



## АНАЛОГОВОЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ СВАРОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО, В. С. ЛАНБИН**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Обсуждаются результаты аналогового и микропроцессорного управления током сварочного пучка электронов в современных установках для электронно-лучевой сварки. Экспериментально показано, что благодаря усовершенствованию алгоритмов управления, реализованного на встроенном микропроцессоре, удастся снизить значения нестабильностей тока электронного пучка до  $\pm 1\%$  в режиме сварки и до  $\pm 10\%$  в режиме малых ( $\leq 1$  мА) токов настройки. Обеспечивается формирование импульсов тока необходимой формы и амплитуды для работы системы автоматического совмещения пучка со стыком в процессе сварки.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, ток сварочного электронного пучка, система ЧПУ, аналоговое и цифровое управление, помехозащитенность, быстродействие, точность, автоматическое совмещение пучка со стыком

К особым требованиям, предъявляемым к современному оборудованию для электронно-лучевой сварки, относятся возможность обеспечения малых настроечных токов пучка и работа вторично-эмиссионных или рентгеновских систем слежения за стыком во время сварки [1].

**Дискретность задания и минимальный ток пучка.** Настроечный минимальный ток пучка, задаваемый оператором, не должен вызывать оплавления поверхности металла. Как видно из рис. 1 (пушка ЭЛА-60/15, ускоряющее напряжение 60 кВ, рабочее расстояние 150 мм), пучок электронов с энергией 60 кэВ при токе 0,5 мА уже оставляет на поверхности образца оплавленную зону, недопустимую для многих типов промышленных изделий. Поэтому в аппаратуре с ускоряющим напряжением 60...120 кВ как минимальный ток пучка, так и дискретность его задания должны регламентироваться значением 0,1 мА. На практике ранее не удавалось задавать в мощных источниках питания минимальный ток менее 1 мА, поскольку в связи с влиянием емкостных токов утечки на землю источника питания и электромагнитных помех на цепи измерения и управления током пучка его нестабильности достигали 100 %.

Фактическое значение тока пучка определяется по падению напряжения на термостабильном резисторе, включенном в цепь прохождения тока. Это напряжение используется и в качестве сигнала обратной связи канала управления током пучка. Проще всего включить резистор между землей и клеммой «плюс» источника ускоряющего напряжения. В этом случае не возникают проблемы раз-

вязки цепей управления от высокого потенциала, но через резистор текут, помимо сварочного, емкостные токи утечки на землю источника ускоряющего напряжения, частоты которых находятся в диапазоне 50...300 Гц. Если при полной стационарной нагрузке источника доля емкостных токов невелика, то при малых сварочных токах и в переходных режимах значение емкостных токов может даже превосходить заданное стационарное значение тока пучка. Например, для источника питания ЭЛА-60 [2] мощностью 60 кВт значение емкостных токов в стационарном режиме составляет около 10 мА, а при переходных процессах, в том числе при импульсной модуляции тока пучка, многократно превышает это значение. Как следствие, приходится фильтровать сигнал обратной связи по току пучка, что существенно увеличивает постоянную времени цепи управления и ограничивает возможность точного задания малых ( $\leq 1$  мА) токов настройки.

С целью исключения влияния емкостных токов утечки на точность измерения тока пучка в современных источниках ускоряющего напряжения сопротивление обратной связи включается между клеммой «минус» источника и эмиссионной системой сварочной пушки, вся система автоматического регулирования тока пучка размещается

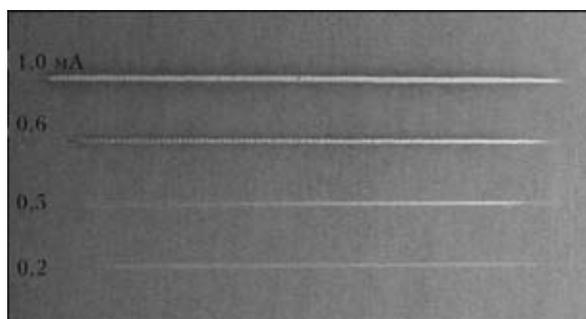


Рис. 1. Воздействие на поверхность низкоуглеродистой стали пучком электронов, перемещаемым со скоростью 25 мм/с, при различных токах (при токе 0,2 мА оплавления нет)

