



# НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **В. А. ЛЕБЕДЕВ**, **С. Ю. МАКСИМОВ**, доктора техн. наук, **А. Н. ТИМОШЕНКО**, канд. техн. наук, **П. В. ГОНЧАРОВ**, **И. В. ЛЕНДЕЛ**, **Р. И. КЛОЧКО**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены вопросы, связанные с получением точечного соединения конструкций на вертикальной плоскости с использованием механизированного оборудования для дуговой сварки в среде защитных газов. Определено, что использование импульсной подачи электродной проволоки с регулируемыми параметрами позволяет существенно упростить процесс получения сварного соединения, обеспечить его необходимое качество и повторяемость результатов. Показаны перспективы применения подобного способа сварки, в том числе и с применением источников сварочного тока с импульсными алгоритмами работы, синхронизированными с импульсной подачей электродной проволоки.

*Ключевые слова:* дуговая точечная сварка, электродная проволока, подача, импульс, управление, формирование, повторяемость, оборудование

Механизированная и автоматизированная дуговая сварка плавящимся электродом в среде углекислого газа получила широкое распространение благодаря целому комплексу положительных свойств: простоте, доступности материалов, сокращению сроков работ и снижению стоимости изготовления конструкций, возможности ведения процесса в различных пространственных положениях и др. Наиболее часто используется процесс с естественными периодическими короткими замыканиями дугового промежутка и переносом электродного металла. При этом качество сварного соединения, экономические показатели процесса в значительной мере зависят от стабильности переноса капель электродного металла [1].

Основными способами стабилизации переноса электродного металла являются [2]:

- выбор оптимальных параметров сварочного процесса и их стабилизация;
- использование активированных электродных проволок;
- применение импульсно-дугового процесса;
- разработка и применение импульсных способов подачи электродной проволоки.

Импульсная подача электродной проволоки с регулируемыми параметрами импульсного движения (частотой, относительной длительностью — скважностью, ускорением) — один из наиболее действенных способов стабилизации характеристик переноса электродного металла с рядом дополнительных эффектов [3]. В частности, это относится к сварке тонкими электродными прово-

локами в среде углекислого газа. В настоящее время имеется достаточно информации о существенном влиянии импульсной подачи на качество сварного соединения, выполняемого в различных пространственных положениях [4–6]. Однако эти данные относятся к сварке на разных режимах швов различной протяженности. Важно и перспективно оценить влияние импульсной подачи электродной проволоки на процесс дуговой точечной сварки (ДТС), что и является целью настоящей работы.

Процесс ДТС — эффективный способ соединения листовых конструкций с элементами рамы при обшивке, например, вагонов, малых судов, других транспортных средств и объектов подобного типа.

При ДТС в нижнем положении в большинстве случаев получить качественное точечное соединение не вызывает особых трудностей. При сварке на вертикали точечное соединение выполнить гораздо сложнее, в частности, если свариваются листы толщиной более 1 мм.

В работе [4] предложен алгоритм выполнения точечного соединения на вертикальной плоскости с использованием ДТС в среде углекислого газа, суть которого состоит в разделении цикла процесса сварки на несколько этапов. В начале цикла осуществляется прожиг обшивочного листа при повышенных значениях тока и напряжения. Затем полученное пространство заполняется электродным металлом и металлом основы, к которой приваривается обшивка. Проблемы возникают как раз во время заполнения пространства прожига.

Основные сложности и возникающие дефекты при выполнении точечного соединения заключаются в нестабильности повторения формы точечного

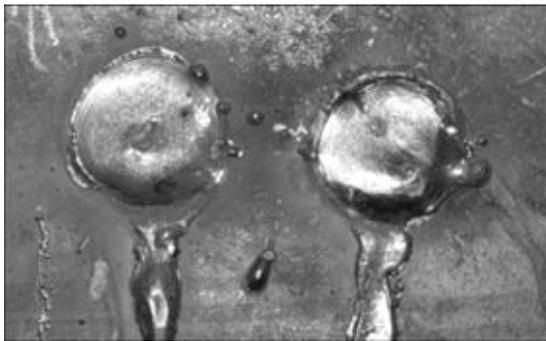


Рис. 1. Внешний вид точки при сварке на вертикальной плоскости со стеканием расплавленного металла и неодинаковым формированием точечного соединения

соединения; короблению обшивочного листа; наплыве и даже стекании металла (рис. 1); отсутствии проплавления металла основы, достаточного для обеспечения прочностных характеристик.

