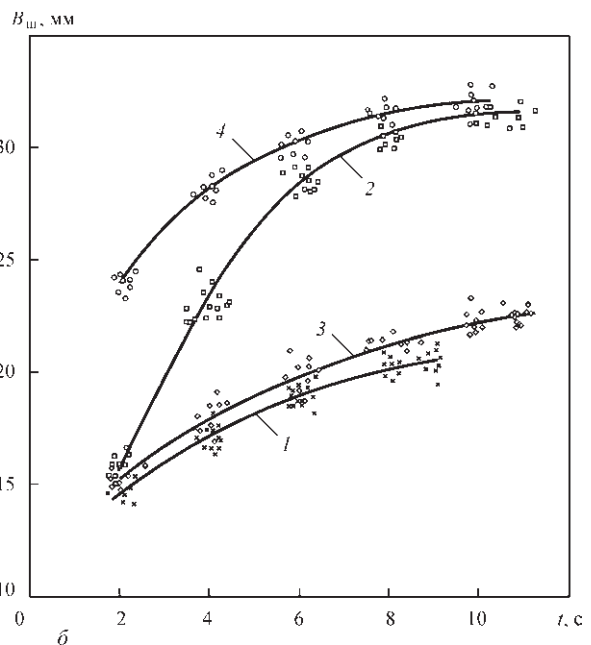
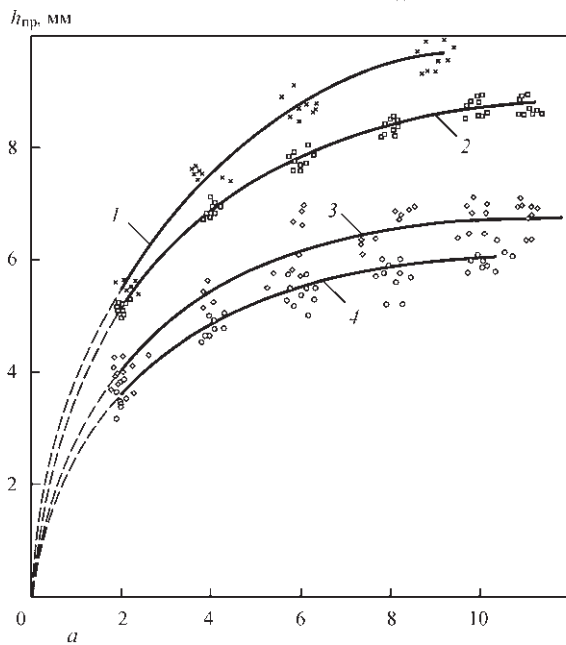


Рис. 2. Зависимость глубины зоны проплавления (а) и ширины шва (б) от времени горения дуги t : 1 — $d_3 = 3$ мм, $I_H = 550$ А, $U_d = 30$ В; 2 — $d_3 = 4$ мм, $I_H = 650$ А, $U_d = 32$ В; 3 — $d_3 = 4$ мм, $I_H = 550$ А, $U_d = 30$ В; 4 — $d_3 = 5$ мм, $I_H = 550$ А, $U_d = 30$ В

Обработку экспериментальных данных проводили методом множественного регрессионного анализа с отсеиванием переменных на уровне значимости $\alpha = 0,03$ при значении коэффициента корреляции $R = 0,96 \dots 0,97$. По результатам значений величин среднего отклонения выбраны полиномы третьей степени, показавшие достаточно хо-

рошую сходимость с результатами исследований. Дифференцированием данных функциональных зависимостей по времени получены модели изменения скорости роста зоны проплавления до ее кристаллизации в пределах используемого массива исходных данных. Исследование моделей роста зоны проплавления в каждом исследуемом интервале времени показало, что они могут быть обобщены функцией вида:

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

где $\bar{V}_i(\bar{x})$ — относительная скорость роста зоны проплавления для i -го интервала; \bar{x} — относительная координата точки фронта плавления; ε_i — коэффициенты, представляющие собой функ-

Диапазоны изменения параметров режима наплавки

d_3 , мм	Параметры режима наплавки			
	I_H , А	$v_H \cdot 10^3$, м/с	l , мм	U_d , В
1,6	180...300	22...50	20	26...30
2,0	210...390	22...46	25	26...30
3,0	280...550	14...40	30	28...32
3,5	300...600	15...36	30	30...34
4,0	400...700	15...32	40	30...34
5,0	500...800	15...28	45	30...36

Примечание. l — вылет электрода.

