

СОЗДАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ГИБРИДНОЙ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Н. КОРЖИК^{1,2}, В. Н. СИДОРЕЦ^{1,2}, ШАНГУО ХАН¹,
А. А. БАБИЧ^{1,2}, А. А. ГРИНЮК^{2,3}, В. Ю. ХАСКИН^{1,2}

¹Гуандунский Институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е. О. Патона).
510650, Китай, Гуанчжоу, Тяньхе, ул. Чапкиннг, 363.

²ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
³НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37

Целью данной работы является создание комплекса оборудования и технологии гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с коаксиальной подачей проволоки для конструкций из сталей и алюминиевых сплавов толщиной 5...12 мм с использованием промышленных роботов. Математическое моделирование процессов в дуге при гибридной плазменно-дуговой сварке явилось основой выбора параметров режима сварки с учетом взаимного влияния столба сжатой дуги неплавящегося электрода и дуги с плавящимся электродом, позволившей сформулировать технические требования к источникам питания сварочного тока. На основании математического и физического моделирования процесса гибридной сварки создан комплекс оборудования и базовые технологические процессы для роботизированной сварки тонкостенных конструкций из сталей и алюминиевых сплавов. Разработанная система управления комплексом позволила синхронизировать функционирование двух сварочных источников и вспомогательного оборудования с перемещениями антропоморфного промышленного робота для реализации устойчивого процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом. Применение данного процесса сварки позволило уменьшить расход электродного металла на 40 % по сравнению с импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом при сопоставимых скоростях. При этом уровень продольных прогибов сварных образцов при использовании гибридного процесса был в 3 раза меньше по сравнению с процессом сварки импульсной дугой с плавящимся электродом. Библиогр. 20, табл. 1, рис. 10.

Ключевые слова: роботизированный комплекс, плазма, дуга с плавящимся электродом, гибридный процесс, алюминиевые сплавы, стали, режимы сварки, качество соединений

В настоящее время тенденции роботизации и автоматизации сварочного производства становятся все более актуальными для крупносерийного производства. Примером может служить использование роботов в конвейерных линиях при производстве автомобилей [1]. Еще одним актуальным примером является использование промышленных роботов в судостроении [2]. Здесь сварочные работы применяются для изготовления элементов корпусов кораблей, палубных надстроек, коммуникационных систем и различного рода судового оборудования [3]. Основное преимущество, получаемое при этом – повышение производительности и качества сварных соединений за счет замены ручной сварки на автоматическую. Кроме того, сокращается необходимость в высококвалифицированных специалистах сварщиках и появляется возможность высокопроизводительной сварки в труднодоступных местах. Так, применение вместо стали алюминия и его сплавов в судостроении и вагоностроении для изготовления корпусных элементов позволяет снизить их массу на 50...60 %. В результате появляется возможность повысить грузоподъемность судов и железнодорожного транспорта.

Для выполнения роботизированной сварки чаще всего используют хорошо известные традиционные дуговые способы [3]. Это, в первую очередь, сварка плавящимся (MIG/MAG) и неплавящимся (TIG) электродами. Однако, получаемые этими способами сварные соединения не всегда в полной мере удовлетворяют требованиям к качеству поверхности и уровню остаточных деформаций после сварки изготавливаемых конструкций. При роботизации сварочных процессов целесообразно применять доступную высокопроизводительную технологию, позволяющую минимизировать уровень остаточных сварочных деформаций.

Одним из сварочных процессов, позволяющих решить поставленную задачу, является гибридная плазменно-дуговая (Plasma-MIG) сварка плавящимся электродом [4]. Этот процесс впервые был запатентован в 1972 г. Вильгельмом Эссерсом и другими сотрудниками исследовательского центра компании Philips (Нидерланды) [5]. При таком способе сварки образуется источник нагрева для гибридной плазменно-дуговой сварки, состоящий из сжатой дуги неплавящегося электрода, охватывающей дугу с плавящимся электродом. Дополнительное сжатие последней обеспечивает сниже-

ние разбрызгивания и возможность повышения глубины проплавления основного металла при меньших значениях скорости подачи электродной проволоки (меньше сварочный ток дуги плавящегося электрода). Применение такого процесса для изготовления сварных конструкций способно обеспечить формирование мелкозернистых структур швов, а также высокое качество и производительность сварки [6].

Ранее в конструкциях головок для гибридной плазменно-дуговой сварки дугой с плавящимся электродом применялся обычный штыревой неплавящийся электрод. В современных конструкциях его заменили на полый – кольцевой [7]. Современный модифицированный процесс гибридной плазменно-дуговой сварки еще не получил достаточно широкого распространения, однако активно изучается исследователями [8]. Технологии сварки различных материалов этим способом также находятся на стадии разработки.

Целью данной работы являлось создание оборудования и технологии для гибридной плазменно-дуговой сварки с плавящимся электродом с коаксиальной подачей проволоки для роботизированной сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов с толщиной стенок 5...12 мм.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Моделирование процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с учетом взаимного влияния сжатой дуги неплавящегося электрода и дуги с плавящимся электродом, на базе результатов которого осуществляется предварительный выбор параметров режима гибридной сварки.

2. Формулирование требований к сварочным источникам питания.

3. Синхронизация работы сварочных источников и вспомогательного оборудования с антропоморфным промышленным роботом.

4. Разработка сварочной горелки для гибридной плазменно-дуговой сварки, ориентированной на непрерывную роботизированную сварку.

5. Создание роботизированного комплекса и отработка технологии гибридной плазменно-дуговой сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов с толщиной стенок 5...12 мм.

Для предварительного выбора параметров режима гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом процессы нагрева плавящегося электрода рассматривали при следующих предположениях (рис. 1): фазы нагрева вылета электрода и его плавления достаточно разделены и взаимодействие происходит таким образом, что конечные условия для нагрева являются начальными условиями для плавления; вылет электрода нагревается плазмой разряда с неплавящимся электродом и сварочным током; длина расплавленной зоны намного меньше, чем длина вылета электрода; перенос электродного металла капельный. Эти предположения совпадают с допущениями, сделанными в работе [9]. Поэтому математическую модель строили аналогично. Различие между сварочными процессами MIG и Plasma-MIG состоит в том, что вылет электрода дополнительно нагревается плазмой разряда с неплавящимся кольцевым электродом (анодом).