Согласно проведенным исследованиям причинами неудовлетворительного качества точечного соединения, выполненного с использованием дугового процесса, являются:

- нестабильность параметров процесса сварки (в частности, напряжения на дуге), возникающая вследствие ряда естественных причин (изменения реального вылета электродной проволоки, условий токопередачи в токоподводящем наконечнике);
- изменения условий подачи электродной проволоки, приводящие к неконтролируемым колебаниям скорости подачи, а следовательно, тока, влияющего на характеристики плавления;
- нагрев металла от выполнения предыдущих сварных точечных соединений;
- отсутствие регулировки тепловложения в ванну расплавленного металла для выполнения точки.

Математическая модель процесса ДТС, представленная в работе [7], позволила оценить оптимальные параметры внесения тепла, а также остаточные напряжения после сварки. Следствием этой оценки явилась разработка алгоритма подбора сварочных параметров выполнения дугового точечного соединения, включающая несколько циклов синхронного изменения тока и напряжения дугового процесса — модуляцию режима. Это позволяет путем выбора параметров модуляции

осуществить в некоторых пределах регулирование тепловложения в сварочную ванну и несколько стабилизировать процесс выполнения точечного соединения. Однако решить до конца проблемы, связанные с формированием сварного точечного соединения, не всегда удастся. Кроме того, необходимо учитывать еще условия подготовки конструкции к сварке, прежде всего обеспечение плотности прилегания свариваемых поверхностей друг к другу. При этом зазор должен быть не только минимальным, но и стабильным.

Большой проблемой при сварке с эффективной (глубокой) модуляцией режимов является периодическое прерывание горения и возбуждение сварочной дуги, при этом повторное возбуждение дуги, как показали исследования, оказывается не всегда устойчивым из-за образования на торце проволоки капли электродного металла разного размера. Как видно из рис. 2, где представлены различные варианты формы застывшей капли электродного металла, только форма капли 3, 4 позволяет надежное повторное возбуждение дуги.

Исключить основные факторы влияния на формирование точечного соединения можно с помощью способов управления переносом электродного металла, в частности, управляемой импульсной подачи электродной проволоки. На рис. 3 представлен испытательно-исследовательский стенд для отработки режимов сварки точек на вертикальной плоскости. В качестве механизма импульсной подачи использовали новую разработку безредукторного импульсного механизма подачи на основе вентильного компьютеризованного электропривода с широким диапазоном управления параметрами импульсного движения электродной проволоки такими, как шаг, частота, скважность, форма [8], при применении которого до настоящего времени был уже решен ряд задач по формированию сварного соединения протяженными швами, а также энерго- и ресурсосбережению [9].

Следует заметить, что цели управления переносом электродного металла при импульсной подаче электродной проволоки можно считать достигнутыми в том случае, если одному импульсу подачи соответствует акт переноса электродного