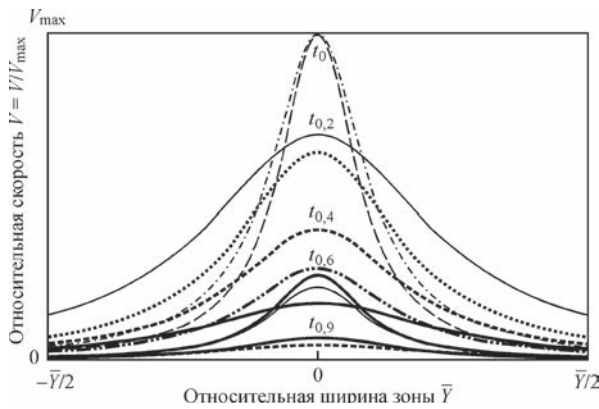


Рис. 3. Зависимости изменения относительной скорости движения фронта плавления основного металла: t_i — интервал времени формирования зоны проплавления, где i — доля цикла формирования

циональные зависимости от технологических параметров, где в качестве основных независимых переменных выступают скорость подачи электрода и его диаметр.

На рис. 3 представлены графики зависимостей относительной скорости движения фронта плавления (согласно зависимости, приведенной выше) в цикле его формирования, разбитого на 10 равных интервалов времени. На рис. 4 приведено сопоставление расчетных контуров зоны проплавления с данными измерения макрошлифов для фиксированных значений времени их формирования. Анализ полученных зависимостей показывает, что по истечении 60...80 % времени роста зоны проплавления профиль скоростей по сечению ванны выравнивается, и границы зоны проплавления увеличиваются во всех направлениях более равномерно, в то время как абсолютное значение скорости уменьшается до нуля. Это подтверждается и уменьшением величины расхождения между расчетными и экспериментальными данными в этом интервале времени (см. рис. 4). Сравнение профилей зоны проплавления показывает достаточно хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных, за исключением границы сплавления, что связано с отсутствием учета в модели превалирующих в этой зоне силовых факторов [7].

Распространение результатов расчета для неподвижного электрода на случаи, когда скорость его перемещения не равна нулю, предполагает ис-

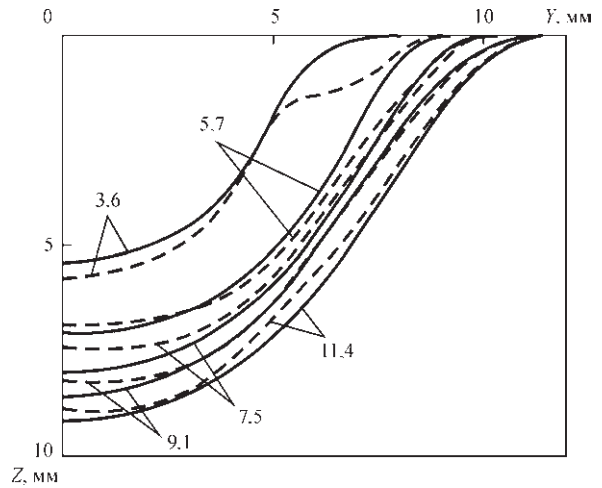


Рис. 4. Расчетные (сплошная кривая) и экспериментальные (штриховая) контуры сварочной ванны: $d_3 = 4$ мм, $I_H = 650...700$ А, $v_n = 42 \cdot 10^{-3}$ м/с, $U_d = 30...32$ В

пользование функциональной зависимости, связывающей время действия неподвижного источника в точке O со скоростью его движения. В случае перемещения электрода максимум проплавления находится на определенном расстоянии от оси электрода, поэтому максимальная глубина проплавления не совпадает с максимальным усилением, сумма которых и составляет высоту шва h после его кристаллизации. Это редко учитывается в расчетных схемах, поскольку передняя стенка сварочной ванны представляется как часть окружности с центром на торце электрода не только для неподвижного, но и для подвижного источника. Таким образом, параметром, определяющим степень асимметрии сварочной ванны, является значение скорости сварки, которое может служить основным входным параметром при решении задач анализа на недетерминированных моделях.

