

# ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ (Обзор)

В.А. Лебедев<sup>1</sup>, С.В. Драган<sup>2</sup>, Г.В. Жук<sup>1</sup>, С.В. Новиков<sup>1</sup>, И.В. Симутенков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова,  
54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

Рассмотрены и проанализированы основные технические средства и способы импульсного управления процессом дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, разработанные в последнее время в ИЭС им. Е.О. Патона и Национальном университете кораблестроения им. адмирала Макарова. Значительное внимание уделено способам с использованием систем импульсного воздействия на процессы переноса электродного металла, формирование сварных швов и структуру наплавленного металла. Показана перспективность применения систем с импульсной, дозированной подачей электродной проволоки, приведены результаты эффективного управления сварочными и наплавочными процессами. Рассмотрены способы дуговой сварки с импульсной подачей защитного газа и с двухструйной газовой защитой и указаны проблемы, препятствующие широкому использованию этих способов. Приведены результаты некоторых исследований по влиянию внешних электромагнитных воздействий на перенос электродного металла, формирование и кристаллизацию швов и приведены примеры эффективного применения данного способа управления сварочным процессом. Выполнен анализ способов механического воздействия на сварочный процесс с использованием различных систем колебателей. Показана возможность комбинированного управления переносом электродного металла, формированием наплавленного валика и структурой его металла в зависимости от схемы ввода колебаний и параметров колебательного процесса. Указано на перспективность применения способа для наплавочных работ. Библиогр. 34, табл. 2, рис. 12.

*Ключевые слова:* сварное соединение, свойства, управление, технические средства, анализ, применение

Сварка и родственные технологии непрерывно, активно и всесторонне развиваются. Создаются теоретические и технологические предпосылки, технические разработки для изготовления новых изделий в традиционных областях сварочного производства, а также освоение других сфер применения, которые ранее считались недоступными для широкого круга задач, например, подводная сварка мокрым способом [1].

Сварной шов, наплавленный слой являются результатом, достигаемым посредством механизированного или автоматического оборудования для дуговой сварки и наплавки. От структуры наплавленного металла и зоны термического влияния, формы поверхности шва, геометрических параметров зоны проплавления зависят эксплуатационные (служебные) характеристики сварных, восстановленных или упрочненных изделий (конструкций) [2].

Существует достаточно много способов и методов влияния на характеристики сварного соединения или наплавленного слоя, среди которых технологические, технические и такие, которые связаны с электродными материалами и защитными средами. При этом следует учитывать также влияние свариваемого материала, условий и среды, в которой осуществляется дуговой процесс.

Цель настоящей работы — анализ и перспективы применения технических средств, входящих в системы сварочного оборудования, а также вспомогательных систем.

Для анализа основных технических средств, используемых для импульсного управления параметрами сварного шва и наплавленного слоя, рассмотрены разработки ИЭС им. Е.О. Патона и НУК им. адмирала Макарова. Укрупнено разнообразие технических средств и представлено на рис. 1.

Широкое распространение в сварочном и наплавочном оборудовании любого назначения, реализующие электродуговой процесс с использованием плавящегося электрода, получили импульсные источники сварочного тока инверторного типа. Форма импульсов выходного напряжения, их частота зависят от решаемых задач. В основном это задачи по управлению переносом электродного металла, в том числе и создание условий для оптимального перехода капель расплавленного металла в жидкую ванну.

Широко распространены процессы с алгоритмами управления, где используются в разных вариантах обратные связи [3]. В качестве примера отметим процесс переноса капель электродного металла при непрерывной подаче электродной проволоки, в котором на стадии формирования капли стабилизируется напряжение источника, а



Рис. 1. Технические средства воздействия на свойства шва или наплавленного слоя

на стадии разрыва шейки капли между электродом и ванной подается импульс тока (рис. 2) [4].

Импульсное воздействие источника сварочного тока позволяет:

управлять переносом электродного металла путем отрыва капли и ее транспортирования в сварочную ванну как основное воздействие импульса тока дугового процесса;

создавать вибрационные колебания ванны расплавленного металла как сопутствующее воздействие электродинамических сил.

Управляемый перенос электродного металла можно также получить, используя импульсную подачу электродной проволоки. Это направление получает все большее распространение, что во многом определяется возможностями совершенствования технических средств и технологическими разработками в этом направлении. Можно отметить различные конструкции механических безредукторных преобразователей вращательного движения вала приводного электродвигателя в импульсы перемещения движителей проволоки [5]. Такие технические решения позволяют задавать заранее выбранный режим подачи электродной проволоки по шагу перемещения и скважности

импульсов. Однако такие конструкции ограничены в применении. Исключение составляют устройства импульсной подачи с квазиволновым преобразователем [6]. Как правило, в качестве приводных электродвигателей в таких устройствах применяются достаточно дешевые коллекторные электродвигатели постоянного тока.

В настоящее время разработаны и продолжают развиваться системы импульсной подачи с применением бесколлекторных электродвигателей – шаговых и вентильных, параметры работы которых обуславливаются программно на основе цифровых систем управления. Использование таких электродвигателей предполагает безредукторную конструкцию механизма подачи проволоки, что повышает быстродействие системы. В качестве электроприводов с шаговыми электродвигателями, в основном, используются серийно выпускаемые комплекты. Такие комплекты с успехом использованы в автомате для подводной сварки мокрым способом [7] и в других типах оборудования [8].

Электроприводы с вентильными электродвигателями и цифровым управлением разрабатывались в Украине специально для сварочного оборудования различного назначения [9], но наибольшее распространение они получили в системах подачи электродной проволоки для реализации импульсного движения с управляемыми характеристиками, например, для сварки в водной среде мокрым способом. Возможности влияния импульсной подачи на формирование валиков иллюстрируют примеры наплавки в воде порошковой проволокой (рис. 3). При этом снижается количество неметаллических включений, улучшаются механические свойства наплавленных слоев.