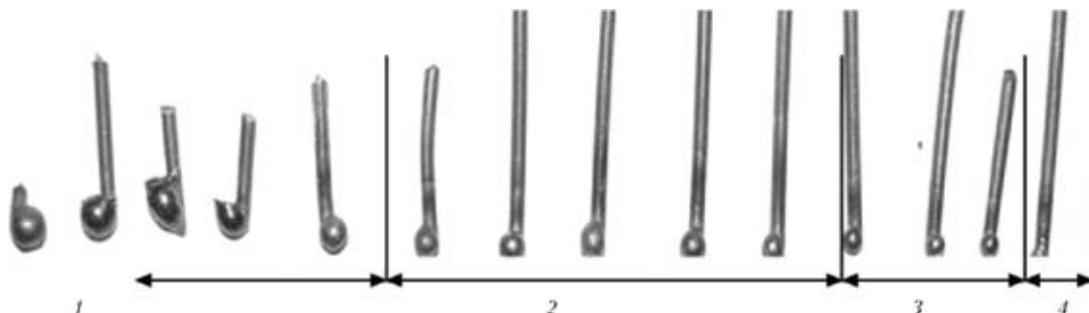


Рис. 2. Внешний вид электродной проволоки диаметром 1,2 мм с застывшей каплей на момент окончания горения дуги: 1, 2 — повторное возбуждение дуги затруднительно; 3, 4 — надежное закигание

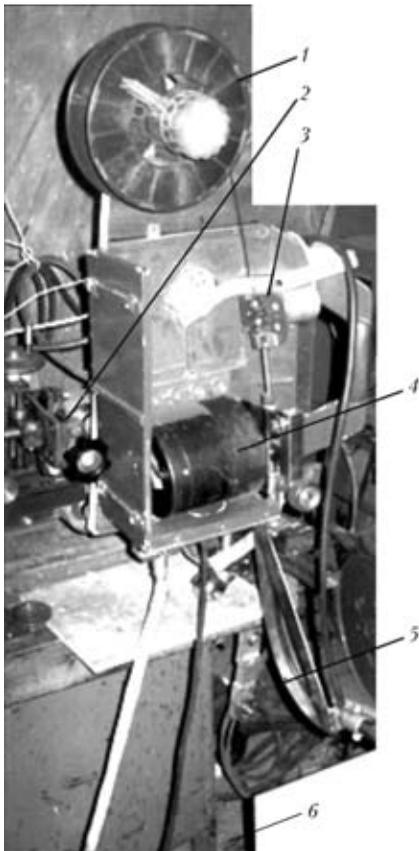


Рис. 3. Стенд для автоматической сварки точками на вертикальной плоскости с импульсной подачей электродной проволоки: 1 — кассета с электродной проволокой; 2 — механизм перемещения горелки; 3 — датчик скорости подачи проволоки; 4 — механизм подачи проволоки; 5 — горелка для сварки на вертикальной плоскости; 6 — изделие

металла. При сварке тонкими проволоками Св-08Г2С в углекислом газе (сварка короткой дугой) этот перенос происходит в момент короткого замыкания дугового промежутка. В иных видах управляемого переноса процесс сопряжен со значительными затратами энергии и должен решаться другим комплексом оборудования, сочетающим импульсные алгоритмы источника сварочного тока и импульсного механизма подачи электродной проволоки.

Цикл получения сварного точечного соединения укрупненно можно разбить на два этапа: прожог привариваемого металла на повышенном режиме процесса и формирование точечного соединения.

На стенде обрабатывали второй этап сварки точечного соединения с использованием импульсной подачи электродной проволоки. Целью экспериментального исследования явилось выявление возможности стабилизации постановки точечного соединения на вертикальной плоскости в этом способе сварки. При этом одной из основных задач, которую необходимо было решить, явилось определение параметров импульсной подачи, оказывающих наиболее существенное влияние на процесс и оптимизацию важнейших характерис-

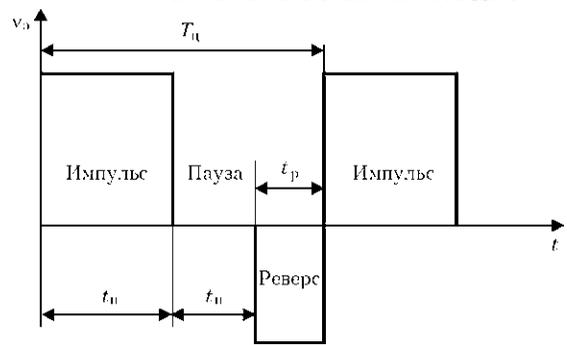


Рис. 4. «Идеальная» циклограмма импульсной подачи ( $v_3$  — скорость подачи;  $t_p$ ,  $t_{и}$ ,  $t_{п}$  — время действия реверса, импульса и паузы соответственно;  $T_{ц}$  — время цикла импульсной подачи)

тик точечного соединения, возможность их многократного воспроизведения с минимальными отклонениями в размерах и проплавлении.