В качестве расчетной схемы для подвижного электрода (рис. 5) использовали схему перемещения квазистационарной зоны проплавления с радиусом R_0 , движущейся со скоростью $v_{св}$ и фиксируемой в моменты t_i (с шагом Δ) [8].

Текущее положение определяется точкой O' , в которой формируется стационарная зона проплавления радиусом r_i . Шаг Δ_i определяет время t' , за которое фронт плавления достигают области, ограниченной радиусом R_0 . Предполагается, что по истечении шага по времени t' начинается

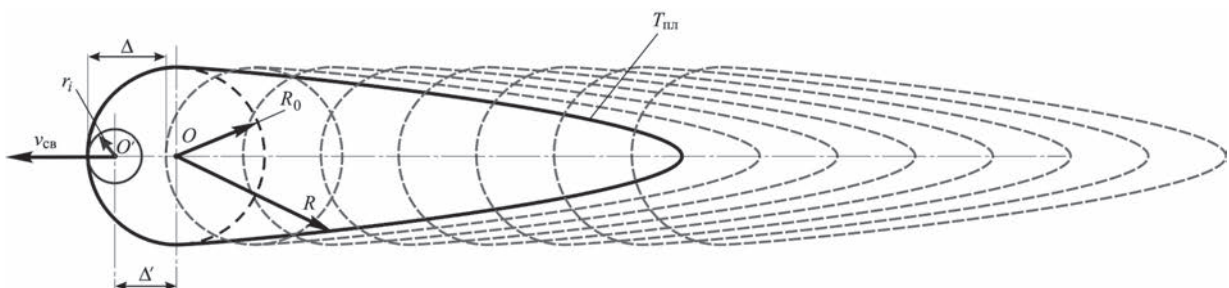


Рис. 5. Расчетная схема для определения размеров сварочной ванны в случае перемещения электрода со скоростью сварки

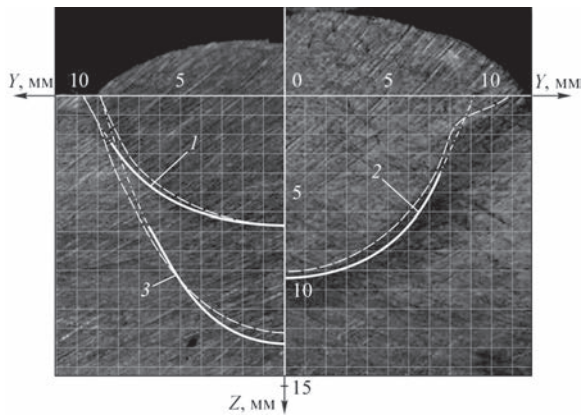


Рис. 6. Зависимость формы проплавления от скорости подачи (мм/с) проволочного электрода диаметром 4 мм: 1 — 25; 2 — 33; 3 — 44

кристаллизация сварочной ванны данного контура, ограниченного изотермой $T_{пл}$, и источник перемещается на шаг Δ . В качестве условия оптимизации процесса использовалось условие $\Delta' = \Delta$, т.е. в данном случае обеспечивается условие максимальной зоны проплавления при данной мощности источника тепла. В этом случае обеспечивается минимальный расход энергии при заданных параметрах шва, т.е. для уменьшения размеров глубины проплавления и доли участия основного металла оптимизационное условие выглядит следующим образом: $\Delta' = \beta\Delta$, где β — коэффициент, зависящий от технологических условий [8].