Современные вентильные электроприводы обеспечивают частоту импульсной подачи элект-

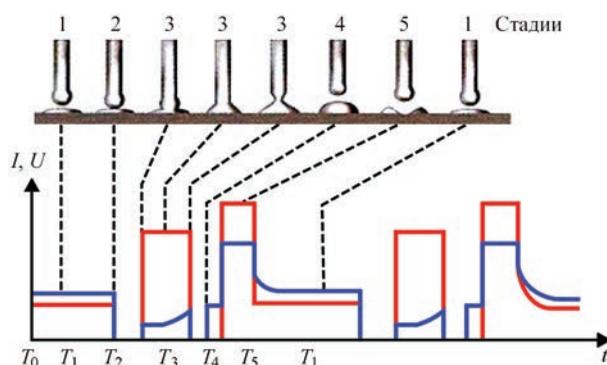


Рис. 2. Алгоритм работы системы управления импульсного источника сварочного тока

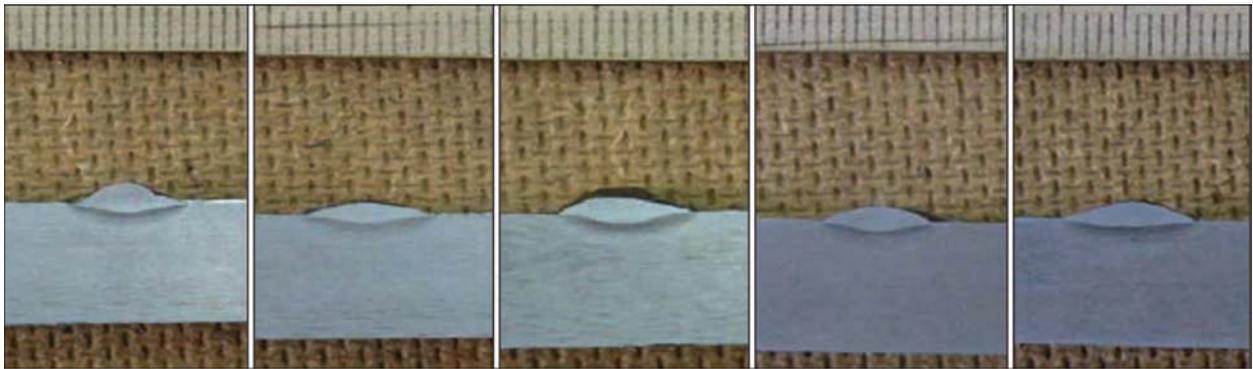


Рис. 3. Микршлифы валиков, наплавленных с управляемыми импульсами подачи электродной проволоки

родной проволоки до 50...60 Гц с регулируемы-ми параметрами (шаг, амплитуда, скважность) и возможность реверса движения в цикле импульса подачи. Кроме того, в регулятор вентильного электропривода может быть введен сигнал обратной связи по параметрам дугового процесса. Примером может служить привод с обратной связью по току или напряжению, реализующий дозированную подачу электродной проволоки [10, 11]. Изменяя параметры дозированной подачи электродной проволоки, можно управлять формой шва при неизменных параметрах режима сварки или наплавки (среднего тока, напряжения и скорости перемещения дуги).

Также одним из базовых эффектов при импульсной подаче проволоки является возможность получения дезориентированной структуры наплавленного металла. Детальные металлографические исследования образцов, наплавленных в одинаковых условиях и с одинаковыми энергетическими параметрами процесса, но с использованием разных способов подачи проволоки, свидетельствуют о существенных изменениях в структуре металла наплавки, снижении количества неметаллических включений [12].

Следует также отметить большую стабильность процесса переноса металла при применении

систем с дозированной подачей проволоки. На осциллограммах процесса наплавки, осуществляемого с дозированной подачей проволоки (рис. 4), наблюдается четкая регулярность управляемого переноса электродного металла, что в итоге приводит к улучшению структуры металла. Вместе с тем наблюдается снижение степени выгорания легирующих элементов. Полученные дуговой сваркой швы и наплавленные слои имеют также улучшенные механические свойства, например, прочность, износостойкость и вязкость [13].

Доказательством эффективности применения дозированной подачи электродной проволоки могут служить результаты сварки (наплавки) электродной проволокой диаметром 1,0 мм пластин толщиной 0,9 мм из алюминиевого сплава (рис. 5) [14]. Соединения по показателям качества практически не отличаются от швов, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, но по производительности процесс с дозированной подачей электродной проволоки в 1,5...2,0 раза превосходит аргонодуговую сварку.

Относительно новыми способами управления процессом дуговой сварки является импульсная подача защитного газа и с двухструйной газовой защитой.

Во время импульса подачи защитного газа возрастает скорость истечения газового потока из

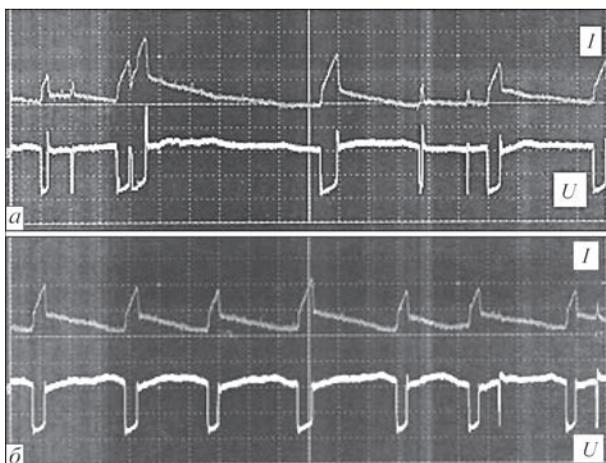


Рис. 4. Осциллограммы процесса наплавки с подачей электродной проволоки: а — непрерывной; б — дозированной

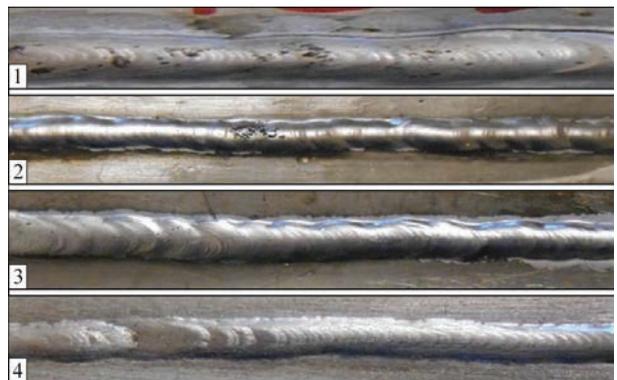


Рис. 5. Внешний вид валиков, полученных с дозированной подачей электродной проволоки, на тонколистовых металлоконструкциях: 1 — наплавка полуавтоматом; 2, 3 — сварка полуавтоматом стыкового шва; 4 — наплавка автоматом

сопла, растет газодинамическое давление на каплю у торца электродной проволоки и в ванну переходят более мелкие капли, но с большей частотой [15]. При этом, вследствие снижения времени перехода капли в жидкую ванну, изменяется интенсивность выгорания легирующих элементов.