Электродная проволока расположена внутри плазменного разряда на его оси. Повышение ее температуры происходит за счет конвекционного и радиационного нагрева. Учитывая, что температура плазмы $T_p = 5500...15000$ К легко показать, что доля энергии, подводимой к электродной проволоке конвекционным нагревом, чрезвычайно мала. Поэтому при решении тепловой задачи конвекционный нагрев нами не учитывается. Радиационный нагрев подчиняется закону Стефана-Больцмана, а дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры T во времени t , имеет вид

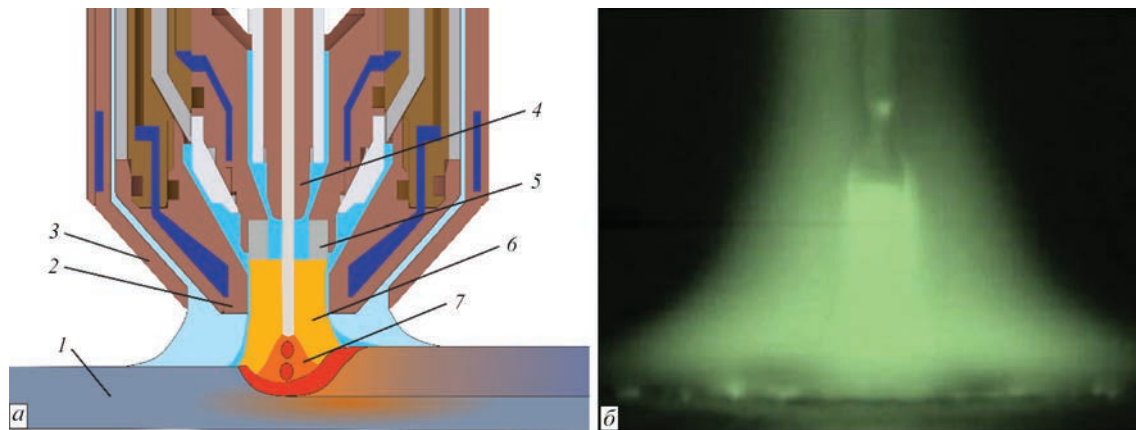


Рис. 1. Технологическая схема процесса (а) и фотография совместного действия сжатой дуги и дуги с плавящимся электродом (б) гибридной плазменно-дуговой сварки: 1 — свариваемый образец; 2 — плазмообразующее сопло; 3 — защитное сопло; 4 — мундштук плавящегося электрода; 5 — трубчатый электрод плазматрона (анод); 6 — сжатая дуга прямого действия; 7 — дуга плавящегося электрода

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\beta\sigma_{SB}}{\gamma cr_w} (T_p^4 - T^4), \quad (1)$$

где σ_{SB} — постоянная Стефана-Больцмана; β, γ, c, r_w — степень черноты, плотность, удельная теплоемкость, радиус электродной проволоки, соответственно.

Решение дифференциального уравнения (1) имеет неявную форму

$$t = \frac{\beta\sigma_{SB} T_p^3}{\gamma cr_w} \times \left[\operatorname{atanh}\left(\frac{T}{T_p}\right) - \operatorname{atanh}\left(\frac{T_0}{T_p}\right) + \operatorname{atan}\left(\frac{T}{T_p}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{T_0}{T_p}\right) \right], \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура электродной проволоки.

Решение (2) трудно использовать для дальнейших исследований. Оно упрощается, если принять во внимание, что температура плавления электродной проволоки T_m намного меньше температуры плазмы T_p . В этом случае мы получаем простое решение

$$T = T_0 + \frac{2\beta\sigma_{SB} T_p^4}{\gamma cr_w} t. \quad (3)$$

Разница между решениями при температуре плавления T_m составляет 0,2 для стали и 0,02 % для алюминия (диаметр электродной проволоки 1,2 мм). Это дало нам основание для дальнейшего использования формулы (3).

Энергия, накопленная в металле вылета электрода от прохождения сварочного тока и от излучения плазмы, суммируясь с энергией, выделяемой в приэлектродной (прикатодной) области, расходуется на нагрев и плавление металла. Из этого условия может быть получена скорость плавления электрода

$$v_m = \frac{\pi r_w^2 U_k i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \beta \sigma_{SB} T_p^4 r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^4 [c(T_m - T_0) + \lambda]},$$

где i — сварочный ток (ток MIG процесса); l — длина дуги; U_k — катодное падение напряжения; l_w, l_p — расстояния от мундштука до изделия и от сопла плазматрона до изделия (рис. 2); ρ, λ — удельное сопротивление и скрытая теплота плавления электродного металла.

Очевидно, что динамика плавления электрода описывается дифференциальным уравнением, суть которого состоит в том, что изменение длины дуги равно разности скорости плавления электрода и скорости подачи электрода v

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\pi r_w^2 U_k i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \beta \sigma_{SB} T_p^4 r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^4} - v, \quad (4)$$

где $q = c(T_m - T_0) + \lambda$.

В соответствии с законом Кирхгофа напряжение холостого хода U_{OC} источника питания равно сумме падений напряжения на элементах цепи (см. рис. 2) — активное сопротивление R_S и индуктивность L источника питания и соединительных кабелей, активное сопротивление вылета электрода и падение напряжения на дуге El (E — напряженность электрического поля в дуге)

$$U_{OC} = R_S i + L \frac{di}{dt} + \rho \frac{l_w - l}{\pi r_w^2} i + El + U_a + U_k, \quad (5)$$

где U_a — анодное падение напряжения.

Уравнения (4) и (5) составляют систему нелинейных дифференциальных уравнений, которые описывают динамику системы «источник питания – дуга с плавящимся электродом» в процессе

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = \frac{\pi r_w^2 U_k i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \beta \sigma_{SB} T_p^4 r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^4 q} - v \\ \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left(U_{OC} - R_S i - \rho \frac{l_w - l}{\pi r_w^2} i - El - U_a - U_k \right) \end{cases} \quad (6)$$