Для работы использовали применяемые в транспортном машиностроении сочетания сталей Ст3 и 09Г2С толщиной 1,0 + 4,0 и 2,5 + 7,0 мм. Сварку вели проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм с рекомендованными расходами углекислого газа на режимах: для соединения металлов толщиной 1,0 + 4,0 мм напряжение сварки 26...28 В, среднее значение тока сварки для всех исследуемых параметров импульсной подачи 160 А; для соединения металлов толщиной 2,5 + 7,0 мм напряжение сварки 28...30 В, среднее значение тока 200 А.

На рис. 4 представлена «идеальная» циклограмма импульсной подачи. Исходя из имеющегося опыта применения импульсной подачи электродной проволоки [10] использовали следующие регулируемые параметры: частоту, скважность, шаг, скорость подачи в импульсе и при реверсе подачи. При этом скважность в соответствии с обозначениями на рис. 4 можно определить следующим соотношением:

$$S = T_{ц}/t_{и}$$

Влияние частот исследовали в диапазонах 1...10; 20...30; 40...60 Гц. При этом эксперименты проводили со скважностью  $S = 2$  и двумя вариантами изменения импульсной подачи электродной проволоки: 50 % времени импульс, 40 — пауза, 10 — реверс; 50 % времени импульс, 50 — пауза.

На рис. 5 представлена характерная осциллограмма с импульсом и паузой процесса ДТС, выполняемой на вертикальной плоскости с частотой импульсной подачи 40 Гц и скважностью  $S = 2$ . Анализ осциллограмм свидетельствует о высокой степени стабильности процесса переноса (один импульс подачи — одна капля электродного металла), а следовательно, о стабильности процесса в целом.

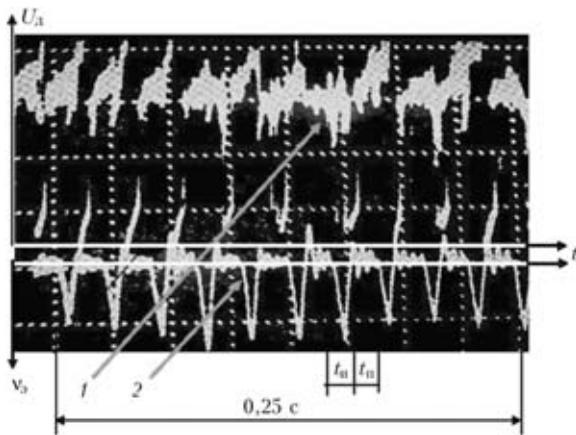


Рис. 5. Осциллограммы процесса сварки с частотой импульсной подачи электродной проволоки 40 Гц и скважностью  $S = 2$ : 1 —  $U_d$ ; 2 —  $v_d$

На частотах в диапазоне 1...10 Гц получить стабильный процесс с формированием сварной точки не удалось — наблюдалось сильное разбрызгивание и потеки металла из расплавленной ванны. На частотах 20...30 Гц процесс сварки более управляем, сварная точка формируется, но происходит достаточно интенсивное разбрызгивание электродного металла и металла ванны. Наиболее качественное формирование сварной точки получено на частотах в диапазоне от 40...60 Гц, а при частоте 60 Гц процесс сварки имеет наилучшие показатели с минимальным (не более 2...3 %) показателем разбрызгивания. Результатом такого алгоритма функционирования механизма управляемой импульсной подачи является повторяемый ряд точек без потеков металла, представленный на рис. 6. Получены точки диаметром 12 мм с хорошим внешним видом, отклонениями не более  $\pm 0,7$  мм и стабильным гарантированным проплавлением основного металла, обеспечиваю-