Среди различных вариантов импульсной подачи защитных газов основными являются два: с подачей одного типа газа и с поочередной подачей нескольких типов газов, причем второй вариант более эффективен. Показано в работе [16], что при подаче поочередно аргона и гелия получается новый технологический процесс, в котором благодаря импульсному изменению давления в дуговом промежутке (из-за разной плотности и потенциалов ионизации аргона и гелия) возникает эффект импульсного воздействия на сварочную ванну. Это способствует получению металла сварного шва и наплавленного слоя с мелкозернистой структурой металла с высокими показателями пластичности и прочности металла.

Внешний вид швов (форма поверхности, чешуйчатость) зависят не только от рода защитного газа, но и от частоты импульсной подачи. Подача газа с частотой импульсов до 20 Гц оказывает преимущественное влияние на геометрию шва [17–19].

Несмотря на очевидные достоинства дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей защитного газа, широкому распространению способа, по нашему мнению, препятствует инерционность системы подачи защитного газа. При этом размещение газового клапана даже непосредственно у сопла не может эффективно решить проблему. Следует также учитывать то, что с увеличением частоты импульсной подачи сложнее обеспечить подачу защитных газов отдельными порциями без смешения.

Процесс сварки с двухструйной газовой защитой интересен с точки зрения влияния на сварной шов и совершенствование системы подачи защитного газа [20]. При таком способе сварки внутрен-

няя струя газа защитного охватывается наружной струей, которая стабилизирует внутреннюю струю, снижает ее турбулентность, ограничивает подсос воздуха в зону горения дуги и обеспечивает защиту околошовной зоны. Повышенное газодинамическое давление внутренней газовой струи способствует охлаждению капли расплавленного электродного металла при движении от торца электрода и снижает выгорание легирующих элементов. В сварочной ванне происходит более интенсивное перемешивание основного и электродного металлов.

Большой интерес представляют разработки систем сварочного оборудования с комбинированными воздействиями на сварочный процесс, формирование сварного соединения и наплавленного слоя. В работе [21] исследованы технические возможности использования способа управления переносом электродного металла при одновременном воздействии на плавление электродной проволоки источника сварочного тока и механизма импульсной подачи с различными алгоритмами работы. Для экспериментальных исследований использовали механизм импульсной подачи с односторонними захватами и электромагнитами, позволяющий синхронизировать импульсы подачи проволоки с частотой питающей сети [22].

Установлено, что импульс тока всегда должен предвзвешивать импульсное движение электродной проволоки. При оптимальных параметрах синхронизации достигается управляемый перенос электродного металла при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка и, в ряде случаев, возможен управляемый перенос без фазы короткого замыкания с потерями электродного металла менее 3 %. Используя импульсную подачу, можно управлять формированием сварного соединения (рис. 6).

В целом, преимущества применения комбинированного импульсного воздействия источника сварочного тока и механизма подачи электродной проволоки заключаются в следующем:

- расширяется диапазон устойчивых режимов сварки, возможность управления геометрическими характеристиками сварного соединения и наплавленного слоя;
- достигается высокий уровень управления переносом электродного металла как при сварке с короткими замыканиями, так и без него;
- облегчаются условия работы импульсных механизмов подачи, так как нет необходимости формирования импульсов с высокими значениями ускорений движения проволоки в импульсе;
- решаются на достаточно высоком уровне задачи структуризации металла шва со снижением

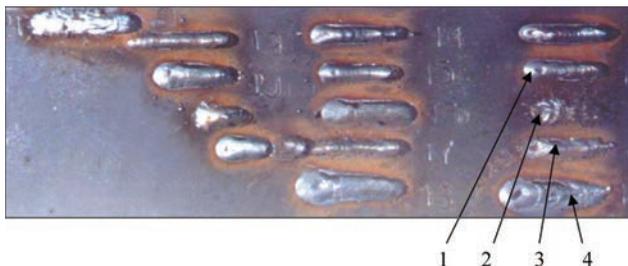


Рис. 6. Валики, наплавленные при различных параметрах процесса управления переносом электродного металла за счет комбинированного воздействия импульсов источника тока и механизма подачи электродной проволоки (1–4 — неэффективная синхронизация импульсов)

размеров кристаллов и соответствующим повышением механических свойств свариваемого или наплавляемого изделия;

– капля электродного металла меньшее время находится в зоне действия высоких температур, а, следовательно, снижено выгорание легирующих элементов.

Задача комбинированного воздействия на перенос металла решена в ИЭС им. Е.О. Патона при разработке нового способа дуговой механизированной и автоматической сварки с дозированной подачей электродной проволоки. При этом используются обратные связи по параметрам дугового процесса для подачи импульса тока от источника питания в любое время на этапе действия импульса подачи электродной проволоки. Это перспективное направление, которое может найти применение при сварке и наплавке разных сталей и сплавов алюминия и с использованием как сплошных, так и порошковых электродных проволок.

Продолжаются исследовательские работы в направлении, связанном с комбинированным импульсным воздействием от источника сварочного тока и системы импульсной подачи защитного газа. Некоторые результаты исследований [18] содержат материалы по двум способам сварки: с переменной подачей нескольких видов защитных газов и импульсно-дугового процесса с импульсной подачей защитного газа.

Комбинированное воздействие на процесс сварки по второму способу обеспечивает формирование шва с высоким качеством поверхности и оказывает положительное влияние на структуру металла шва, улучшая его механические характеристики.

К общим недостаткам описанных выше оригинальных способов сварки с комбинацией импульсных воздействий защитного газа и источника сварочного тока можно отнести, учитывая инерционность системы подачи газа, сложность в выборе газовой аппаратуры, а также определенные проблемы в обеспечении синхронизации работы источника сварочного тока и системы подачи защитного газа.