Обобщение результатов исследований для случая движущегося электрода позволяет сделать вывод, что эффективного управления формированием зоны проплавления при электродуговой наплавке можно достичь за счет изменения двух параметров — скорости подачи электрода и скорости перемещения дуги. Так, на рис. 6 представлена зависимость глубины зоны проплавления от скорости подачи v_0 при автоматической электродуговой наплавке проволочным электродом ($v_{св} =$

$= 15$ м/ч). Для сравнения приведены макрошлифы для значений силы тока, А: 550 (1), 680 (2) и 750 (3) (зона проплавления выделена штриховой линией). По приведенным данным можно сделать вывод, что ширина зоны проплавления практически не зависит от v_0 , некоторое ее уменьшение, по-видимому, связано с изменением размера эффективной зоны нагрева при увеличении скорости подачи (силы тока) за счет сжатия столба дуги и углубления ее в основной металл.

Разработанные модели позволяют количественно определять влияние изменения скорости подачи электрода по определенному закону на формирование зоны проплавления. В этом случае функция изменения скорости v_s используется в качестве аргумента системы уравнений для расчета скорости движения фронта плавления. Данная методика послужила основой для создания САЕ-модуля проектирования технологического процесса наплавки (рис. 7), обеспечивающего оптимизацию параметров режима с учетом варианта технологии и применяемых сварочных материалов. В состав модуля входит блок расчета параметров наплавленного слоя переменного химического состава при расплавлении в общей ванне двух электродов различного химического состава. При этом производится расчет скоростей подачи электродов исходя из заданного закона изменения концентрации легирующих элементов на участке перехода в случае квазистационарного состояния ванны.

Разработана система управления процессом наплавки (рис. 8), использующая расчетные значения параметров скорости подачи и перемещения электрода для формирования управляющих сигналов на приводы оборудования наплавочной установки (рис. 9). Система управления представляет собой программно реализованную схему фазоимпульсного управления тиристорами. Кнопка-

