

ТЕХНОЛОГИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТИГ-СВАРКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Л. М. ЛОБАНОВ, Е. В. ШАПОВАЛОВ, П. В. ГОНЧАРОВ, В. В. ДОЛИНЕНКО,
А. Н. ТИМОШЕНКО, Т. Г. СКУБА

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Предложен подход к созданию технологии сварки ТИГ элементов конструкций сложной геометрической формы из нержавеющей стали при помощи робототехнической адаптивной системы, которая позволяет адаптироваться к изменению формы поверхности свариваемых изделий в процессе сварки и минимизации вероятности появления дефектных сварных соединений и цветов побежалости на поверхности изделия. Разработана технология роботизированной сварки неплавящимся электродом углового соединения тонколистовых элементов конструкций из нержавеющей стали марки АiSi 304, 210, 430 с толщиной соединяемых листов от 0,8 до 1,5 мм. Результаты сварочных экспериментов показали, что разработанные алгоритмы взаимодействия между техническими средствами адаптации могут быть использованы в системах автоматического управления процессом сварки ТИГ. Библиогр. 5, табл. 2, рис. 10.

Ключевые слова: сварка ТИГ, нержавеющая сталь, сложная геометрическая форма, робототехническая адаптивная система, угловые соединения, тонколистовая конструкция

В данной статье предложен подход к созданию технологии сварки ТИГ элементов конструкций сложной геометрической формы из нержавеющей стали при помощи робототехнической адаптивной системы, которая позволяет адаптироваться к изменению формы поверхности свариваемых изделий в процессе сварки и минимизации вероятности появления дефектных сварных соединений и цветов побежалости на поверхности изделия.

Известно, что для обеспечения качественного сварного соединения с требуемыми геометрическими характеристиками шва необходимо [1–3]:

- обеспечение постоянства высоты дуги;
- контроль за наклоном сварочной горелки относительно изделия (угол наклона) и положение сварочной горелки при прохождении углов и закруглений;
- постоянство сварочных параметров во время выполнения сварки или их изменение при возникновении таких требований.

Перспективным направлением для поддержания вышеизложенных технологических требований является использование адаптивной робототехнической системы. Такая система должна обеспечивать сканирование сварного стыка, его состояние сборки и иметь связь с источником сварочного тока, позволяя выполнять коррекцию режима сварки в определенных местах сварного стыка. Это может быть как регулировка сварочного тока, так и применение специальных режимов сварки (например импульсный ток), возможность подачи присадочной сварочной проволоки. Определенно адаптивная робототехническая система может как реализовать сложный алгоритм изме-

нения технологических параметров сварки, так и осуществлять контроль за траекторией движения и положения сварочной горелки.

Адаптивная робототехническая система должна включать две подсистемы: геометрическая адаптация и технологическая адаптация. Написание программы управления роботом для реализации задачи геометрической адаптации состоит из нескольких шагов:

- задание системы координат инструмента «tool frame»;
- задание пользовательской системы координат (рабочего стола) «user frame»;
- планирование траектории перемещения сварочной горелки вдоль стыка свариваемых деталей;
- задание параметров режима сварки для различных толщин свариваемых пластин из нержавеющей стали.

По умолчанию система координат инструмента привязана к центру фланца на последнем звене робота (рис. 1). Эта позиция называется «tool center point» (ТСП). Для выполнения процесса сварки необходимо изменить позицию ТСП в соответствии с конфигурацией реальной модели сварочной горелки. ТСП сварочной горелки для сварки МИГ — это кончик сварочной проволоки; для сварки ТИГ — кончик вольфрамового электрода.