Далее рассмотрим перспективные разработки по управлению формированием сварного соединения и наплавленного слоя с помощью технических средств, которые, как правило, не входят в число основных систем сварочно-наплавочного оборудования и используются для существенного повышения их эффективности. Особенно следует отметить тот факт, что различные способы влияния на формирование сварочной ванны при помощи технических средств, реализующие раз-

личного рода импульсные или колебательные воздействия, отличаются по частотному спектру их эффективного воздействия, так как часть из них действует на весь объем расплавленного металла, а часть — локально.

Колебания горелки сварочного автоматизированного оборудования проводят, в основном, с целью заполнения широких разделок или увеличения ширины наплавленного валика [23]. Частота этих колебаний обычно составляет 0,2...2,0 Гц и ограничивается инерционными свойствами колебательной системы горелки. Сопутствующий результат работы колебателей горелок — влияние на структуру металла шва и наплавленного слоя. Установлено, что поперечные колебания дуги позволяют уменьшить дендритную неоднородность металла шва и ширину зоны термического влияния, что способствует улучшению механических свойств сварного шва и наплавленного слоя [24]. Поперечные колебательные движения горелки могут быть осуществлены двумя основными способами — качаниями горелки или параллельными смещениями каретки с закрепленной на ней сварочной горелкой. В первом случае изменяется вылет электродной проволоки, что также оказывает влияние на формирование сварного соединения или наплавленного валика.

Примером оригинального и эффективного применения колебаний горелки для решения задачи сварки по увеличенному зазору является разработка устройства для вварки заглушек внутри трубы диаметром 157 мм и толщиной стенки 10 мм в жидкой среде мокрым способом на глубине более 200 м, выполненная в ИЭС им. Е.О. Патона [25]. Колебания горелки осуществляются от привода механизма подачи электродной проволоки посредством специального эксцентрикового механизма, позволяющего регулировать амплитуду колебаний. Особенности и результаты сварки с применением разработанного колебателя горелки иллюстрирует рис. 7.

В частности, на осциллограмме (рис. 7, б) отчетливо видны импульсы тока дугового процесса, возникающие вследствие изменения вылета электрода в крайних точках колебаний. Такие импульсы близки к импульсам тока при сварке с модуляцией режима и оказывают соответствующее влияние на характеристики сварного шва.

Кратко остановимся на рассмотрении известных систем управления сварочным процессом и формированием сварного соединения и наплавленного слоя с использованием магнитных полей [26]. Зачастую сложность применения этих технических систем ограничивает их установку в системах автоматического оборудования для

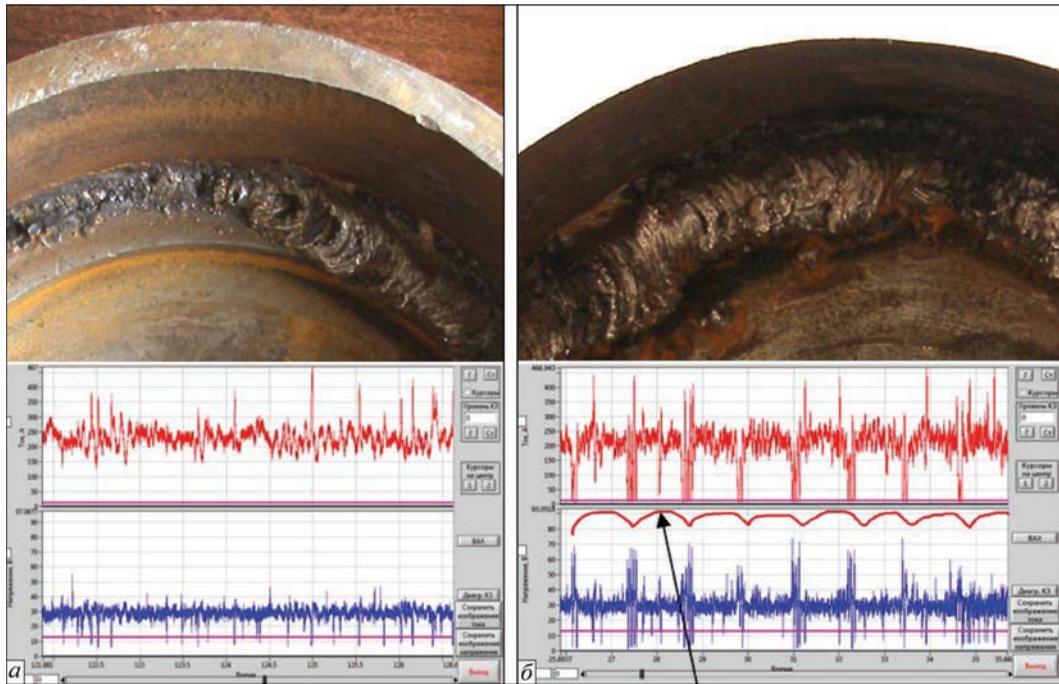


Рис. 7. Внешний вид швов и осциллограммы тока и напряжения при варке заглушки: *а* — обычный процесс; *б* — с колебаниями горелки (стрелкой показано колебание токоподвода)

сварки и наплавки, однако, в ряде случаев их использование необходимо и имеет дальнейшую перспективу.

Эффективность управления указанными процессами с помощью внешних импульсных магнитных полей доказана экспериментально [27]. Установлено, что применение аксиальных импульсных полей позволяет не только управлять частотой переноса и размерами капель электродного металла, но и изменять тип переноса, например, с крупнокапельного на струйный. С повышением частоты электромагнитных импульсов снижаются потери металла электродной проволоки на разбрызгивание. Управляемое электромагнитное поле, воздействуя на жидкий металл сварочной ванны, обеспечивает возможность изменения геометрии шва и тем самым служит средством повышения стойкости металла против горячих трещин.

При наплавочных работах для получения требуемой структуры и геометрии наплавленного слоя используют различные методы, основанные на регулировании тепловложения в обрабатываемый металл и физико-химическом воздействии на дугу и сварочную ванну [13, 28]. Управление структурой обеспечивает необходимые механические характеристики металла наплавки, а управление размерами проплавления способствует повышению производительности наплавочного процесса и сокращению участия основного металла в наплавленном слое.