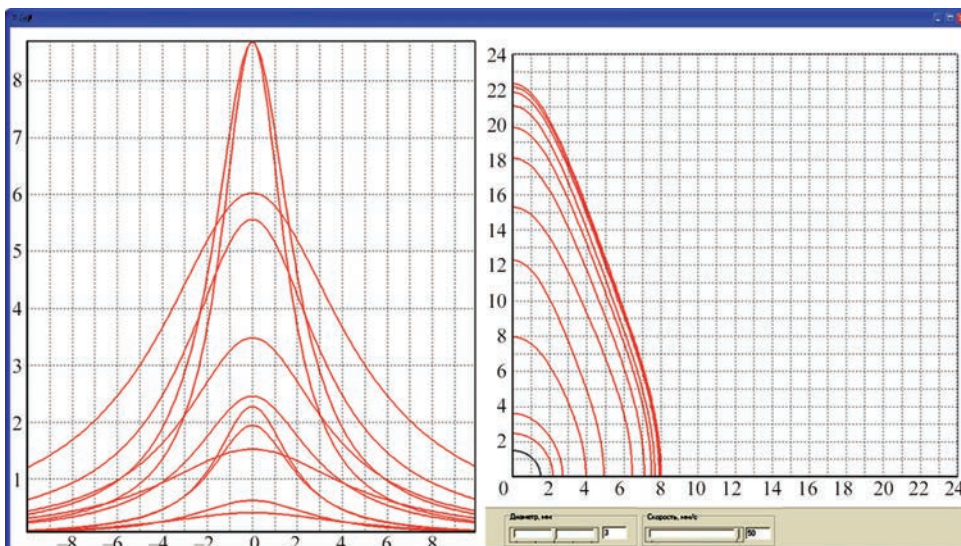


Рис. 7. Модуль расчета параметров зоны проплавления

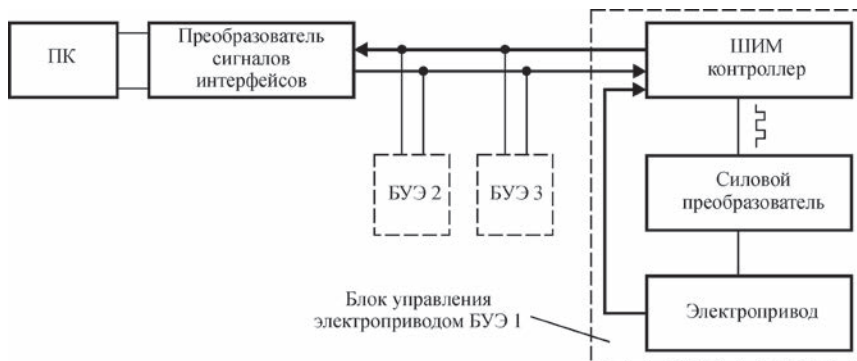


Рис. 8. Блок-схема системы управления процессом наплавки

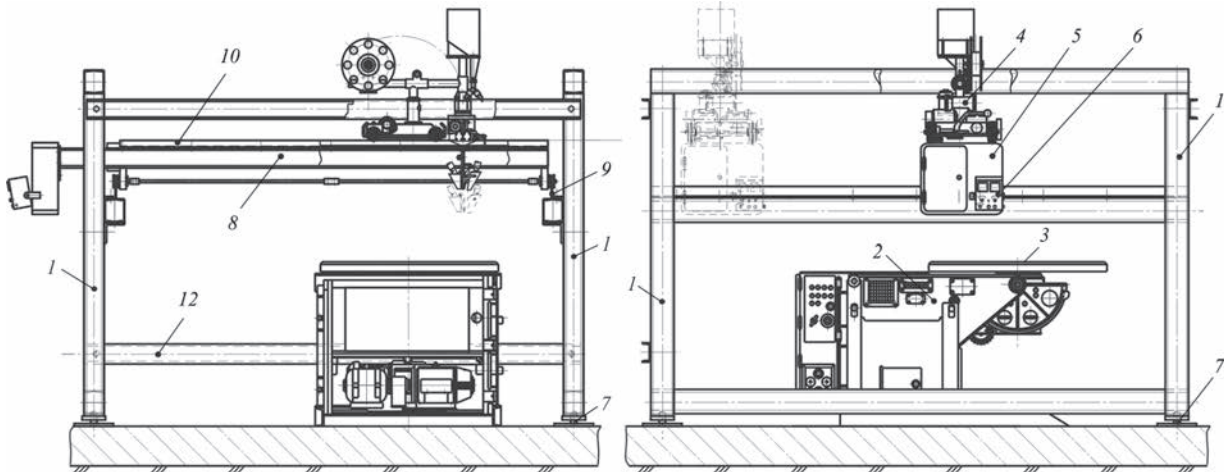


Рис. 9. Схема установки для наплавки

ми «больше–меньше» можно управлять моментом включения тиристоров. Запись состояния системы управления происходит в энергонезависимую память процессора и при последующих включениях аппарата происходит считывание из памяти последнего записанного состояния. Двигатели подачи и перемещения электрода и изделия управляются ШИМ, причем временная задержка включения двигателей также осуществляется программно, а торможение при выключении происходит с помощью реле.

Стенд для наплавки имеет блочно-модульную конструкцию (см. рис. 9). Каркас стенда состоит из четырех колонн 1 на регулируемых опорах 7 и шести продольных балок 12, причем средние балки имеют разъемное соединение с колоннами (на болтах) и могут быть установлены с определенным шагом по высоте относительно наплавляемого изделия. На этих балках установлены направляющие 9 для перемещения вдоль стенда рамы 8 со сварочным трактором 4. Балки рамы выходят за габариты каркаса стенда, поскольку на них установлено оборудование для управления процессом наплавки — шкаф 5 и съемный пульт управления 6, который соединен со шкафом и манипулятором 2 и с планшайбой 3 гибкими кабелями.

Все конструктивные элементы каркаса, а также балки рамы имеют одинаковое сечение коробчатой конструкции, сваренной из двух гнутых швел-

леров. Устойчивость каркасу придают поперечные связи, изготовленные из швеллеров.