Для задания системы координат инструмента используем метод по 6-ти точкам. Данный метод основывается на использовании дополнительного приспособления в виде иголочки, закрепленной, например, на рабочем столе. Оператор в процессе идентификации подводит горелку под разными

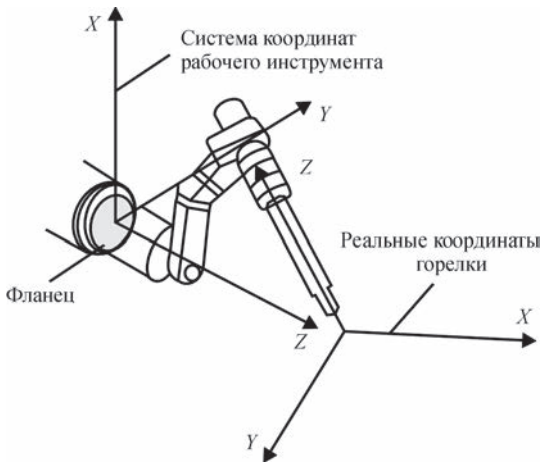


Рис. 1. Система координат рабочего инструмента (сварочной горелки)

углами (рис. 2) к кончику иглы и последовательно запоминает три конфигурации робота. Далее подводит робот к кончику иглы с такой ориентацией горелки, чтобы ее ось совпала с осью иглы и запоминает 4-ю точку. Перемещает по координате «X» и «Z» или «Y» и «Z» и запоминает 5-ю и 6-ю точки. В результате последующих расчетов получаем положение конца электрода и его ориентацию в 3D пространстве.

Все измерения будем выполнять в пользовательской системе координат. Это означает, что координаты узловых точек траектории сварки будут отсчитываться относительно начальной точки рабочего стола, указанной при идентификации «user frame».

Планирование траектории выполняется либо в пакете 3D-моделирования, либо с помощью пульта оператора «Teach Pendant». Оператор последовательно подводит сварочную горелку к точке начала сварки, промежуточным точкам стыка свариваемых деталей, окончания сварки и сохраняет координаты этих точек в программном коде управления роботом. Кроме координат точек траектории сварки сохраняется дополнительная информация об ориентации горелки и конфигурации робота в каждой узловой точке траектории.

Спланированная траектория может без изменений использоваться для партии изделий одной мо-

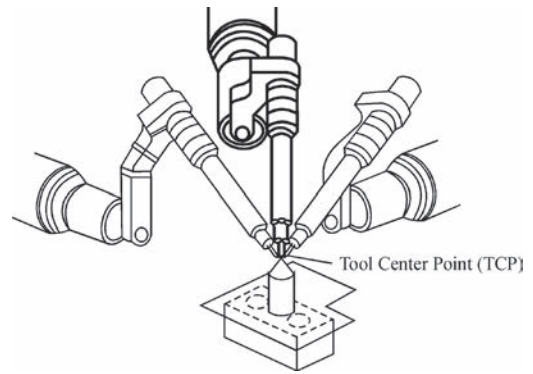


Рис. 2. Ориентация горелки в процессе идентификации системы координат инструмента

дификации. Однако по окончании процесса сварки, извлечения изделия из оснастки и установки нового изделия, положение его может измениться. Для компенсации пространственного положения изделия перед запуском цикла сварки необходимо выполнить процедуру автоматического обнаружения изделия. Такая процедура может быть выполнена с помощью датчика касания. Так, например, у Fanuc Corporation эта функция называется «ARC START HEIGHT ADJUST». Алгоритм работы данной функции представлен на рис. 3.

После создания программы управления роботом (планирования траектории) и задания параметров режима сварки можно запускать цикл сварки. Однако сварка неплавящимся электродом по жесткой траектории без каких-либо средств адаптации в процессе сварки не гарантирует требуемого качества сварного шва. Возмущающими факторами являются погрешности в изготовлении оснастки, которые приводят к изменениям положения стыка после выполнения операции смены изделия. Также положение стыка может изменяться в процессе сварки под действием тепловой деформации.

Для обеспечения требуемого качества сварки применяются дополнительные сенсоры, которые адаптируют траекторию перемещения робота к траектории стыка (сварного шва). Одним из таких сенсоров, который применялся в процессе проведения сварочных экспериментов, является дуговой сенсор и метод «Automatic Voltage Control» (AVC) — автоматическое управление напряжением (рис. 4) для обеспечения постоянства энергетических параметров режима сварки.