Для того, чтобы найти особые точки, которые определяют статическое состояние необходимо правые части системы (6) приравнять к нулю. Уравнения для определения статических значений длины дуги l_0 и сварочного тока i_0 имеют вид:

$$\begin{aligned} & \rho(r_w E^2 + 2\rho\beta\sigma_{SB} T_p^4) l_0^3 - \\ & - \rho \left[r_w E (2\bar{U}_{OC} + U_k + El_w) + 4\beta\sigma_{SB} T_p^4 (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + \right. \\ & \left. + \rho (2\beta\sigma_{SB} T_p^4 l_p - \gamma q v r_w) \right] l_0^2 + \\ & + \left[r_w U_k E + 2\rho (2\beta\sigma_{SB} T_p^4 l_p - \gamma q v r_w) \right] (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + \\ & + \rho r_w \bar{U}_{OC} (\bar{U}_{OC} + U_k + 2El_w) + 2\beta\sigma_{SB} T_p^4 (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w)^2 \Big] l_0 - \\ & - \left[r_w U_k \bar{U}_{OC} (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + \rho r_w \bar{U}_{OC}^2 l_w + \right. \\ & \left. + (2\beta\sigma_{SB} T_p^4 l_p - \gamma q v r_w) (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w)^2 \right] = 0; \\ & \rho R_S i_0^3 - \rho (\bar{U}_{OC} + U_k - El_w) i_0^2 + \\ & + \pi r_w \left[2\beta\sigma_{SB} T_p^4 (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + r_w (U_k E + \gamma q v) \right] i_0 - \\ & - \pi^2 r_w^3 \left[2\beta\sigma_{SB} T_p^4 (\bar{U}_{OC} - El_p) + \gamma q v E r_w \right] = 0, \end{aligned}$$

где $\bar{U}_{OC} = U_{OC} - U_a - U_k$.

Для исследования свойств этих решений воспользуемся условиями существования, суть которых состоит в следующем: Plasma-MIG процесс

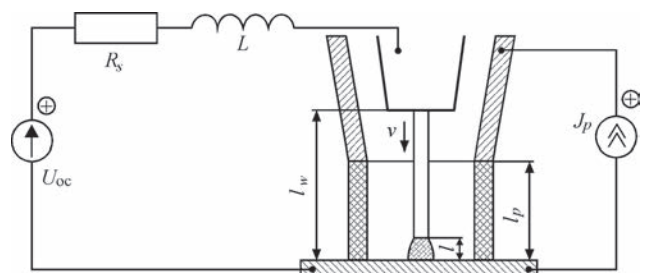


Рис. 2. Схема подключения источников питания при гибридном плазменно-дуговом сварочном процессе

физически реализуем, когда статический сварочный ток больше нуля

$$i_0 > 0, \quad (7)$$

а статическое значение длины дуги находится в пределах от нуля (контакт электрода с изделием) до расстояния от сопла до изделия (отгорание электрода)

$$0 < l_0 < l_w. \quad (8)$$

Применение этих условий позволяет определить максимальную температуру плазмы, при которой процесс Plasma-MIG протекает

$$T_{p\max} = \left(\frac{\gamma q v E r_w}{2\beta\sigma_{\text{св}}(El_p - U_{\text{OC}} + U_a + U_k)} \right)^{1/4}.$$

Наши оценки показали, что максимальная температура для стали $T_{\text{pmax}} = 7960$ К; для алюминия $T_{\text{pmax}} = 7340$ К (параметры процесса, для которых проводились вычисления, приведены в работе [10]). Этот результат хорошо согласуется с экспериментальными результатами измерения температуры [11].

В гибридном процессе Plasma-MIG присутствует взаимное воздействие газовых разрядов один на другой. Воздействие плазменного разряда на плавление электродной проволоки было рассмотрено выше. Плавление электродной проволоки, в свою очередь, влияет на электрические параметры плазменного разряда [12, 13], в частности, на его вольтамперную характеристику (ВАХ). Эти особенности были учтены при выборе источников питания и разработке аппаратуры для Plasma-MIG процесса [14]. Однако, зависимость электрических характеристик от технологических параметров Plasma-MIG процесса не могут быть получены при использовании существующих резистивных моделей [15].

Для описания плазменного разряда гибридного Plasma-MIG процесса была усовершенствована модель дуги, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона [16, 17].

Плазменная дуга рассматривается феноменологически как тепловой макрообъект, который является элементом электрической цепи со статической ВАХ $U_{\text{Plasma}}(i)$. Закон сохранения энергии для такого теплового макрообъекта выглядит так

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_\theta.$$

Этот закон связывает три энергетических параметра столба плазменной дуги: внутреннюю энергию Q , подводимую P и отводимую P_θ мощности. Внутренняя энергия столба дуги Q является суммой всех энергий плазмы: энергии теплового движения, энергии ионизации, колебательной и вращательной энергии молекул, и т. п. и зависит от радиуса и длины дуги, т.е. от ее объема. Под тер-

мином подводимая мощность P будем понимать мощность, потребляемую от источника питания, а под термином отводимая мощность P_θ будем понимать мощность, которую столб дуги отдает в окружающее пространство посредством теплопроводности и излучения.

Применение термина ток состояния [16] и введение переменной i_θ дает возможность выразить энергетические параметры дуги через электрические параметры

$$P = \frac{U_{\text{Plasma}}(i_\theta)}{i_\theta} i_\theta^2, \quad P_\theta = U_{\text{Plasma}}(i_\theta) i_\theta,$$

$$Q = 2\theta \int_0^{i_\theta} U_{\text{Plasma}}(i_\theta) di_\theta,$$

(где i_{Plasma} — ток плазменной дуги; θ — постоянная времени плазменной дуги) и получить дифференциальное уравнение модели

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} + i_\theta^2 = i_{\text{Plasma}}^2. \quad (9)$$

Уравнение (9) дополняется формулой связи между током плазменной дуги и напряжением на ней

$$u = \frac{U_{\text{Plasma}}(i_\theta)}{i_\theta} i_{\text{Plasma}},$$

которая входит в уравнения, соответствующие законам Кирхгофа.

В случае плазменной дуги с обдувом газом помимо естественной конвекции появляется дополнительный механизм рассеяния энергии. Этот механизм основан на принудительной конвекции, мощность которой P_v может быть учтена непосредственно

$$P_v = \frac{W_A}{V_A} Q = \frac{v_{\text{ShG}}}{l_p} Q,$$

где V_A — объем, занимаемый столбом плазменной дуги; W_A — объем плазмы, расходуемый в единицу времени для продольного обдува $W_A = \pi(r_{\text{Aout}}^2 - r_{\text{Ain}}^2)v_{\text{ShG}}$, v_{ShG} — скорость обдува защитным газом; r_{Ain} и r_{Aout} — внутренний и внешний радиусы столба плазменного разряда.

Уравнение баланса мощности в этом случае имеет вид

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_\theta - P_v.$$

Уравнением модели дуги с продольным обдувом является

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} = i_{\text{Plasma}}^2 - i_\theta^2 \left[1 + \frac{v_{\text{ShG}}}{l_p} \frac{Q}{P_\theta} \right]. \quad (10)$$

Уравнение (10) перспективно использовать для описания динамики плазменной дуги, где про-

дольный обдув защитным газом является существенной частью процесса.