На решение этого комплекса задач направлены работы, связанные с созданием высокочастотного

непосредственного (без дополнительных преобразователей) колебателя электродной проволоки с использованием новых технических средств и оригинального применения ряда физических эффектов [29, 30]. Механический генератор высокочастотных колебаний электрода обеспечивает комбинированное воздействие, при котором реализуются условия одновременного управления переносом металла через дугу и геометрией наплавленного слоя при автоматической наплавке под флюсом.

Генератор отличается способностью создания высокочастотных колебаний электрода, состоящих из двух гармоник с необходимыми значениями частоты и амплитуды. Гармоника с большей частотой обеспечивает повышение стабильности плавления электрода, а гармоника с меньшей частотой, но большей амплитудой, способствует увеличению ширины наплаваемого валика и уменьшению глубины проплавления основного металла. Усовершенствованная конструкция механического генератора колебаний (рис. 8) позволяет, в отличие от предыдущих разработок, создавать колебания электрода вдоль или поперек наплаваемого валика и регулировать их амплитуду независимо от технологически обусловленной величины вылета электрода [31].

Размещение механического генератора на стандартном оборудовании для автоматической сварки позволяет достичь следующих результатов в зависимости от амплитудно-частотных характеристик создаваемых колебаний:

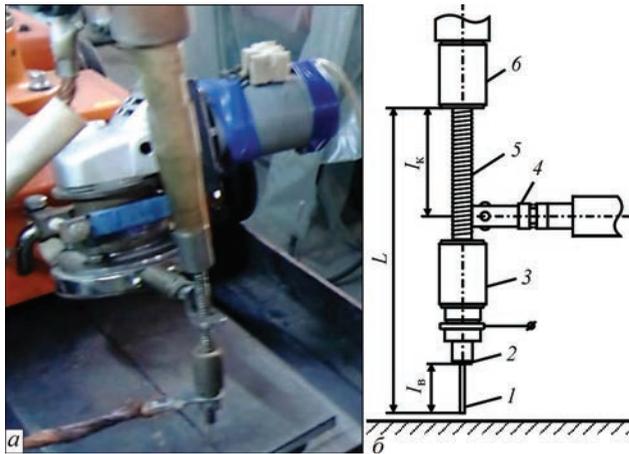


Рис. 8. Общий вид устройства (а) и схема создания высокочастотных колебаний электродной проволоки (б): 1 — электродная проволока; 2 — токоподвод; 3, 6 — узлы крепления токоподвода; 4 — вибрационный узел механического генератора; 5 — гибкая спираль;  $L$  — длина подвижной (эластично закрепленной) части токоподвода с электродом;  $l_k$  — плечо приложения усилия от механического генератора;  $l_v$  — вылет электрода

- обеспечить микрокапельный перенос металла в результате гравитационно-капиллярного распыления;
- управлять переносом металла;
- управлять геометрией наплавляемого слоя за счет рассредоточения теплового потока.

Возможности комбинированного управления характеристиками наплавочного процесса с помощью высокочастотных поперечных механических колебаний электрода можно оценить по результатам, представленным в табл. 1 [32]. Особенно существенное влияние оказывают колебания с частотами, близкими к резонансным.

Учитывая хорошие технологические результаты (структура металла, геометрические параметры наплавленных слоев), полученные при наплавке с высокочастотными управляемыми колебаниями электродной проволоки, считаем целесообразным применить их и в других процессах с использованием плавящегося электрода.

В ИЭС им. Е.О. Патона ведутся работы по применению других колебательных процессов, в том числе и с более низкой частотой. Отмечено выше,

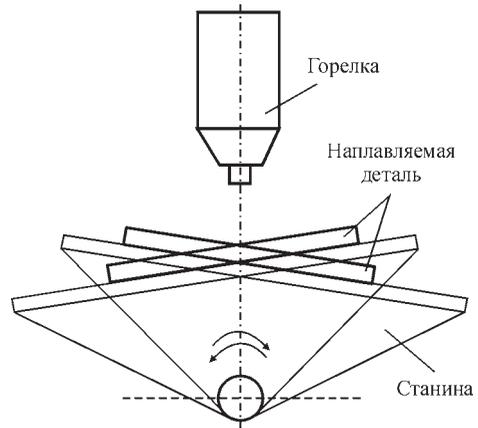


Рис. 9. Схема гармонических колебаний сварочной ванны

что вибрации сварочной ванны приводят к изменению структуры металла шва или наплавленного слоя. Для возбуждения колебаний расплавленного металла ванны обычно применяют плоские или плоскопараллельные движения вибростолов в виде вибростолов различной конструкции.

Основываясь на достижениях современной мехатроники с компьютеризованным управлением приводными системами, предложены новые технические решения и технологические приемы для воздействия на сварочную ванну с управляемыми параметрами колебаний — частотой, амплитудой, формой. На рис. 9 приведена схема создания поперечных относительно шва колебаний наплавляемого изделия, на рис. 10 — фрагмент экспериментальной установки, на рис. 11 — внешний вид наплавленных валиков.

В качестве привода для поперечных колебаний использовали шаговый двигатель с безредукторной передачей движения непосредственно на рабочий стол. С помощью установки была выполнена экспериментальная проверка разработанной математической модели процесса наплавки с колебаниями изделия [33], которая показала удовлетворительную сходимость результатов (табл. 2).