Поскольку поперечные связи являются съемными, а направляющие передвижной рамы могут быть удлинены, размеры каркаса могут быть легко изменены в зависимости от размеров наплавляемых изделий. Поперечное перемещение осуществляется приводом сварочного трактора. Для этого на раме 8 установлены направляющие 10.

Выводы

1. Проведены исследования влияния параметров режима наплавки на развитие зоны проплавления при электродуговой наплавке под флюсом для неподвижной и движущейся дуги. Установлено, что зависимости изменения скоростей плавления для всего интервала ее роста могут быть выражены обобщенной моделью (формула). Для случая движущегося со скоростью сварки электрода расчет по разработанной модели производится с условием перемещения стационарной зоны проплавления, фиксируемой в моменты t_i с шагом Δ по координате перемещения.

2. На основании результатов исследований разработаны математические модели динамики зоны проплавления. В качестве исходных параметров приняты скорость подачи и скорость перемещения электрода. Разработаны программное обеспе-

чение, оборудование и система управления, позволяющие обеспечить управление формированием наплавленного слоя при изменении параметров технологического процесса наплавки.

1. Патон Б. Е. Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б. Е. Патон, В. А. Лебедев // Сварочное производство. – 2002. – № 2. – С. 24–31.
2. Шаферовский В. А. Способ электродуговой сварки толстолистового металла под флюсом с программированием параметров режима / В. А. Шаферовский, А. Н. Серенко // Сварка и родственные процессы в промышленности. Доклады 2-го научно-технического семинара (17 апреля 2007 г., г. Киев, Украина). – К.: Екотехнологія, 2007. – С. 8–11.
3. Ivanov V. P. Improving the Efficiency of Strip Cladding by the Control of Electrode Metal Transfer / V. P. Ivanov, E. V. Lavrova // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 266–269.
4. Иванов В. П. Исследование процесса управляемого механического переноса при наплавке двумя ленточными электродами / В. П. Иванов, Е. В. Лаврова, Ю. А. Степнова // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Збірник наукових праць. – Краматорськ: Донбас. держ. машинобуд. академія. – 2015. – № 3(18Е) – С. 102–107.
5. Kiyohara M. Melting characteristics of a wire electrode in the MIG-welding of aluminium / M. Kiyohara, H. Y. Yamamoto, S. Harada // Arc physics and weld pool behaviour. – London, 1979. – Paper 26. – P. 165–175.
6. Killing R. Günstige Strom-spannungsreiche beim MIG-/MAG-impulslicht-bogenschweißen von Stahl und Aluminium unter verschiedenen Schutz Gasen / R. Killing // DVS Bericht. – 1991. – № 131. – S. 15–21.
7. Lu S. Marangoni convection and welding penetration in A-TIG welding / S. Lu, F. Hidetoshi, H. Sugiyama [et al.] // Transactions of JWRI. – 2003. – Vol. 32, № 2. – P. 79–82.
8. Иванов В. П. Повышение эффективности процесса электродуговой наплавки управлением гидродинамической сварочной ванны / В. П. Иванов // Вісник Призовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки: Збірник наукових праць. – Мариуполь: ГВУЗ «Призов. держ. техн. ун-т». – 2013. – № 26 – С. 150–160.

Поступила в редакцию 11.05.2016

XV МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2016

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ

22–25 НОЯБРЯ



МЕТАЛЛО-ОБРАБОТКА



УКРАИНА ИТ



УКРЕНЕРДЖИ



УКРАИНА ТРАНСПОРТ



УКРАИНА ГАЗ



УКРАИНА АВТОМАТИЗАЦІЯ



УКРАИНА БЕЗПЕКА



УКРАИНА ЛОГІСТИКА



УКРАИНА СТАНДАРТИ



УКРАИНА БЕЗПЕКА



УКРАИНА ВУГІЛЛЯ




ОРГАНИЗАТОР:
Международный выставочный центр

Генеральный
информационный партнер:



Технический
партнер:





Международный выставочный центр
Украина, 02660, Киев
Броварской пр-т, 15
М "Левобережная"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56
e-mail: maria@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr
www.tech-expo.com.ua