AVC может быть подвержен воздействию возмущающих факторов:

- изменение типа электрода или его диаметра;
- изменение положения электрода по отношению к сварочной ванне в результате действия сварочных тепловых деформаций;



Рис. 3. Алгоритм работы функции подстройки горелки по высоте

- изменение состава защитного газа;
- изменение параметров колебаний (частота, время остановок в узлах);
- состояние поверхности свариваемых изделий.

AVC позволяет отслеживать сварной шов путем мониторинга напряжения. Типичное применение AVC — слежение по вертикали с целью стабилизации напряжения на дуге U_d за счет управления высотой перемещения горелки Z от поверхности сварочной ванны ($U_d = f(Z)$). Информация, полученная при помощи AVC, позволяет корректировать траекторию робота в соответствии с положением реального сварного шва. Если сварной шов опускается ниже по отношению к соплу, то напряжение на дуге возрастает и необходимо опустить сварочную горелку. В противном случае, если сварной шов поднимается по отношению к соплу, то напряжение на дуге уменьшается и необходимо поднять сварочную горелку.

В результате поддерживается заданное значение длины дуги и таким образом обеспечивается постоянство ширины сварного шва.

AVC может использоваться при сварке с колебаниями поперек шва. В этом случае реализуется адаптация к положению стыка в горизонтальной плоскости. Если необходимо применение колебаний, то форма их должна быть синусоидальной (SINE). AVC может использоваться при перемещениях сварочной горелки как по линейной, так и круговой траектории.

Сварка изделий из листов нержавеющей стали малой толщины (до 1,2 мм) сопровождается несколькими факторами, оказывающими существенное влияние на качество сварного шва и его внешний вид. Такими факторами являются сварочные тепловые деформации и возникновение оксидной пленки на поверхности свариваемой конструкции. Первый фактор приводит к возникновению дефектов в виде прожогов или непроваров сварного шва. Второй фактор приводит к появлению радужных цветов побежалости на поверхности

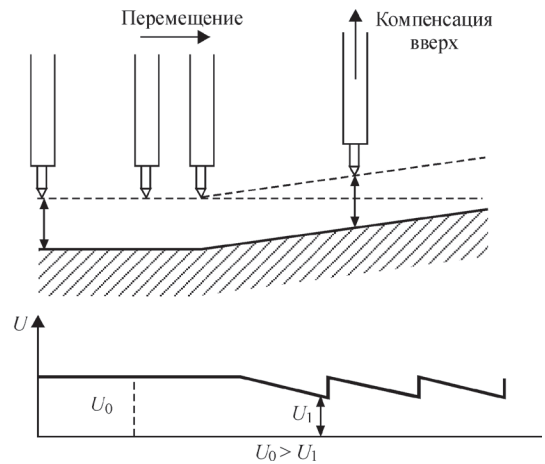


Рис. 4. Метод автоматического управления напряжением на дуге

металла. Оксидная пленка ухудшает внешний вид изделия и также считается браком.

В данной работе AVC применяется для роботизированного процесса сварки ТИГ элементов конструкций сложной геометрической формы. Конструкция изделия подразумевает выполнение углового соединения, толщина соединяемых элементов 0,8...1,5 мм из нержавеющей стали AiSi 304, 210, 430. Для выполнения данного типа соединения с получением требуемых характеристик сварного шва сварку ТИГ выполняли с использованием импульсного тока, устанавливался «+» на электроде (обратная полярность), без присадочной проволоки.

В качестве неплавящегося электрода применялись вольфрамовые электроды марки ЭВТ-15, ЭВЛ-20 (ГОСТ 23949) диаметром 2,4 и 3,2 мм. Для улучшения стабильности горения дуги электрод заточен на конус. Форма заточки представлена на рис. 5. Заточку вольфрамовых электродов рекомендуется выполнять специализированными станками.