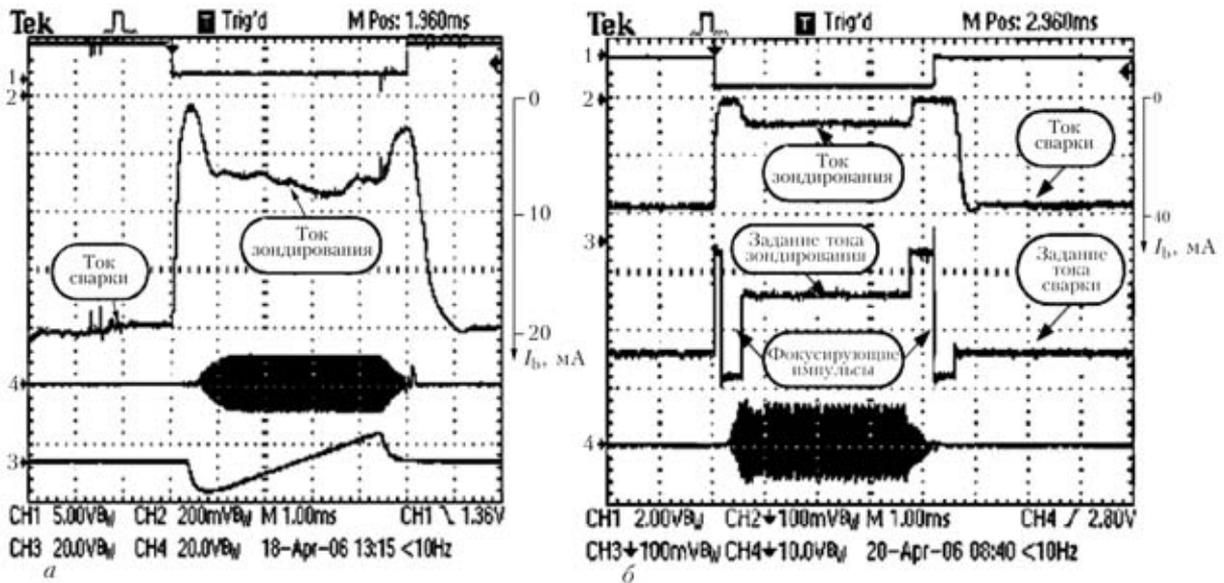


Рис. 2. Осциллограммы, характеризующие работу аналогового (а) и микропроцессорного (б) управления током пучка  $I_b$  при работе в режиме реального времени системы автоматического совмещения пучка со стыком для а: 1 — импульс синхронизации; 3 — ток кадровой развертки пучка; 4 — ток строчной развертки пучка; для б: 1 — ток строчной развертки пучка; 4 — импульс синхронизации

под высоким потенциалом, а передача задания тока осуществляется через частотный или цифровой каналы с оптической развязкой низковольтных и высоковольтных цепей [3]. Однако до настоящего времени результаты применения такой системы в литературе не обсуждались.

**Форма импульса тока.** При работе системы автоматического слежения за стыком сварочный пучок периодически (обычно 3 раза в секунду) переводится в режим зондирования поверхности свариваемого изделия, при этом нужно учитывать следующее: для предотвращения нарушения формирования шва время прерывания процесса сварки должно быть минимальным, с увеличением скорости сварки оно должно пропорционально сокращаться. Таким образом, длительность переходных процессов необходимо свести к минимуму; для формирования собственно информационного кадра, т. е. изображения зоны сварки, когда ток зондирующего пучка составляет 5...10 mA требуется не менее 3,5 мс; для предотвращения повреждения поверхности изделия во время сравнительно малой скорости нарастания (~0,5) и спада (~0,1 мс) амплитуды строчной развертки ток пучка должен быть практически нулевым.

Основным фактором, препятствующим достижению перечисленных выше требований, является распределенная емкость соответствующих токоведущих проводов высоковольтного кабеля. Для предотвращения развития автоколебательных процессов в высоковольтной цепи приходится ограничивать скорость изменения тока пучка, что ведет к увеличению длительности фронтов импульса тока. Как видно из осциллограмм на рис. 2, а, для формирования импульса тока с длитель-

ностью вершины 3,5 мс общая длительность возмущения процесса сварки может достигать до 6 мс. Оставляет желать лучшего форма импульса в области нулевого тока. Здесь практически вообще отсутствует плоская вершина, что затрудняет своевременный старт генератора развертки пучка и поэтому избежать оплавления поверхности изделия во время нарастания и спада тока строчной развертки трудно.

Учитывая изложенное выше, целью данной работы является сопоставление аналогового и микропроцессорного управления током пучка электронов.