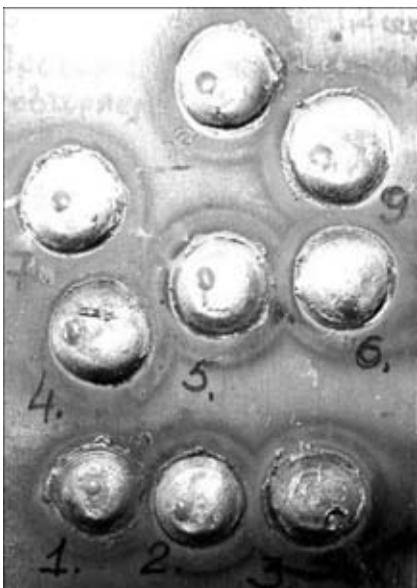


Рис. 6. Внешний вид точек, полученных с импульсной подачей электродной проволоки частотой 40 Гц

щим требуемые механические свойства сварного соединения (усилия на срез, отрыв и др.). Разрушающее усилие на срез для толщины соединяемых образцов 1,0 + 4,0 мм составляло 14600...16000 Н, на отрыв 12450...14700 Н, диаметр ядра сварной точки 5,2 мм; для толщин 2,5 + 7,0 мм усилие на срез было в пределах 16900...22000 Н, на отрыв 15000...20000 Н, диаметр ядра сварной точки 8,5 мм. Геометрические размеры ядер точечных соединений соответствуют ГОСТ 14776-79 («Дуговая сварка. Соединения сварные точечные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры»).

Объяснением неудовлетворительного течения процесса сварки точки на частотах подачи до 20 Гц является не показатель частоты как таковой, а излишне большой шаг подачи электродной проволоки, который неизбежен из условий обеспечения заданной интегральной скорости подачи, а следовательно, средний ток дугового процесса, который обеспечивает новая разработка использованного современного компьютеризованного вентильного электропривода.

Важным обстоятельством применения импульсной подачи электродной проволоки является четкое повторное возбуждение дуги при технологическом прерывании процесса (дополнительное низкочастотное управление тепловложениями в ванну). Это возможно при той форме капли металла, которая представлена на рис. 2, поз. 3, 4.

Следует отметить, что в процессе работы фиксировались уровни прямых затрат электроэнергии на ведение процесса сварки. При этом такие затраты сравнивали для процесса с конвенциональной подачей электродной проволоки при одних и тех же расходах электродной проволоки. Определено, что при частоте импульсной подачи 40 Гц и  $S = 2$  прямая экономия электроэнергии составляет 15...20 %, при этом очевидно, что в этих пределах происходит снижение тепловложения в ванну расплавленного металла, что для данной работы является актуальным.

Влияние параметров импульсной подачи на формирование сварного соединения и проплавление можно оценить по макрошлифам поперечного сечения сварных точек, представленных на рис. 7.

Продолжение работ в данном направлении связано с другими наборами толщин свариваемого материала, использованием большего разнообразия параметров импульсной подачи и режимов сварки на основе методов математического планирования экспериментов.

Дальнейшее совершенствование технологии ДТС, в том числе на вертикальной плоскости, связано с новыми видами оборудования и возможностями получения комбинированных импульсных воздействий. В работе [11] проанализиро-

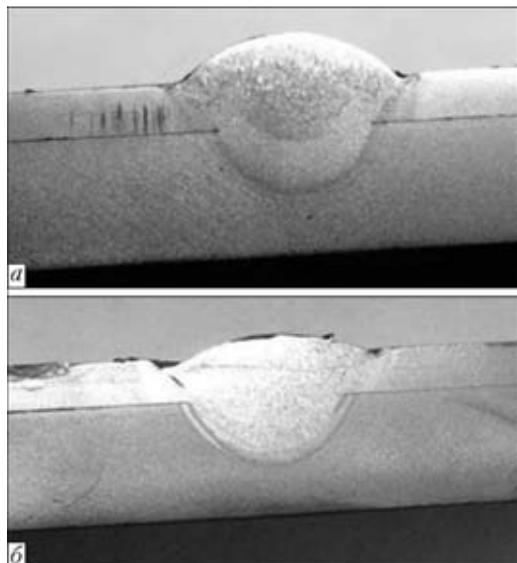


Рис. 7. Поперечный макрошлиф точки сварного соединения листов 2,5 + 7,0 мм с частотой импульсной подачи электродной проволоки 60 (а) и 40 (б) Гц и скважностью  $S = 2$