Существенное увеличение ширины наплавленного валика при соответственно уменьшенной высоте в результате колебаний сварочной ванны свидетельствует о большей производительности

Таблица 1. Влияние частоты колебаний электрода на показатели наплавки

Частота колебаний, Гц	0	680 (резонанс)	1295	3820 (резонанс)	5800
Макрошлиф наплавленного валика					
Доля основного металла в наплавленном валике	0,36	0,13	0,30	0,22	0,25
Коэффициент расплавления электрода, г/(А·ч)	$\frac{15,0 \dots 15,2}{15,1}$	$\frac{16,5 \dots 17,2}{16,9}$	$\frac{15,1 \dots 15,5}{15,3}$	$\frac{18,0 \dots 18,9}{18,6}$	$\frac{15,8 \dots 16,3}{16,1}$

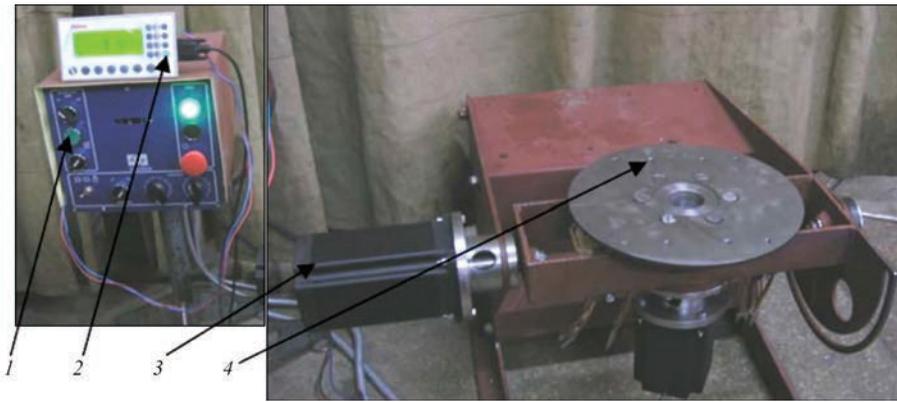


Рис. 10. Установка для поперечных колебаний наплавляемого изделия: 1 — блок управления; 2 — регулятор параметров колебаний; 3 — электродвигатель привода колебаний; 4 — рабочий стол

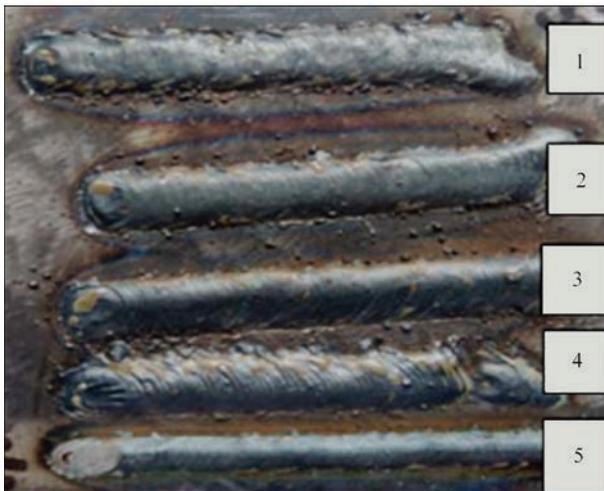


Рис. 11. Валики, наплавленные с колебаниями рабочего стола установки с частотой, Гц: 1 — 4,67; 2 — 4,0; 3 — 3,0; 4 — 2,0; 5 — без колебаний

данного способа наплавки по сравнению с обычным способом, выполняемым в условиях неподвижности наплавляемого изделия. Кроме этого,

Таблица 2. Результаты проверки адекватности математической модели

Номер опыта	Частота колебаний, Гц	Ширина наплавленного валика, мм		Погрешность, %
		расчет	эксперимент	
1	4,67	15,4	14,0	10,0
2	4,0	13,6	13,0	4,6
3	3,0	12,0	14,0	14,3
4	2,0	11,0	14,0	21,4
5	0	-	8,0	-

улучшенная структура наплавленного металла обеспечивает более высокие эксплуатационные характеристики поверхностного слоя [34].

Результаты выполненных исследований дают основание считать, что технологию наплавки с колебаниями изделия следует развивать в направлении использования других параметров колебательного процесса. Рассмотренный способ наплавки может быть использован при изготовлении или ремонте деталей сельскохозяйственной техники, узлов штампового и металлорежущего инструмента [34] и т. п.

В последнее время предложен и испытан способ сварки–наплавки с введением механических колебаний в сварочную ванну с помощью дополнительного вибратора (рис. 12).

При ведении сварочного или наплавочного процессов волновод вибратора, погруженный в жидкий металл сварочной ванны за дугой, перемещается вместе с ней со скоростью  $V_{св}$ . Положение рабочего торца волновода (расстояние от сварочной дуги  $l_{п}$ , глубина погружения  $h_{п}$ , угол наклона  $\alpha_{п}$ ) определяются размерами сварочной ванны, параметры колебательного процесса (частота и амплитуда) задаются генератором колебательного механизма. Эффект механического перемешивания сварочной ванны заключается в структуризации наплавленного металла и, как следствие, в повышении механических свойств соединения или наплавленного слоя.

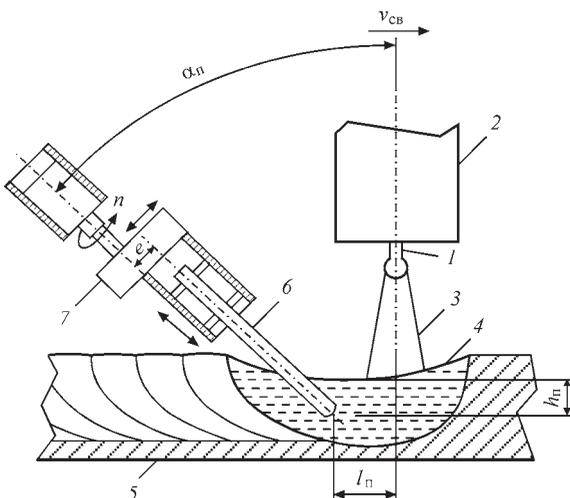


Рис. 12. Схема сварочно-наплавочного процесса с использованием механического вибратора сварочной ванны: 1 — электродная проволока; 2 — горелка; 3 — сварочная дуга; 4 — сварочная ванна; 5 — изделие; 6 — волновод вибратора; 7 — генератор;  $n$  — частота вращения волновода;  $e$  — полуамплитуда колебаний волновода

**Выводы**

1. При большом разнообразии методов и способов управления эксплуатационными свойствами сварных соединений, определяющим фактором для получения соединения с требуемыми механическими и специальными характеристиками является правильный выбор способа и режимов сварки. Однако универсальный способ сварки, обеспечивающий, с учетом разных внешних условий ведения процесса, абсолютную равнопрочность и качество соединений, еще не разработан.

2. Основными направлениями эффективного повышения качества сварного соединения являются рациональное применение способов импульсного и вибрационного воздействия на сварочный процесс с помощью систем собственно сварочного оборудования, а также вспомогательных систем, позволяющих управлять свойствами наплавленного металла.