Когда электродная проволока перемещается внутри цилиндрического плазменного разряда, появляется еще один механизм отвода энергии, связанный с ее нагревом. Его следует учитывать в законе сохранения энергии

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_{\theta} - P_v - P_w.$$

Выше рассмотрен нагрев электродной проволоки за счет излучения плазменного разряда. Воспользовавшись этими результатами, получаем формулу для мощности

$$P_w = 2\pi r_w \beta \sigma_{SB} T_p^4 (l_p - l_0).$$

Уравнение обобщенной динамической модели плазменной дуги для Plasma-MIG процесса имеет вид

$$\theta \frac{di_{\theta}^2}{dt} = i_{Plasma}^2 - i_{\theta}^2 \left(1 + \frac{P_v + P_w}{P_{\theta}} \right).$$

Для получения ВАХ плазменного разряда в Plasma-MIG процессе воспользуемся процедурой, описанной в статье [18]. В результате получена параметрическая зависимость напряжения плазменного разряда от его тока (рис. 3)

$$U_{PlasmaMIG}(i_{\theta}) = U(i_{\theta}) \left(1 + \frac{P_v + P_w}{P_{\theta}} \right)^{1/2};$$

$$I_{PlasmaMIG}(i_{\theta}) = i_{\theta} \left(1 + \frac{P_v + P_w}{P_{\theta}} \right)^{1/2}.$$

В этих формулах переменная i_{θ} играет роль параметра.

График, представленный на рис. 3, демонстрирует тенденцию к увеличению напряжения на плазменном разряде при Plasma-MIG процессе. Это хорошо согласуется с явлениями, которые наблюдались в ходе технологических экспериментов при сравнении Plasma и Plasma-MIG процессов [10, 19, 20].

На основании проведенных расчетов разработаны технические условия для создания или подбора сварочных источников питания. Так, определено, что источник питания плазменной составляющей должен обеспечивать возможность горения сжатой дуги неплавящегося электрода на постоянном токе обратной полярности с токовой нагрузкой от 50 до 250 А и напряжением на дуге до 45 В. Источник питания дуги плавящегося электрода должен обеспечивать сварочный ток от 10 до 350 А при ПВ 100 %. При этом источники питания должны обладать возможностью связи с системой управления через шинный интерфейс использующий наиболее распространенные протоколы связи. На основе данных технических требований выбраны сварочные инверторные

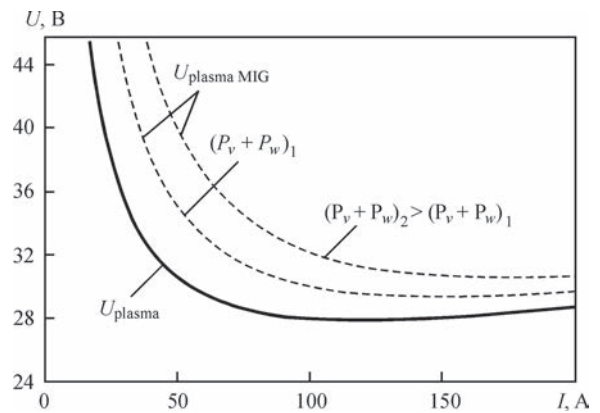


Рис. 3. ВАХ плазменного разряда в Plasma-MIG процессе (пунктирные линии) в сравнении с ВАХ разряда плазмы без процесса MIG (сплошная линия)

источники, наиболее подходящие разработанным техническим условиям. Эти источники снабжены шинным интерфейсом обмена сигналами управления и обратной связи с общей системой управления комплексом. Для надежной работы плазменного модуля в режиме сварки на постоянном токе обратной полярности проведена перекоммутация разъемов дежурной дуги для обеспечения ее поджига на обратной полярности. Система управления сварочными источниками питания и плазменным модулем построена на основе программируемого PLC контроллера, она обеспечивает алгоритм последовательного включения и отключения электрических компонентов комплекса оборудования для гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом, сбор информации о режиме сварки, контроль параметров работы узлов комплекса на предмет возникновения аварийных ситуаций (рис. 4). Связь между источниками питания происходит через шины по протоколу CAN bus. Алгоритм последовательности включения компонентов комплекса оборудования использует сигналы обратной связи по току и напряжению, которые генерируют источники питания.

Типичный алгоритм для процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом выглядит следующим образом: при подаче питания на источники сварочного тока генерируются сигналы «Готовность к работе» и они поступают на контролер системы управления. При отсутствии сигнала дальнейший процесс включения блокируется. При подаче команды «Запуск сварки» сигнал проходит по шине на источник питания дуги с плавящимся электродом, после чего выполняется его поджиг. При наличии дуги с плавящимся электродом формируется сигнал «Основной ток» с источника питания плавящегося электрода на контроллер системы управления. При поступлении данного сигнала генерируется команда для плазмен-