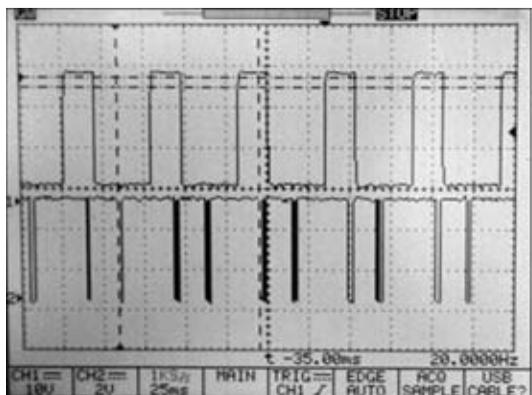


Рис. 8. Осциллограммы синхронного формирования импульсов механизма подачи электродной проволоки 1 и источника сварочного тока 2 для совместного воздействия на перенос электродного металла

ваны возможности влияния на процесс дуговой механизированной сварки комбинированного импульсного воздействия от импульсного механизма подачи электродной проволоки и импульсного источника сварочного тока с импульсными составляющими тока в выходном напряжении. Ранее техническая реализация этого способа сварки не могла быть осуществлена в полном объеме, так как при создании оборудования для выполнения этого решения возникает несколько достаточно сложных технических задач, основными из которых являются регулирование параметров импульсов для эффективного воздействия на расплавленную каплю, а также установление и поддержание порядка следования импульса от механизма подачи и источника. Упомянутые в настоящей работе новые типы безредукторных механизмов подачи электродной проволоки и современных источников сварочного тока инверторного типа с регулируемыми параметрами импуль-

сных воздействий, разработка специального программного обеспечения и ряда специальных технических средств позволяют решить эти задачи, обеспечивая новые возможности сварки.

На рис. 8 представлены осциллограммы импульсных выходных воздействий от механизма подачи и источника, алгоритмически согласованных по параметрам и фазовом сдвиге друг относительно друга.

## Выводы

1. Выполнение точечного нахлесточного соединения тонкой электродной проволокой в среде углекислого газа сопряжено с рядом трудностей (неудовлетворительным формированием сварной точки, протеканием основного и электродного металлов, низкой повторяемостью результатов), обусловленных как возможностями самого процесса, так и сложностями подготовки конструкции под сварку (прижим листов в месте постановки точки).

2. Импульсная подача электродной проволоки при сварке сталей в среде углекислого газа точками нахлесточных соединений на вертикали оказывает существенное влияние на стабилизацию процесса, формирование сварного соединения, его повторяемость, существенно улучшая эти характеристики процесса при оптимально выбранных параметрах импульсной подачи.

3. Выполненные исследования, подтвержденные экспериментальной проверкой, показывают, что способ получения сварных точечных соединений с импульсной подачей электродной проволоки уже на данном этапе может быть предложен для применения в промышленном производстве сварных конструкций и имеет продолжение по диапазону режимов, параметров и сочетаний с другими технологическими решениями.

4. Дальнейшим усовершенствованием технологии ДТС, а также стабилизации переноса электродного металла является объединение процессов импульсной подачи электродной проволоки с наложением импульсов тока.