В качестве защитного газа применяли аргон высшего сорта по ГОСТ 10157 или его смеси с водородом: Ag + 2,5 % Н, Ag + 5 % Н.

Таблица 1. Сварное угловое соединение У4 по ГОСТ 14771–76

Конструктивные элементы		s	b		n	e		g	
подготовленных кромок свариваемых деталей	шва сварного соединения		Номинальное	Предельное отклонение		Номинальное	Предельное отклонение	Номинальное	Предельное отклонение
		0,8...1,4	0	+0,5	0...0,5s	3	±1	0	+1,0
		1,5...2,0				5			

Примечание. Условное обозначение сварного соединения У4, способ сварки — ИН.

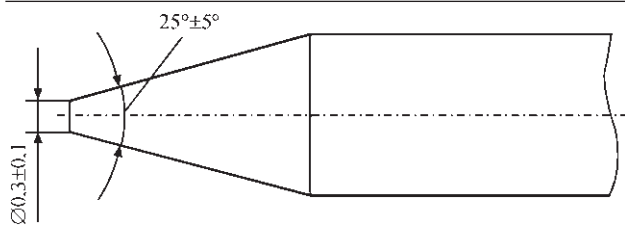


Рис. 5. Форма заточки вольфрамового электрода

Предварительный подогрев и послесварочная термообработка в основном не требуется.

По данной технологии производится сварка углового соединения отбойника торгового оборудования. Геометрические характеристики углового соединения У4 по ГОСТ 14771–76 приведены в табл. 1.

Для автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом свариваемые кромки подготавливаются механическим способом, в том числе с использованием специализированных станков подготовки кромок. Угол разделки кромок равен $90 \pm 1^\circ$. При сварке разнотолщинных соединений разделка кромок для соединяемых элементов не изменяется, что связано с толщинами свариваемых заготовок (0,8...1,5 мм).

Перед сваркой производилась подготовка заготовок: устранялись задиры на кромках методом шлифовки. Механическая обработка выполнялась таким образом, чтобы не возникали впадины на кромке заготовки более 30 % ее толщины. Также выполнялось обезжиривание кромок перед сваркой поверхности металла на расстоянии не менее 40 мм от свариваемых кромок спиртом, ацетоном, авиационным бензином, уайт-спиритом или другими растворителями.

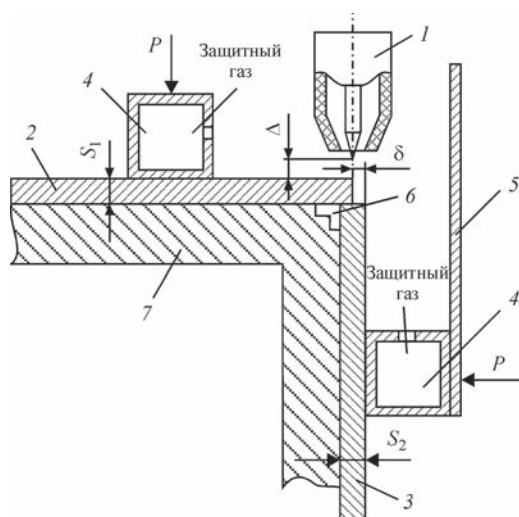


Рис. 6. Схема сборки элементов конструкции перед сваркой углового соединения: 1 — сварочная горелка; 2, 3 — свариваемые заготовки; 4 — газовый канал, для защиты внешней стороны изделия; 5 — защитный экран; 6 — газовый канал, для защиты обратной стороны шва изделия; 7 — силовая часть оснастки

Сборка элементов конструкции в сборочно-сварочной оснастке выполнялась в соответствии с рис. 6. Наложение верхнего листа 2 на нижний 3 выполняется с перекрытием половины толщины δ второго. Выполнение этого условия необходимо для получения равномерного по наплыву сварного шва. Также необходимо обеспечить прижатие заготовок к сборочно-сварочной оснастке с усилием, обеспечивающим устранение зазоров между листами заготовок и сборочной оснасткой (значение усилия прижатия в пределах $P = 300...500$ Н в зависимости от свариваемых толщин металла). Для обеспечения плотного прилегания заготовок к оснастке и обеспечения необходимого теплоотвода прижатие осуществляется равномерным распределением усилия по плоскости прижимных планок.