**Особенности построения каналов управления током пучка.** Особенностью рассматриваемых каналов управления является их интеграция с общей системой компьютерного управления процессом электронно-лучевой сварки [4] на основе системы ЧПУ Sinumerik 840D [5], реализующей многокоординатные сварочные перемещения. Одной из виртуальных осей системы ЧПУ является ток пучка, мгновенное значение которого жестко синхронизировано с перемещениями. Тип и размещение соответствующего интерфейсного модуля ЧПУ накладывают ограничения на структуру и характеристики канала управления током пучка в целом.

На рис. 3 приведено два реализованных варианта управления током пучка с использованием следующих одинаковых решений: сигнал управления, задающий необходимый ток пучка, представляет собой цифровой код, формируемый ЧПУ Sinumerik 840D I; развязка находящихся под различными потенциалами частей канала управления осуществляется с помощью оптоволоконных пар

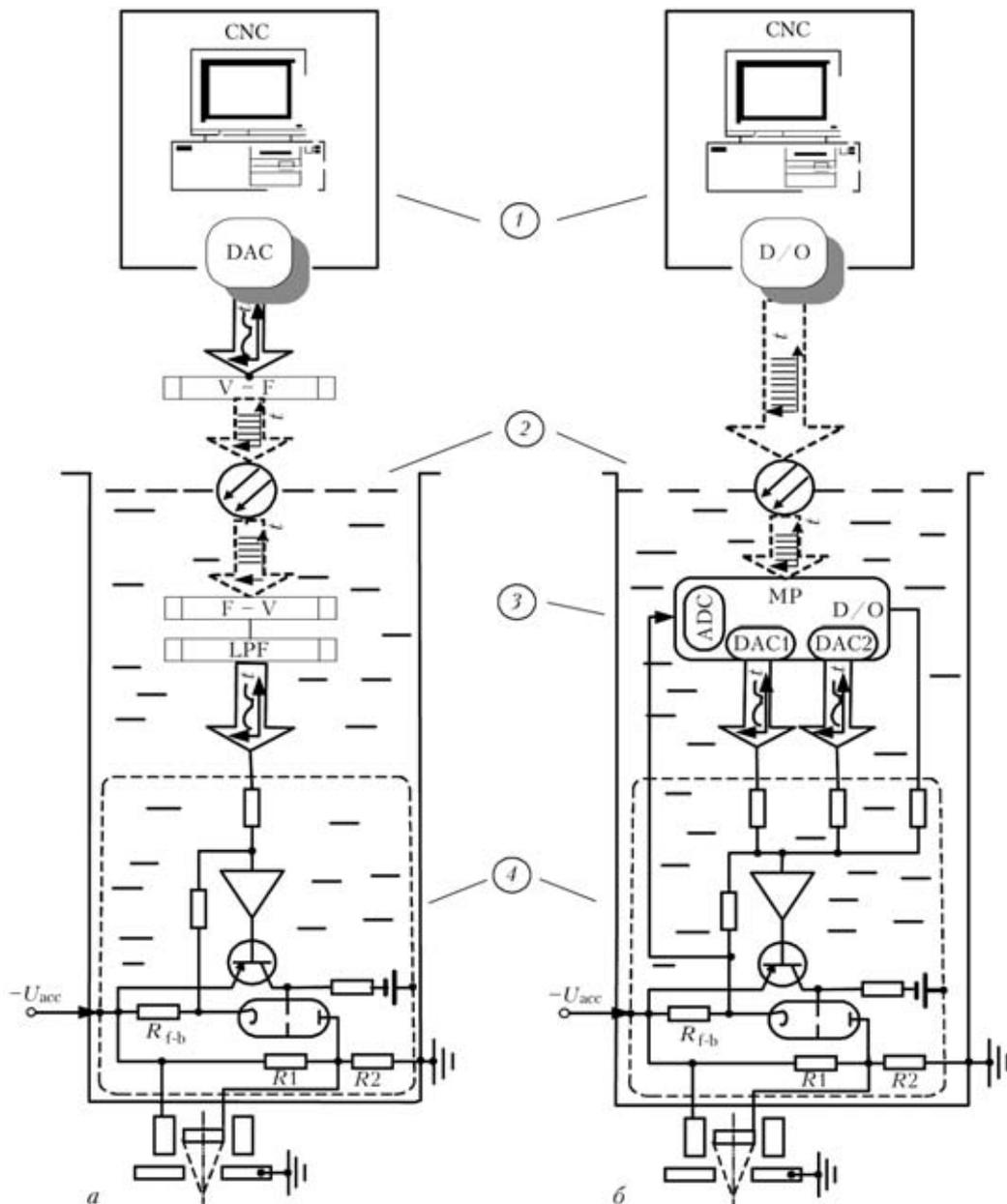


Рис. 3. Блок-схемы аналогового (а) и цифрового (б) управления током пучка: 1 — управляющий компьютер системы ЧПУ Sinumerik 840D; 2 — оптоволоконная развязка от высокого напряжения; 3 — микропроцессор (MP); 4 — стабилизатор тока пучка (DAC — цифро-аналоговый преобразователь; ADC — аналого-цифровой преобразователь; D/O — цифровой интерфейсный модуль; V-F — преобразователь напряжение — частота; F-V — преобразователь частота — напряжение; LPF — фильтр низких частот;  $-U_{acc}$  — минус источника ускоряющего напряжения;  $R_{f-b}$  — резистор датчика тока пучка

2, расположенных на границе воздух – трансформаторное масло в высоковольтном баке источника ускоряющего напряжения; управляющее напряжение эмиссионной системы сварочной пушки формируется стабилизатором тока пучка 4, а сигнал обратной связи по току пучка снимается с резистора  $R_{f-b}$ ; максимальное значение отрицательного потенциала управляющего электрода эмиссионной системы задается резисторами R1 и R2.

Различия в схемах управления током пучка заключаются в применении в первом случае (рис. 3, а) стандартного цифро-аналогового преобразователя (DAC) системы ЧПУ Sinumerik 840D, а во втором (рис. 3, б) — встраивании в эту систему

ЧПУ преобразователя (разработан в ИЭС им. Е. О. Патона) с цифровым выходом (DO).

В схеме, показанной на рис. 3, а, цифровое значение задаваемого тока пучка преобразуется с помощью DAC в аналоговый сигнал, затем в частотный (в составе системы ЧПУ Sinumerik 840D отсутствуют модули, способные преобразовывать код непосредственно в частоту), передается по оптоволоконной линии связи, затем из частотного (с помощью преобразователя F-V) опять в аналоговый сигнал, фильтруется с помощью фильтра низких частот LPF и подается на стабилизатор тока пучка.