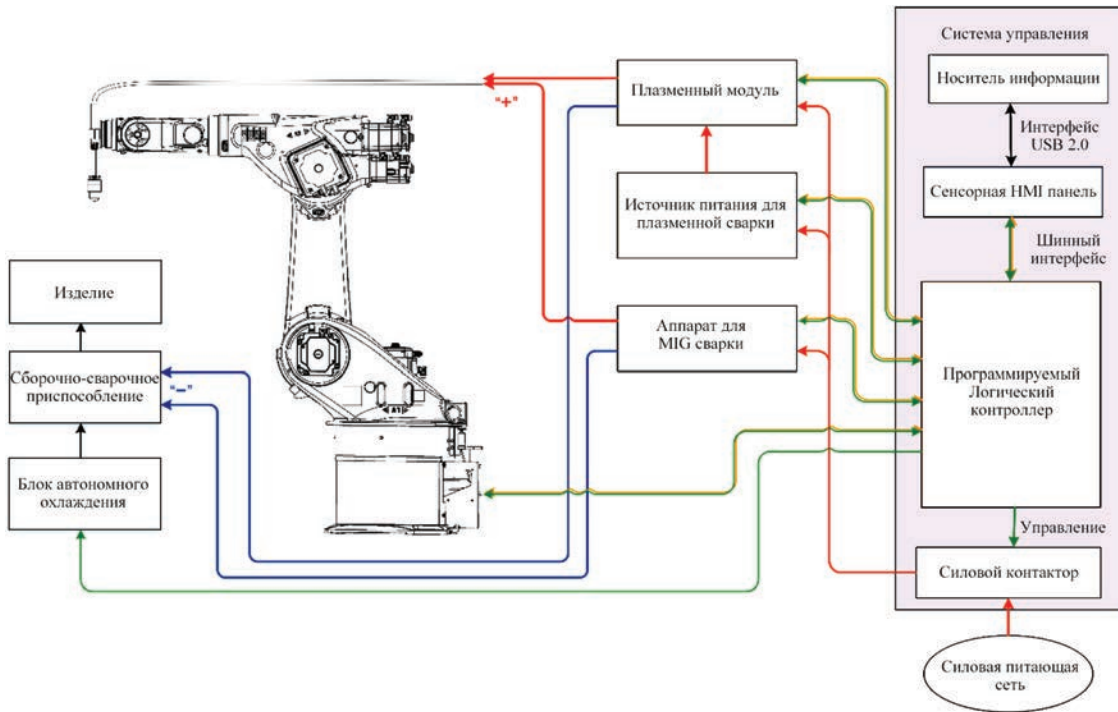


Рис. 4. Блок-схема роботизированного комплекса гибридной плазменно-дуговой сварки

ного модуля на поджиг дежурной дуги. После поджига дежурной дуги с временной задержкой генерируется сигнал на поджиг дуги на источнике питания плазменной составляющей. При возбуждении сжатой дуги неплавящегося электрода на источнике питания плазменной составляющей генерируется сигнал «Основной ток» и отправляется на контроллер системы управления. После прохождения сигнала «Основной ток» с источника питания плазменной составляющей происходит пуск системы перемещения горелки или детали с выбранной временной задержкой. Отсутствие или снятие во время процесса каждого из сигналов «Основной ток» является сигналом для прекращения алгоритма включения источников питания и самого процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом.

Система осуществляет управление внешними устройствами перемещения (сварочная колонна, сварочный вращатель или другое устройство) или обеспечивает взаимодействие комплекса сварочных источников питания с контроллером сварочного робота и синхронизацию этапов цикла сварки с его действиями. Основные технические характеристики оборудования роботизированного комплекса для гибридной плазменно-дуговой сварки (рис. 5) приведены ниже.

Основные технические характеристики комплекса оборудования для гибридной плазменно-дуговой сварки

Напряжение трехфазной питающей сети переменного тока с частотой 50 Гц, В	400 (±15 %)
Рабочее напряжение на дуге плавящегося электрода, В	0...50

Рабочий ток дуги плавящегося электрода при гибридной плазменно-дуговой сварке, А	50...250
Рабочее напряжение источника для плазменной сварки, В	15...34
Пределы регулирования разнополярного асимметричного тока, А	10...350
Пределы регулирования постоянного тока прямой и обратной полярности, А	10...350
Пределы регулирования длительности протекания тока при прямой полярности, %	15...85
Защитный газ	Ar; Ar + He
Плазмообразующий газ в гибридной сварочной горелке... Ar	
Давление рабочих газов на входе в источники питания, МПа	0,2...0,4
Расходы газов, л/мин:	
защитного	10...40
центрального	1...10
плазмообразующего	0,1...10,0
Диаметры присадочной и электродной проволоки, мм	1,2; 1,6

Для связи с контроллером робота предусмотрено использование шинного интерфейса, работающего по протоколу CAN bus. Задача взаимодействия системы управления комплекса сварочного оборудования для гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом и контроллером робота строится по принципу «Master – Slave». В качестве «Master» выступает контроллер робота. После включения системы управления комплекса сварочного оборудования происходит опрос готовности к работе и исправности источников питания. При отсутствии сигналов о неполадке формируется сигнал «Готов» и передается на контроллер робота. Контроллер робота по команде «Пуск сварки» выводит сварочную горелку в точку начала сварки и передает команду на кон-



Рис. 5. Оборудование комплекса для роботизированной гибридной Plasma-MIG сварки: а — пульт управления комплексом для гибридной Plasma-MIG сварки; б — источники питания плазменной и дуговой составляющих с механизмами подачи проволоки; в — сварочная горелка в руке робота KR 60 HA фирмы KUKA (Германия)

троллер системы управления комплексом сварочного оборудования для пуска алгоритма поджига дуги при гибридной плазменно-дуговой сварке. Система управления запускает алгоритм поджига гибридной дуги и после прохождения сигналов «Основной ток», выдаваемых источниками питания при ее поджиге, генерирует сигнал для контроллера робота на начало перемещения сварочной горелки по программе, установленной на контроллере робота. После достижения горелкой точки окончания сварки контроллер останавливает перемещение и выдает команду на контроллер системы управления комплексом сварочного оборудования на гашение гибридной дуги. Контроллер системы управления выполняет отключения источников питания и плазменного модуля по установленному в нем алгоритму. После снятия сигнала «Основной ток» источника питания плавящегося электрода и завершения цикла сварки передается сигнал на контроллер робота для возвращения сварочной горелки в исходную точку.

Данный алгоритм взаимодействия системы управления комплексом сварочного оборудования для гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом и котроллером сва-

рочного робота дает возможность упростить процесс интегрирования сварочного оборудования с роботами различных производителей. При этом функции контроля за перемещением сварочного инструмента берет на себя контроллер робота, он же выдает команды для системы управления комплексом сварочного оборудования на поджиг и гашение сварочной дуги при гибридной плазменно-дуговой сварке.