Сборку изделия при невозможности обеспечения точности установки заготовок согласно схеме выполнения углового соединения необходимо выполнить прихватками ручной аргонодуговой сваркой с обратной стороны углового соединения без полного проплавления. Такая постановка прихваток позволит вести сварку в автоматическом режиме без возмущений процесса при прохождении через них сварочной дуги.

Траектория перемещения сварочной горелки должна быть такой, чтобы кончик вольфрамового электрода был на краю кромки верхнего листа, как показано на рис. 6. Величина дугового промежутка между электродом и изделием устанавливается и поддерживается в процессе сварки равной 1,5 мм с помощью технологии AVC для всех типов свариваемых материалов и толщин.

Для получения сварного соединения без цветов побежалости (рис. 7) обеспечивается защита зоны сварки и участка изделия, нагретого до температуры 200°C . Для этого выполняется зональная защита, защитный газ подается в область сварки и область, нагретую до 200°C . Также для защиты обратной стороны шва газ подается в канавку оснастки 6, показанную на рис. 7. Расход газа устанавливается на расходомере в количестве, обе-



Рис. 7. Сварной образец углового соединения без цветов побежалости после аргонодуговой сварки в автоматическом режиме

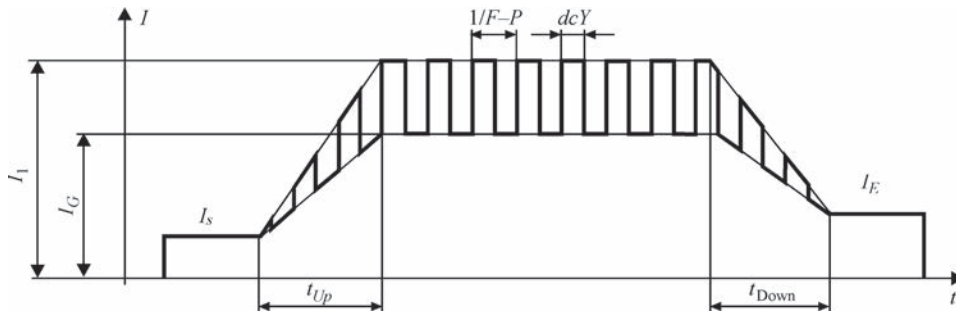


Рис. 8. Циклограмма импульсного сварочного тока при сварке ТИГ: I_S — стартовый ток; I_E — ток окончания сварки; t_{Up} — нарастание тока; t_{Down} — спад тока; $F-P$ частота импульса ($1/F-P$ — интервал времени между двумя импульсами); dcY — рабочий цикл; I_G — базовый ток; I_1 — основной ток

спечающим 6...8 л/мин для защиты обратной стороны шва, и 10...12 л/мин для внешней стороны сварного шва.

Использование импульсной дуги позволяет расширить возможности сварки неплавящимся электродом [1, 3–5]. Таким образом, скорость и количество вводимой в изделие теплоты определяются режимом пульсации дуги, который, в свою очередь, устанавливается по определенной программе в зависимости от свойств свариваемого материала, его толщины, пространственного положения шва и тому подобного. При сварке неплавящимся электродом импульсная дуга предназначена для регулирования процесса проплавления основного металла и формирования шва, при сварке плавящимся электродом — для регулирования процесса расплавления и переноса электродного металла [1, 3].

В данной работе сварка выполнялась импульсной дугой с частотой $F = 1$ кГц, длительность импульса и паузы составляла по 50 % от общего периода. Базовый ток составлял 10 % от основного установочного тока. Длительность нарастания и спада сварочного тока $t_{Up}, t_{Down} = 1,5$ с. Циклограмма импульсного сварочного тока приведена на рис. 8.