В схеме, показанной на рис. 3, б, цифровое значение задаваемого тока пучка преобразуется в аналоговый сигнал уже в высоковольтном баке, непосредственно перед входом стабилизатора тока пучка. Для этого используется микропроцессор 3, имеющий собственный DAC.

Если исключить из рассмотрения характеристики стабилизатора тока пучка (поскольку этот узел является одинаковым для обеих схем), можно видеть, что в первом случае имеются, по крайней мере, три звена, негативно влияющие на достоверность передачи сигнала управления:

аналоговый канал связи между аппаратным шкафом, где расположена система ЧПУ, и источником ускоряющего напряжения, имеющим длину до 10 м и подверженным влиянию электромагнитных полей;

преобразователи «напряжение — частота» и «частота — напряжение» (нелинейности  $\leq 0,1\%$  при частоте 1 мГц, температурные нестабильности  $\pm 0,015\%$ /град при частоте 100 кГц, время установки 11 мкс при частоте 100 кГц);

фильтр низких частот.

Хотя температурные нестабильности преобразователей «напряжение — частота» и «частота — напряжение» превышают аналогичные параметры DAC, тем не менее они не выходят за пределы максимально допустимых значений, влияющих на параметры тока сварки. Звеном, наиболее подверженным влиянию электромагнитных помех, является аналоговый канал связи. Поэтому экспериментальные исследования, выполненные С. А. Шевчуком в ИЭС им. Е. О. Патона, показали необходимость применения фильтра низких частот с максимальным временем установления не менее 0,4 мс, которое существенно ограничивает как динамические возможности канала управления током пучка, так и стабильность малых токов пучка (таблица). Отрицательное влияние фильтра низких частот не может быть скомпенсировано известными приемами.

В цифровом канале управления током пучка присутствует только одно звено, влияющее на дос-

товерность передачи сигнала управления, — DAC, входящий в микропроцессор (рис. 3). Последний выполняет только линейные операции, а хранящиеся в его памяти константы не зависят от времени (время, затрачиваемое микропроцессором на выполнение любых операций с входным сигналом, пренебрежимо мало).

Микропроцессор имеет следующие функции: преобразование цифрового кода задания в аналоговый сигнал управления стабилизатором тока пучка с помощью DAC1;

осуществление второго контура регулирования в режиме малых токов с помощью DAC2;

форсирование процесса установления необходимого тока пучка.