Для формирования качественных швов создана сварочная горелка с узлом дополнительной газовой защиты (рис. 6). Диаметры сменных плазмообразующих сопел выбраны в пределах 6...10 мм. Конструкция анода была составной, представляющей собой медный корпус с тугоплавкой (вольфрамовой) вставкой. Для подачи электродной проволоки в вольфраме выполнено отверстие. Рабочее расстояние между плазмообразующим соплом и свариваемым образцом должно составлять порядка 6,0 мм. Это расстояние выбрано из условий существования (7) и (8), что обеспечивало изменение длины вылета электрода (расстояния от токоподводящего наконечника для электродной проволоки до изделия) в диапазоне 16...18 мм. При этом достигается минимальное забрызгивание плазмообразующего и защитных сопел плаз-

Параметры режимов гибридной плазменно-дуговой сварки (Plasma-MIG) сталей и алюминиевых сплавов в защите аргона с использованием электродных проволок диаметром 1,6 мм

Марка стали или сплава	Толщина образца δ , мм	Скорость сварки, м/мин	Ток сжатой дуги, I_{PL} , А	Напряжение сжатой дуги U_{PL} , В	Расход плазмообразующего газа Q_{PL} , л/мин	Ток дуги плавящегося электрода I_{MIG} , А	Напряжение дуги плавящегося электрода U_{MIG} , В	Скорость подачи электродной проволоки, $v_{пр}$, м/мин
SUS304	12,0	0,25	240	39	7	300	28	7,5
Сталь 20	10,0	0,25	200	37	6	240	28	8,0
5083	8,0	0,4	168	23	5	213	23	7,0
1561	5,0	0,6	115	26	5	165	18	7,6

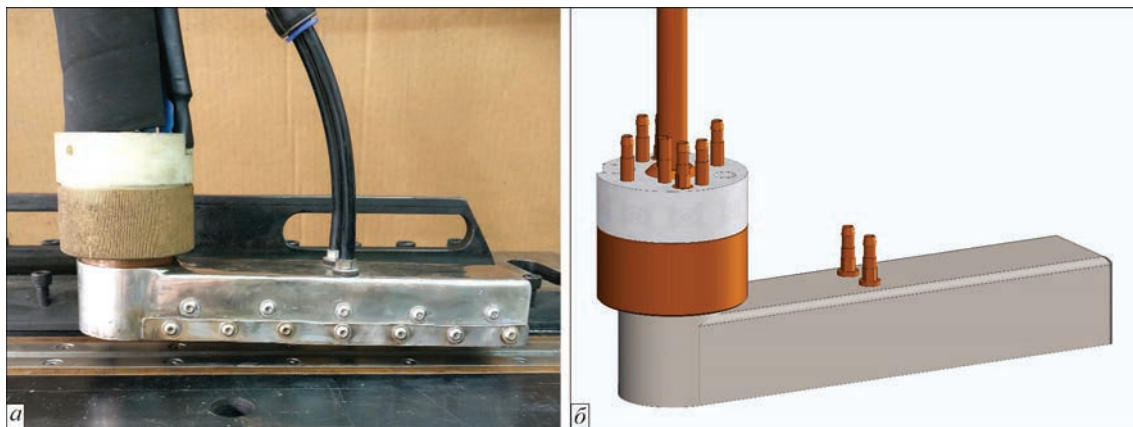


Рис. 6. Внешний вид (а) и схема (б) горелки для роботизированной гибридной плазменно-дуговой сварки с дополнительным защитным соплом

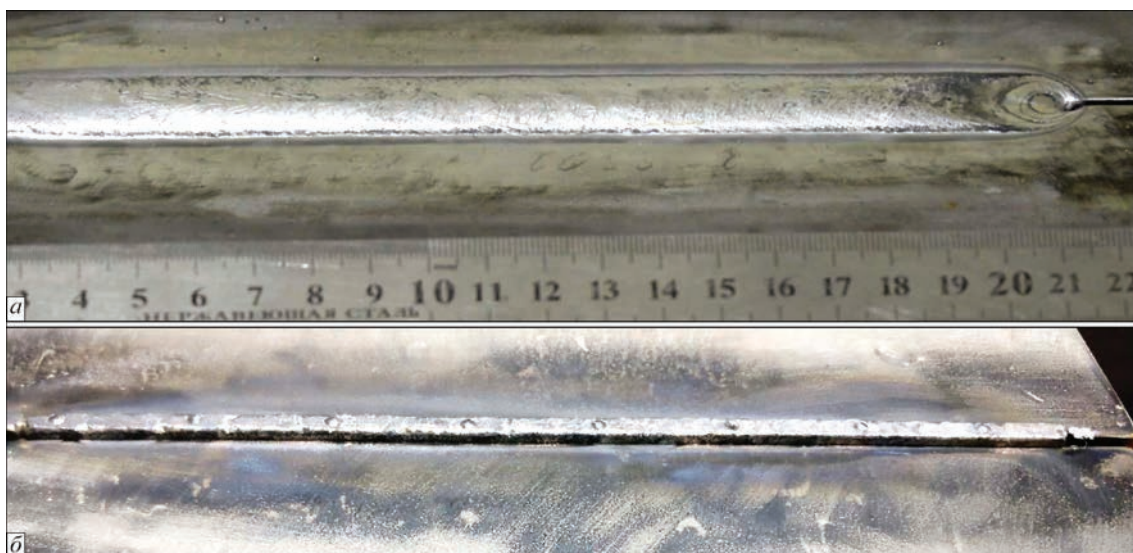


Рис. 7. Стыковое соединение стали SUS304 ($\delta = 12$ мм), полученное гибридной Plasma-MIG сваркой на созданном роботизированном комплексе: а — верхний валик; б — нижний валик



Рис. 8. Стыковое соединение Стали 20 ($\delta = 10$ мм), полученное гибридной Plasma-MIG сваркой на роботизированном комплексе: а — верхний валик; б — нижний валик

мотрона при гибридной плазменно-дуговой сварке.

Для отработки технологии роботизированной гибридной плазменно-дуговой сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов толщи-

ной 5...12 мм были подготовлены образцы стыковых соединений размером $400 \times 200 \times \delta$ мм из стали SUS304 ($\delta = 12$ мм), Стали 20 ($\delta = 10$ мм) и алюминиевых сплавов 5083 ($\delta = 8,0$ мм) и 1561 ($\delta = 8,0$ мм). Сварку выполняли без разделки кро-



Рис. 9. Стыковое соединение сплава 1561 ($\delta=5$ мм), полученное гибридной Plasma-MIG сваркой на созданном роботизированном комплексе: *а* — верхний валик; *б* — нижний валик