Начало и окончание автоматической аргодуговой сварки углового соединения выполняется на входных и выводных планках для получения на основном изделии бездефектного сварного соединения. Размеры входных и выводных планок должны соответствовать длительности выхода на режим сварки. Длина входной и выводной планки составляет 30...40 мм.

Скорость сварки устанавливается в модуле управления роботизированным комплексом и должна составлять для свариваемых толщин металла 36 м/ч (1 мм/с). На рис. 9 приведена схема ведения сварочной горелки по стыку. Сварочная горелка в процессе сварки не должна отклоняться от заданной траектории более чем на $\pm 0,2$ мм.

Для повторяемости качества сварных соединений роботизированная аргодуговая сварка непла-

Таблица 2. Режимы автоматической аргодуговой сварки углового соединения из тонколистовой нержавеющей стали

Толщина соединяемых заготовок $S_1 + S_2$, мм	Сварочный ток $I_{св}$, А	Напряжение U_d , В
0,8 + 0,8	100	9,0
0,8 + 1,0	105	9,2
0,8 + 1,2	115	9,5

вающимся электродом должна выполняться в помещении с контролируемой цеховой температурой. Приведенные сварочные режимы (табл. 2) получены при температуре в помещении 18...22 °С. Если происходит перепад температуры в помещении, где осуществляется сварка, более чем на ± 15 °С, необходимо провести корректировку параметров режима сварки.

С целью изучения влияния технологических режимов сварки на структуру металла шва был проведен макроанализ сварного соединения. Проведенный металлографический анализ углового сварного соединения нержавеющей стали АiSi 304, 210, 430, выполненного по разработанной

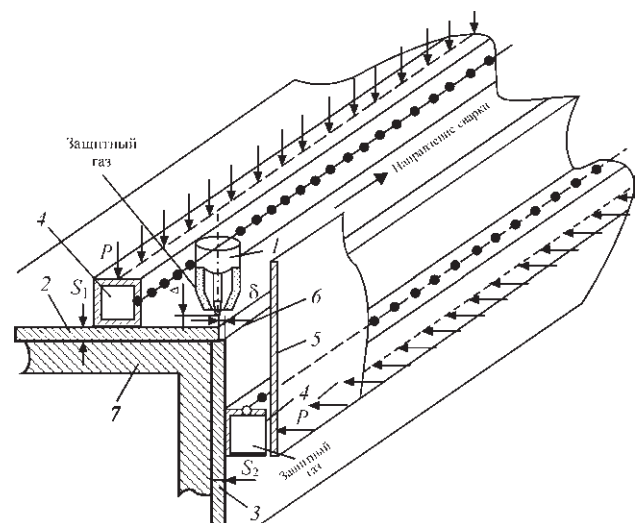


Рис. 9. Схема ведения сварочной горелки по стыку: 1 — сварочная горелка; 2, 3 — свариваемые заготовки; 4 — газовый канал для защиты внешней стороны изделия; 5 — защитный экран; 6 — газовый канал для защиты обратной стороны шва изделия; 7 — силовая часть оснастки

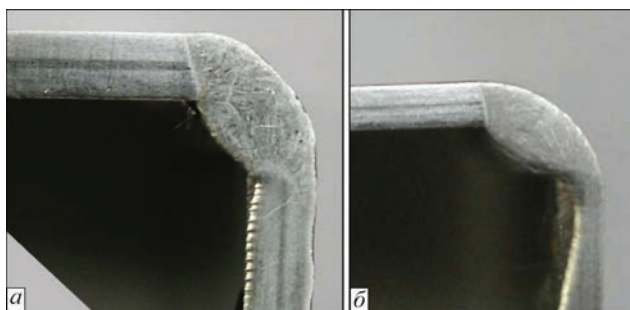


Рис. 10. Макроструктура углового сварного соединения из нержавеющей стали AISi 304 толщиной 1,2 мм (а) и AISi 201 толщиной 0,8 мм (б)