1. *Потаповский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Ч.1. Сварка в активных газах. — 2-е перераб. изд. — Киев: ЭкоТехнологія, 2007. — 192 с.
2. *Лебедев В. А.* Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла (Обзор) // Автомат. сварка. — 2010. — № 10. — С. 46–53.
3. *Лебедев В. А., Гедрович А. И.* Техника и технология дуговой сварки и наплавки (нестационарные процессы и режимы работы). — Луганск: Ноулидж, 2010. — 255 с.
4. *Лобанов Л. М., Гончаров П. В., Тимошенко А. Н.* Дуговая точечная сварка нахлесточных соединений в вертикальном положении // Автомат. сварка. — 2009. — № 1. — С. 34–37.
5. *Pekoz T., McGuire W.* Welding of sheet steel // Proc. Fifth intern. spec. conf. on cold-formed steel structures. — St. Louis, 1980.
6. *Snow G. L., Easterling W. S.* Strength of arc spot welds made in single and multiple steel sheets // Proc. nineteenth



- intern. spec. conf. on cold-formed steel structures. — St. Louis, 2008.
7. *Совершенствование технологии дуговой точечной сварки нахлесточных соединений по результатам математического моделирования* / О. В. Махненко, П. В. Гончаров, А. Н. Тимошенко, А. Ф. Мужиченко // Автомат. сварка. — 2010. — № 11. — С. 28–34.
  8. *Лебедев В. А., Рышиа В. В., Радимов И. Н.* Современные вентиляльные электроприводы в системах механизированного сварочного оборудования // *Электромашиностроение та електрообладнання*. — 2009. — Вип. 74. — С. 22–24.
  9. *Анализ* технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б. Е. Патон, В. А. Лебедев, В. Г. Пичак и др. // *Свароч. пр-во*. — 2002. — № 2. — С. 24–31.
  10. *Лебедев В. А.* Особенности сварки сталей с импульсной подачей электродной проволоки // Там же. — 2007. — № 8. — С. 30–35.
  11. *Патон Б. Е., Лебедев В. А., Микитин Я. И.* Способ комбинированного управления процессом переноса электродного металла при механизированной дуговой сварке // Там же. — 2006. — № 8. — С. 27–32.

The paper deals with the issues related to making a spot joint of structures on a vertical plane, using mechanized equipment for gas-shielded arc welding. It is established that application of pulsed feed of electrode wire with controllable parameters allows an essential simplification of the process of producing the welded joint and ensuring its required quality and repeatability of the results. Prospects for application of such a welding process are shown, in particular with welding current sources with pulsed operating algorithms, synchronized with pulsed feed of electrode wire.

Поступила в редакцию 28.11.2011

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ И СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ НАПЛАВКИ ДЕТАЛЕЙ С ВЫСОКИМИ УСТАЛОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

*Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (рук. темы — д-р техн. наук. И. А. Рябцев)*

*На основе современных моделей вязкопластического неизотермического течения, термомеханических диаграмм распада аустенита наплавленного и основного металлов с использованием численного метода конечных элементов разработана методика расчета, которая в рамках единой модели позволяет рассчитывать напряженно-деформированное и структурное состояние деталей при одно- и многослойной наплавке и их влияние на усталостную долговечность при циклических термомеханических нагрузках после наплавки и в процессе эксплуатации.*

*Разработан и экспериментально подтвержден новый способ повышения термической стойкости наплавленных деталей за счет наплавки подслоя из низкоуглеродистой низколегированной стали, которая имеет высокую пластичность и усталостную прочность. Расчет напряженно-деформированного и структурного состояния в процессе наплавки и эксплуатационных циклических термических нагрузок деталей типа прокатных валков, наплавленных инструментальной сталью без и с пластическим подслоем, показал, что за счет релаксации напряжений наплавка с пластическим подслоем обеспечивает снижение на 25...30% напряжений в наиболее нагруженном внешнем рабочем слое, в результате чего на 30...35% повышается термическая стойкость наплавленной детали. Расчеты подтверждены экспериментальными исследованиями термической и механической усталостной долговечности наплавленных деталей.*

*Исследование позволило разработать новые наплавочные материалы и технологии наплавки деталей, которые эксплуатируются в условиях изнашивания и циклических механических или термомеханических нагрузок: приводного вала-шестерни и зубчатого венца мельницы самоизмельчения; стальных валков трубопрокатного состояния ТПА 30-102 и листопрокатных состояний; штампов, деталей крана МКТ-250 и др.*