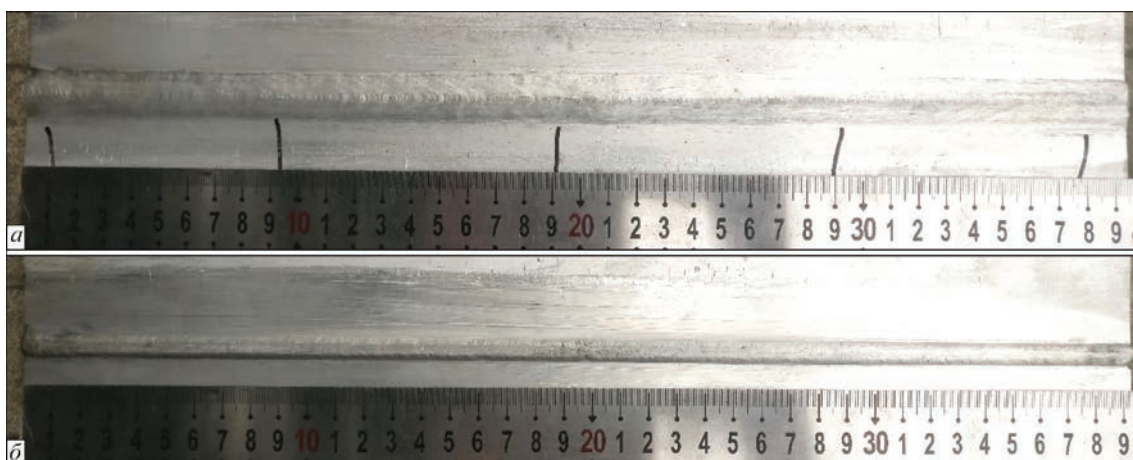


Рис. 10. Стыковое соединение сплава 5083 ($\delta=8$ мм), полученное гибридной Plasma-MIG сваркой на роботизированном комплексе: *а* — верхний валик; *б* — нижний валик

мок. Для формирования корневой части шва использовали удаляющиеся подкладки: для сталей — медные, водоохлаждаемые, с размером канавки $4 \times 1,5$ мм; для алюминиевых сплавов — из немагнитной аустенитной стали с размерами канавок $8 \times 3,0$ и $6 \times 2,0$ мм. Критерием окончательного выбора режима сварки являлось качественное формирование шва (рис. 7–10). Для определения наличия либо отсутствия внутренних пор полученные образцы подвергали рентгеновскому контролю. В результате были определены режимы роботизированной гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом, позволяющие получать качественные сварные соединения (таблица).

При импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом сварочный ток прямо пропорционален скорости подачи электродной проволоки. Это вызывает в некоторых случаях необходимость выполнения разделки кромок с целью размещения расплавленного электродного металла. При гибридной плазменно-дуговой сварке плавящимся электродом с коаксиальной подачей электродной проволоки за счет подбора соотношения между

энергией сжатой дуги неплавящегося электрода и энергией дуги с плавящимся электродом можно уменьшать скорость подачи электродной проволоки до значений, необходимых для формирования геометрии проплава и выпуклости шва согласно требований нормативных документов. При применении разработанной технологии нет необходимости в разделке кромок швов для сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов с толщиной стенок $5 \dots 12$ мм. Кроме того, как показало сравнение получаемых результатов с результатами дуговой сварки плавящимся электродом, ширина швов и усиление при гибридной плазменно-дуговой сварке уменьшается до 40 %.

Еще одним результатом сравнения роботизированного гибридного плазменно-дугового процесса с процессами плазменной и MIG/MAG сварки является определение возможности повышения скорости сварки на $25 \dots 40$ %. При этом за счет повышения скорости сварки и уменьшения количества наплавленного электродного металла снижается уровень продольных и поперечных деформаций. Так для сплава 1561 при одних и тех же значени-

ях скорости сварки уровень продольного прогиба образца при гибридной плазменно-дуговой сварке уменьшается в 3 раза по сравнению с образцом, выполненным импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом.

Выводы

1. На основании результатов, полученных при моделировании процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с коаксиальной подачей электродной проволоки, создано оборудование и разработаны базовые технологические процессы для роботизированной сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов с толщиной стенки 5...12 мм.

2. Разработанная система управления комплексом позволяет синхронизировать функционирование двух сварочных источников и вспомогательного оборудования с действиями антропоморфного промышленного робота для реализации процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом.

3. Применение созданного роботизированного комплекса гибридной плазменно-дуговой сварки и разработанного процесса сварки сталей и алюминиевых сплавов толщиной 5...12 мм позволяет повысить скорость сварки на 25...40 % по сравнению с импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом, уменьшить на 40 % количество электродной проволоки, необходимой для формирования сварного соединения согласно нормативным документам, а также снизить уровень остаточных сварочных деформаций сваренных изделий.

Работа выполнена при поддержке программы Государственного управления иностранных экспертов № WQ20124400119 «1000 талантов» (КНР), Инновационной исследовательской команды провинции Гуандун (КНР) № 201101C0104901263, Проекта Академии наук провинции Гуандун (КНР) «Capacity – building of innovation – driven development for special fund projects» 2017GDASCX-0411; Проектов провинции Гуандун (КНР) № 2015A050502039 и № 2016B050501002.

Список литературы

1. Схиртладзе А. Г., Бочкарев С. В., Лыков А. Н., Борискин В. П. (2013) *Автоматизация технологических процессов*. Москва, ООО «ТНТ».
2. Водовозов В. М., Мядзель В. Н., Рассудов Л. Н. (1986) *Роботы в судокорпусных производствах (Управление, обучение, алгоритмизация)*. Москва, Судостроение.
3. Овчинников В. В. (2012) *Оборудование, механизация и автоматизация сварочных процессов. Практикум*. Москва, Академия.
4. Essers W. G., Jelmorini G. (1975) *Method of plasma-MIG-welding*. U.S. Philips Corporation, New York, NY, USA, Пат. US3891824.