технологии импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом с полным проплавлением, выявил некоторые особенности. Как показано на рис. 10, сварной шов имеет цельную литую структуру с плавным переходом от горизонтальной пластины к вертикальной без наплывов, а также отсутствуют видимые дефекты такие, как поры, трещины, нарушения целостности шва. Такие результаты по геометрии сварного шва позволяют заключить, что разработанная технология роботизированной сварки ТИГ нержавеющей стали толщиной 0,8...1,5 мм может быть использована при изготовлении изделий из нержавеющей стали с обеспечением качественного сварного шва с требуемыми прочностными характеристиками, внешним видом и цветом, аналогичным цвету основного металла.

Результаты сварочных экспериментов показали, что разработанные алгоритмы взаимодействия между техническими средствами адаптации могут быть использованы в системах автоматического управления процессом сварки ТИГ.

Список литературы

1. Савинов А. В., Лапин И. Е., Лысак В. И. (2011) *Дуговая сварка неплавящимся электродом*. Москва, Машиностроение.

2. FANUC Robotics America Corporation. (2013) *FANUC Robotics SYSTEM R-30iB ArcTool Setup and Operations Manual*, Document ID: MAROBAR8203131E, REV A, Version 8.20 series.
3. Сливинский А. А., Жданов Л. А., Коротенко В. В. (2015) Теплофизические особенности импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах. *Автоматическая сварка*, **11**, 32–38.
4. Тимошенко А. Н., Гвоздецкий В. С., Лозовский В. П. (1978) Концентрация энергии на аноде дуги неплавящегося электрода. *Автоматическая сварка*, **5**, 68–70.
5. Дудко Д. А., Шнайдер Б. И., Погребницкий Д. М. (1977) Допустимые зазоры при импульсно-дуговой сварке торцевых соединений металлов малых толщин. *Сварочное производство*, **5**, 27–31.

Л. М. Лобанов, С. В. Шаповалов, П. В. Гончаров,
В. В. Долиненко, О. М. Тимошенко, Т. Г. Скуба

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ТЕХНОЛОГІЯ РОБОТИЗОВАНОГО ТІГ-ЗВАРЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ

Запропоновано підхід до створення технології зварювання ТІГ елементів конструкцій складної геометричної форми з нержавіючої сталі за допомогою робототехнічної адаптивної системи, яка дозволяє адаптуватися до зміни форми поверхні виробів, що зварюються в процесі зварювання і мінімізації ймовірності появи дефектних зварних з'єднань і кольорів мінливості на поверхні виробу. Розроблено технологію роботизованого зварювання неплавким електродом, кутового з'єднання тонколистових елементів конструкцій з нержавіючої сталі марки AISi 304, 210, 430 з товщиною листів, що з'єднуються від 0,8 до 1,5 мм. Результати зварювальних експериментів показали, що розроблені алгоритми взаємодії між технічними засобами адаптації можуть бути використані в системах автоматичного управління процесом зварювання ТІГ. Бібліогр. 5, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: зварювання ТІГ, нержавіюча сталь, складна геометрична форма, робототехнічна адаптивна система, кутові з'єднання, тонколистова конструкція

Поступила в редакцію 24.04.2017

Науково-практична конференція «СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА»

22-23 листопада 2017 р.

Міжнародний виставковий центр, Київ

Тематика конференції:

- ◆ розвиток прогресивних зварювальних процесів;
- ◆ нові зварювальні матеріали та обладнання;
- ◆ проблеми і тенденції автоматизації зварювальних та споріднених процесів;
- ◆ впровадження прогресивних технологій при виготовленні та ремонті металоконструкцій;
- ◆ стандартизація та сертифікація в зварювальному виробництві;
- ◆ підготовка кадрів та організація конкурсів професійної майстерності;
- ◆ проблеми екології;
- ◆ розвиток міжнародного співробітництва.

Свої пропозиції та тези доповідей просимо направляти до 1 серпня: maksimov@paton.kiev.ua