3. Существенно повысить результативность механического влияния на характеристики сварного соединения или наплавленного слоя можно с использованием различных способов комбинированного воздействия, выбирая наиболее действенные из них с учетом экономической эффективности применения.

**Список литературы**

1. Патон Б.Е. (2003) Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций. *Автоматическая сварка*, № 1, 7–13.
2. Маковецкая О.К. (2012) Основные тенденции на рынке сварочной техники в 2008-2011 гг. и прогноз его развития (Обзор). *Там же*, 6, 44–50.
3. Миронов С. (2003) Инверторные источники питания для дуговой сварки. *Сварочное производство*, 4, 41–43.
4. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Григорьева А.А. и др. (2015) Управление структурой и свойствами сварных соединений технических систем ответственного назначения методами адаптивной импульсно-дуговой сварки. *Вопросы материаловедения*, 1, 127–131.
5. Патон Б.Е., Лебедев В.А., Полосков С.И., Лендел И.В. (2013) Использование механических импульсов для управления процессами автоматической и механизированной сварки плавящимся электродом. *Сварка и диагностика*, 6, 16–20.
6. Патон Б.Е., Лебедев В.А., Пичак В.Г., Полосков С.И. (2009) Эволюция систем импульсной подачи проволоки для сварки и наплавки. *Там же*, 3, 46–51.
7. Максимов С.Ю., Лебедев В.А., Лендел И.В. (2015) Герметизация труб теплообменников «мокрой» сваркой на глубине 200 м. *Вопросы материаловедения*, 1, 199–204.
8. Лебедев В.А., Драган С.В., Трунин К.К. (2016) Автоматическая сварка под флюсом с импульсной подачей шаговым двигателем электродной проволоки. *Сварочное производство*, 2, 27–34.
9. Лебедев В.А., Гулый М.В. (2014) Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки. *Мехатроника. Автоматизация. Управление*, 6, 47–51.
10. Лебедев В.А., Жук Г.В. (2017) Управление переносом электродного металла на основе импульсных алгоритмов функционирования систем с дозированием подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке. *Тяжелое машиностроение*, 6, 27–32.

11. Лебедев В.А. (2016) Механизированная синергетическая сварка с импульсной подачей электродной проволоки. *Научно-технические технологии в машиностроении*, 2, 19–24.
12. Lebedev V., Reisgen U., Lendel I. (2016) Study of technological opportunities of GMA welding and surfacing with pulse electrode wirefeed. *Welding in the World*, February, 9–14.
13. Патон Б.Е., Лебедев В.А., Жук Г.В., Драган С.В. (2017) Механические импульсные и вибрационные воздействия в оборудовании и технологиях механизированной сварки и наплавки. *Збірник тез доповідей 16-ої Міжнародної науково-технічної конференції 26–27 жовтня 2017 р. «Вібрації в техніці та технології»*. Вінниця, сс. 10–16.
14. Лебедев В.А., Жук Г.В. (2017) Решение задачи механизированной сварки тонколистовых алюминиевых сплавов на основе применения программируемых электроприводов механизма подачи. *Монтажные и специальные работы в строительстве*, 9, 21–24.
15. Денисов Л.С., Барсуков И.В., Аполоник С.А. (1998) Разработка и анализ оборудования для сварки с попеременной подачей газов. *Тр. научн. конф. «Прогрессивная техника и технология машиностроения, приборостроения и сварочного производства»*. Киев. Т.4, сс. 310–313.
16. Тарасов Н.М., Тулин В.М. (1982) Управление переносом электродного металла кратковременным повышением скорости истечения защитного газа. *Сварочное производство*, 8, 23–25.
17. Жерносеков А.М. (2012) Тенденции развития управления процессами переноса металла в защитных газах (Обзор). *Автоматическая сварка*, 1, 33–38.
18. Жерносеков А.М., Сидорец В.Н., Шевчук С.А. (2013) Комбинированное импульсное воздействие защитных газов и сварочного тока при сварке плавящимся электродом. *Сварочное производство*, 2, 9–13.
19. Kitsch M. (2006) Metall-inert gas schweißen von Aluminium mit gepulster Schutzgaszufuhr. *Schweißen und Schneiden*, 58, 1, 19–22.
20. Чинахов Д.А. (2009) Влияние двухструйной газовой защиты на эксплуатационные свойства сварных соединений судостроительной стали GL-E36. *Автоматическая сварка*, 9, 39–42.
21. Патон Б.Е., Лебедев В.А., Микитин Я.И. (2006) Способ комбинированного управления процессом переноса электродного металла при механизированной дуговой сварке. *Сварочное производство*, 8, 27–32.
22. Фелько В.Т., Солодский С.А., Крюков А.В. (2004) Импульсная подача сварочной проволоки с управляемым переносом электродного металла. *Материалы научно-технической конф. «Наука–Образование–Производство»*, Нижний Тагил. Т.2, сс. 100–103.
23. Макара А.М., Кушниренко Б.Н. (1967) Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений. *Автоматическая сварка*, 1, 31–35.
24. Бодырев А.М. (1976) О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну. *Сварочное производство*, 2, 1–3.
25. Лебедев В.А. (2019) Автоматическая подводная сварка по увеличенному зазору. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 3, 16–20.
26. Сидоренко П.Ю., Рыжов Р.Н. (2010) Использование импульсных электромагнитных воздействий для управления процессом переноса электродного металла при дуговой сварке. *Автоматическая сварка*, 6, 52–53.
27. Рыжов Р.Н. (2007) Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов. *Там же*, 2, 56–58.
28. Лебедев В.А., Тищенко В.А., Лой С.А. (2019) Техно-технологические эффекты при механизированной наплавке с модуляцией режимов. *Materials of the 19th International Scientific and Technical Seminar. February 18–23. «Modern question of production and repair in industry and transport»*. Kosice, pp. 106–109.
29. Голобородько Ж.Г., Драган С.В., Симутенков И.В. (2013) Автоматическая наплавка под флюсом конструкционных