Аналоговый сигнал преобразователя DAC1 поступает на основной вход стабилизатора тока пучка и обеспечивает дискретность задания тока в 250 мкА с точностью исполнения  $\pm 125$  мкА для максимального тока в 1 А. Если бы задание реализовывалось стабилизатором тока пучка без погрешностей, такая точность была бы вполне приемлемой для большинства задач сварки. Однако стабилизатор, несмотря на то, что он охвачен аналоговой петлей обратной связи, вносит собственные погрешности и нестабильности, зависящие от температуры и времени, особенно на начальном участке его характеристики. Для их устранения в систему управления включен второй контур обратной связи, реализованный в цифровом виде следующим образом.

Напряжение обратной связи на резисторе  $R_{f-b}$  в катод лампы стабилизатора тока измеряется аналого-цифровым преобразователем микропроцессора, построенным таким образом, что разрядность преобразования в области малого сигнала равна 16, т. е. дискретность составляет несколько десятков микроампер. Код измеренного на резисторе обратной связи значения тока пучка сравнивается с кодом задания, поступающим на DAC микропроцессора, а затем осуществляется выработка корректирующего воздействия, соответствующего точности канала измерения, на сигнал уп-

**Сравнение характеристик аналогового и микропроцессорного управления током сварочного пучка**

Параметры	Аналоговый канал	Цифровой канал
Линейность, %	0,2	0,05
Температурный коэффициент, %/град	0,07	0,0025
Дискретность задания тока, мкА	1000	100
Минимальный ток пучка, мкА	1000	100
Нестабильности тока пучка в диапазонах, %:		
0,1...1 мА	$\pm 100$	$\pm 10$
1...1000 мА	$\pm 1$	$\pm 1$
Максимальная скорость регулирования тока пучка, мА/мс	50	200
Длительность прерывания процесса сварки при слежении за стыком, мс	6	5



равления. Суммирование основного и корректирующего сигналов задания позволяет, кроме того, при необходимости перейти на более мелкую дискретизацию задания, чем это может обеспечить основной преобразователь DAC1. При этом последний вырабатывает управляющий сигнал в грубой сетке, а DAC2 корректирует его до ближайшего значения мелкой сетки.

Применение микропроцессора позволило улучшить управляемость током пучка благодаря широким возможностям метода предсказаний [6], когда с целью управления заведомо «медленным» каскадом для получения приемлемых динамических характеристик в управляющий сигнал вносятся предсказания, компенсирующие недостаточную динамику каскада.

В рассматриваемом случае с целью отсечки тока пучка специальным дискретным импульсом отключается стабилизатор тока и на управляющий электрод электронной лампы подается значительно более высокий отрицательный потенциал, чем это необходимо для полного запираания эмиссионной системы; малое время выхода из режима перезапираания на необходимый уровень тока достигается путем восстановления режима стабилизации тока с одновременной подачей на вход стабилизатора импульса, форсирующего процесс установления необходимого тока.

Сравнение осциллограмм, характеризующих работу рассматриваемых каналов при скачкообразном изменении тока (см. рис. 2), позволяет утверждать о значительно более высоком качестве работы цифрового канала: длительность прерывания процесса сварки снижена на 20 % — с 6 до 5 мс; четко фиксируется отсечка тока пучка (его нулевой уровень), что исключает оплавление поверхности изделия во время нарастания и спада амплитуды строчной развертки пучка.

Основные параметры управления пучком электронов при использовании рассматриваемых каналов приведены в таблице. Следует отметить,

что для случая цифрового микропроцессорного канала характерно снижение на один порядок нестабильностей тока пучка в диапазоне малых настроечных токов 0,1...1 мА, а также увеличение в 4 раза скорости регулирования тока пучка по сравнению со случаем аналогового управления.

## Выводы

1. Высокая помехозащищенность и быстродействие микропроцессорного канала управления током сварочного пучка электронов обуславливают целесообразность его применения в установках нового поколения.

2. Результаты экспериментального исследования созданного микропроцессорного канала управления током сварочного пучка электронов и его применения в промышленных установках показали надежную стабилизацию тока электронного пучка с точностью  $\pm 1\%$  в режиме сварки и  $\pm 10\%$  в режиме малых настроечных токов  $\leq 1$  мА; строгое формирование импульсов тока заданной формы, обеспечивающих работу системы автоматического совмещения пучка со стыком.