5. Essers W. G., Liefkens A. C. (1972) Plasma-MIG welding developed by Philips. *Machinery and Production Engineering*, **12**, 632–633.
6. Essers W. G., Willemes G. A. (1984) *Plasma-MIG – schweißen von Aluminium auftragschweißen und Zweielektadenschweißen, von autahl*. DVS-Berichte, **90**, 9–14.
7. Дедюх Р. И. (2014) Особенности процесса плазменной сварки плавящимся электродом (Обзор). *Сварочное производство*, **5**, 34–39.
8. Tao Yang, Hongming Gao, Shenghu Zhang et al. (2013) The study on plasma-MIG hybrid arc behaviour and droplet transfer for mild steel welding. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **33**, 459–464.
9. Sydorets V. N., Zhernosekov A. M. (2004) Numerical simulation of the system of power source–consumable-electrode arc. *The Paton Welding J.*, **12**, 9–15.
10. Korzyh V., Grynuik A., Khaskin V., Babych O. (2016) The Hybrid Plasma-Arc Welding of Thin-Walled Panels Made of Aluminum Alloy. *First Independent Sci. J.*, **12-13**, 28–36.
11. Ton H. (1975) Physical Properties of the Plasma-MIG Welding Arc. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **8**, 922–933.
12. Hertel M., Füssel U., Schnick M. (2014) Numerical Simulation of the Plasma-MIG Process – Interactions of the Arcs, Droplet Detachment and Weld Pool Formation. *Welding in the World*, **58**, 85–92.
13. Yang T., Xu K., Liu Y. et al. (2013) Analysis on Arc Characteristics of Plasma-MIG Hybrid Arc Welding. *Trans. of the China Welding Ins.*, **34(5)**, 62–66.
14. Kornienko A. N., Makarenko N. A., Granovskij A. V., Kondrashov K. (2001) A Universal Source for Plasma-MIG Surfacing and Welding. *Svarochnoe proizvodstvo*, **9**, 25–26.
15. Oliveira M. A. de., Dutra J. C. (2007) Electrical Model for the Plasma-MIG Hybrid Welding Process. *Welding & Cutting*, **6(6)**, 324–328.
16. Pentegov I. V., Sidorets V. N. (1990) Energy Parameters in a Mathematical Model of a Dynamic Welding Arc. *Welding International*, **4(4)**, 272–275.
17. Pentegov I. V., Sydorets V. N. (2015) Comparative Analysis of Models of Dynamic Welding Arc. *The Paton Welding J.*, **12**, 45–48.
18. Pentegov I. V., Sydorets V. N. (1991) Quasistatic and Dynamic Volt-Ampere Characteristics and Time Constant of Blown and Moving Arcs. *The Paton Welding J.*, **3**, 361–364.
19. Gao H.-M., Bai Y., Wu L. (2008) Comparison between Plasma-MIG and MIG Procedures on 5A06 Aluminum Alloy. *Mat. Sci. Forum*, **575-578**, 1382–1388.
20. Matthes K.-J., Kohler T. (2002) Electrical Effects and Influencing Quantities in the Case of the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Welding & Cutting*, **2**, 87–90.

В. М. Коржик^{1,2}, В. М. Сидорець^{1,2},
Шангуо Хан¹,
О. А. Бабіч^{1,2}, А. А. Гринюк^{2,3}, В. Ю. Хаскін^{1,2}

¹Гуандунський Інститут зварювання
(Китайсько-український інститут зварювання
ім. С. О. Патона). 510650, Китай, Гуанчжоу,
Тянхе, вул. Чапкінг, 363.

²ІЗ ім. С. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

Е-mail: office@paton.kiev.ua
³НТУУ «КПІ ім. Ігора Сікорського».
03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

СТВОРЕННЯ РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ГІБРИДНОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Метою даної роботи є створення комплексу обладнання та технології гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з коаксиальною подачею дроту для конструкцій

цій із сталей і алюмінієвих сплавів товщиною 5...12 мм з використанням промислових роботів. Математичне моделювання процесів в дузі при гібридному плазмово-дуговому зварюванні стало основою вибору параметрів режиму зварювання з урахуванням взаємного впливу стовпа стислої дуги, що не плавиться і дуги з плавким електродом, дозволила сформулювати технічні вимоги до джерел живлення зварювального струму. На підставі математичного і фізичного моделювання процесу гібридного зварювання створений комплекс обладнання і базові технологічні процеси для роботизованого зварювання тонкостінних конструкцій із сталей і алюмінієвих сплавів. Розроблена система управління комплексом дозволила синхронізувати функціонування двох зварювальних джерел і допоміжного обладнання із застосуванням антропо-

морфного промислового робота для реалізації сталого процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом. Застосування даного процесу зварювання дозволило зменшити витрату електродного металу на 40 % в порівнянні з імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом при порівнянних швидкостях. При цьому рівень поздовжніх прогинів зварних зразків при використанні гібридного процесу був у 3 рази меншим в порівнянні з процесом зварювання імпульсною дугою з плавким електродом. Бібліогр. 20, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: роботизований комплекс, плазма, дуга з плавким електродом, гібридний процес, сплави алюмінія, сталі, режими зварювання, якість з'єднань

Поступила в редакцію 11.05.2017

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Е. В. Кудинова (Приазовский государственный технический университет) защитила в специализированном совете НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского» 19 декабря 2016 г. кандидатскую диссертацию на тему «Синтез ультрадисперсных модифицированных слоев на твердых сплавах плазменной обработкой».

В диссертации разработана математическая модель оптимального управления процессом плазменного поверхностного модифицирования твердосплавного инструмента и инженерная методика расчета оптимальных режимов обработки, основанная на решении уравнения теплопроводности, которая позволяет решать как прямую задачу — вычисление $T_{\text{тах}}$ и W при заданных условиях обработки, так и обратную задачу — вычисление требуемых (оптимальных) режимов плазменной обработки (I , q , V). С использованием разработанной математической модели выполнены расчеты параметров термического цикла плазменного нагрева твердосплавных пластин. Исследованы механизмы структурных превращений в инструментальных твердых сплавах при плазменном поверхностном модифицировании. Выявлены закономерности структурных превращений в твердых сплавах при нагреве высококонцентрированной плазменной струей. Установлено, что максимальный эффект упрочнения для сплавов типа ТК и ВК ($HV \sim 1700$) достигается при плазменной обработке без оплавления композиции с превращениями в карбидах и связке. Разработана методика испытаний и исследованы тре-

щиностойкость, механизмы разрушения и износа инструментальных твердых сплавов с поверхностным модифицированным слоем. Установлено, что плазменное модифицирование приводит к повышению трещиностойкости твердых сплавов на 20 % в сравнении с исходным состоянием, дополнительным фактором повышения трещиностойкости модифицированных твердых сплавов является рассеяние энергии разрушения благодаря образованию мезоструктурных ансамблей. Разработано технологическое оборудование для проведения плазменной обработки, позволяющее осуществлять закрепление твердосплавных пластин разной формы, осуществление обработки под разным углом наклона и на разной удаленности от источника нагрева. Разработаны технологические процессы плазменного модифицирования режущего инструмента из твердых сплавов. Разработана структурная схема синтеза модифицированных слоев на твердосплавном инструменте после плазменного модифицирования. Разработаны рекомендации по выбору оптимального размещения модифицированной зоны на твердосплавных пластинах. Проведены стойкостные исследования твердосплавных пластин после плазменного модифицирования. Установлено, что после плазменного модифицирования стойкость твердосплавного инструмента повышается в 2,5...3,0 раза. Металлографические исследования материала режущей кромки после резания показали, что износ становится более равномерным, уменьшается количество микросколов и выкрашиваний.