1. *Наблюдение* процесса электронно-лучевой сварки и автоматическое слежение за стыком / О. К. Назаренко, В. И. Шаповал, Г. А. Лоскутов и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 5. — С. 35–38.
2. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
3. *Pat. 24 60 424, H 01 J 37/24. Deutsche. Strahlstromsteuerung fur eine Elektronenstrahl-Schweissmaschine* / R. Mauer. — Publ. 1977, Marz 17.
4. *Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пучки и изделия* / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 5. — С. 3–7.
5. *Sinumerik & Simodrive*: Каталог NC фирмы «Siemens», 2004.
6. *Кротов Н. А., Козырев В. Б.* Способы линеаризации амплитудной характеристики усилителей мощности // Радиотехника. — 2003. — № 12.

Results of analog and microprocessor control of welding electron beam current in modern EBW units are discussed. It is experimentally shown that by improving the algorithms of control, implemented in a built-in microprocessor, it is possible to lower the value of instability of electron beam current to  $\pm 1\%$  in the welding mode and to 10 % in the mode of low setting-up currents ( $\leq 1$  mA). Generation of current pulses of the required form and amplitude is ensured for operation of the system of automatic guidance of the beam to the butt during welding.

Поступила в редакцию 22.05.2006



## ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА 1420, ПОЛУЧЕННЫХ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКОЙ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

Т. М. ЛАБУР, д-р техн. наук, А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук, А. А. ГРИНЮК, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Сопоставлены физико-механические характеристики соединений высокопрочного алюминиевого сплава 1420, полученных неплавящимся электродом в аргоне обычной стационарной и отклоняющейся от вертикальной оси (вследствие пропуска тока через присадочную проволоку) дугой. Определены показатели прочности и угла загиба сварных соединений, а также прочности и ударной вязкости металла швов при использовании серийной сварочной проволоки СвАМгБЗ. Установлены значения показателей вязкости разрушения, определяющие уровень надежности сварных соединений при эксплуатации конструкций. Проанализированы особенности микроструктуры швов и распределение их твердости.

*Ключевые слова:* аргонодуговая сварка, неплавящийся электрод, алюминиевые сплавы, сварные соединения, отклонения дуги, колебания ванны, физико-механические свойства, твердость, структура, сопротивление разрушению

При выполнении обычной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом современных сверхлегких высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов в швах образуются включения оксидной пленки, а в зоне сплавления шва с основным металлом — поры. Кроме того, наличие лития, являющегося легирующим элементом, приводит к появлению хрупких выделений и резкому увеличению концентрации напряжений, о чем свидетельствуют низкие значения показателей вязкости разрушения сварных соединений [1]. Для получения качественных сварных соединений применяют различные методы воздействия на расплавленный металл, обеспечивающие оптимальные теплофизические условия и способствующие активизации процессов катодного разрушения оксидной пленки на свариваемых поверхностях и удалению пузырьков газа из расплава. Особенно эффективными являются методы, вызывающие динамические колебания расплавленного металла сварочной ванны и его интенсивное перемешивание в процессе сварки. Для этого осуществляют механические колебания электрода, присадочную проволоку подают прерывисто, накладывают на дугу кратковременные импульсы тока, используют для питания дуги асимметричный или модулированный ток, а также создают дополнительные магнитные поля.

Перемещения расплавленного металла при колебаниях электрода активизируются вследствие изменения силового воздействия дуги на ванну (нормальной составляющей давления дуги, обратно пропорциональной углу отклонения электрода от вертикали) [2]. Прерывистая подача присадочной проволоки способствует возникновению колебаний жидкого металла в результате периодических изменений объема металла, поступающего в головную часть ванны [3]. При наложении кратковременных импульсов тока колебания в расплаве возникают вследствие резкого увеличения давления дуги во время прохождения этих импульсов [4], а при сварке модулированным током — благодаря разнице силового давления дуги во время импульсов и пауз сварочного тока [5, 6]. Использование асимметричного тока также способствует интенсивному перемешиванию расплавленного металла, которое происходит в результате изменения давления дуги при смене полярностей тока [7].

При использовании внешних магнитных полей интенсивность перемешивания жидкого металла сварочной ванны повышается в результате их взаимодействия с объемной электромагнитной силой, возникающей в дуговом промежутке [8–14]. В зависимости от направления линий магнитной индукции магнитное поле может быть продольным или поперечным, а по времени воздействия — постоянным или переменным. Постоянное магнитное поле, воздействуя на дугу, вызывает изменение геометрических размеров и положения дуги, сохраняя их на протяжении всего времени