- статей с поперечными высокочастотными перемещениями электрода. *Автоматическая сварка*, **6**, 35–38.
30. Симутенков И.В., Драган С.В., Ярос Ю.А. (2014) Стабильность дугового процесса при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода. *Зб. наук. пр. НУК*, **4**, 43–48.
  31. Симутенков И.В., Ярос Ю.О., Драган С.В., Галь А.Ф. (2015) Пристрій для автоматичного наплавлення під флюсом. Україна Пат. 10288, МПК В23К 9/00. № у 201504821.
  32. Драган С.В., Симутенков И.В., Игнатенков О.В. (2012) Методика определения параметров высокочастотных механических колебаний электрода при автоматической наплавке под флюсом. *Вісник державної машинобудівної академії*, **3(8)**, 124–129.
  33. Лебедев В.А., Новиков С.В., Жук Г.В. и др. (2018) Математическое моделирование процесса дуговой наплавки с управляемыми изменениями длины дугового промежутка. *Технология машиностроения*, **3**, 56–62.
  34. Lebedev V.A., Solomichuk T.G., Novykov S.V. (2019) Study if a Welding Harmonic Oscillation in fluce on the Welded Metal Hardness and Weld Bead Width. *Journal of engineering sciences*, **6**, 16–21.
  15. Denisov, L.S., Barsukov, I.V., Apolonik, S.A. (1998) Development and analysis of equipment for welding with alternate gas supply. *In: Proc. of Sci. Conf. on Advanced Engineering and Technology of Machine Building, Instrument Making and Welding Production*. Kiev, Vol. 4, 310-313 [in Russian].
  16. Tarasov, N.M., Tulin, V.M. (1982) Control of electrode metal transfer by short-time increase of rate of shielding gas flow. *Svarochn. Proizvodstvo*, **8**, 23-25 [in Russian].
  17. Zhernosekov, A.M. (2012) Tendencies in development of control of metal transfer processes in shielding gases (Review). *The Paton Welding J.*, **1**, 29-33.
  18. Zhernosekov, A.M., Sidorets, V.N., Shevchuk, S.A. (2013) Combined pulsed action of shielding gases and welding current in consumable electrode welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 9-13 [in Russian].
  19. Kitsch, M. (2006) Metall-Inert Gas Schweißen von Aluminium mit gepulster Schutzgaszufuhr. *Schweißen und Schneiden*, **58(1)**, 19-22 [in German].
  20. Chinakhov, D.A. (2009) Effect of double-jet gas shielding on performance of welded joints on GL-E36 shipbuilding steel. *The Paton Welding J.*, **9**, 29-32.
  21. Paton, B.E., Lebedev, V.A., Mikitin, Ya.I. (2006) Method of combined control of electrode metal transfer process in mechanized arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **8**, 27-32 [in Russian].
  22. Fedko, V.T., Solodsky, S.A., Kryukov, A.V. (2004) Pulsed welding wire feed with controlled transfer of electrode metal. *In: Proc. of Sci.-Techn. Conf. on Science-Education-Production. Nizhny Tagil*, Vol. 2, 100-103 [in Russian].
  23. Makara, A.M., Kushnerenko, B.N. (1967) Transverse arc movements as the factor of improvement of structure and properties of welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 31-35 [in Russian].
  24. Boldyrev, A.M. (1976) On mechanism of formation of weld metal structure at low-frequency oscillations in weld pool. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 1-3 [in Russian].
  25. Lebedev, V.A. (2019) Automatic underwater welding on increased gap. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, **3**, 16-20 [in Russian].
  26. Sidorenko, P.Yu., Ryzhov, R.N. (2010) Application of pulse electromagnetic effects to control the process of electrode metal transfer in arc welding. *The Paton Welding J.*, **6**, 44-45.
  27. Ryzhov, R.N. (2007) Influence of pulse electromagnetic actions on formation and solidification of welds. *Ibid.*, **2**, 49-50.
  28. Lebedev, V.A., Tishchenko, V.A., Loj, S.A. (2019) Technical-technological effects in mechanized surfacing with modulation of modes. *In: Proc. of 19th Intern. Sci. and Techn. Seminar on Modern Question of Production and Repair in Industry and Transport (Slovak Republik, Kosice, February 18-23)*, 106-109.
  29. Goloborodko, Zh.G., Dragan, S.V., Simutenkov, I.V. (2013) Automatic submerged-arc surfacing of structural steels with transverse high-frequency movements of electrode. *The Paton Welding J.*, **6**, 34-37.
  30. Simutenkov, I.V., Dragan, S.V., Yaros, Yu.A. (2014) Stability of arc process in automatic submerged-arc surfacing with high-frequency electrode oscillations. *Zb. Nauk. Prats NUK*, **4**, 43-48 [in Russian].
  31. Simutenkov, I.V., Yaros, Yu.O., Dragan, S.V., Gal, A.F. (2015) *Device for automatic submerged-arc surfacing*. Ukraine Pat. 10288, Int. Cl. B23K 9/00, No. u 201504821 [in Ukrainian].
  32. Dragan, S.V., Simutenkov, I.V., Ignatenkov, O.V. (2012) Procedure for determination of parameters of electrode high-frequency mechanical oscillations in automatic submerged-arc surfacing. *Visnyk Derzh. Mashynobudivnoi Akademii*, **3(8)**, 124-129 [in Russian].
  33. Lebedev, V.A., Novikov, S.V., Zhuk, G.V. et al. (2018) Mathematical modeling of arc surfacing process with controlled variations of arc gap length. *Tekhnologiya Mashinostroyeniya*, **3**, 56-62 [in Russian].
  34. Lebedev, V.A., Solomichuk, T.G., Novykov, S.V. (2019) Study if a welding harmonic oscillation influences on the welded metal hardness and weld bead width. *J. of Eng. Sci.*, **6**, 16-21.

## References

## ЗАСТОСУВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ ВПЛИВІВ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ В СЕРЕДОВИЩІ ЗАХИСНИХ ГАЗІВ (Огляд)

В.О. Лебедєв<sup>1</sup>, С.В. Драган<sup>2</sup>, Г.В. Жук<sup>1</sup>, С.В. Новіков<sup>1</sup>, І.В. Сімутенков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

Розглянуто та проаналізовано основні технічні засоби та способи імпульсного управління процесом дугового зварювання електродом, що плавиться, в середовищі захисних газів, розроблені останнім часом в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і Національному університеті кораблебудування ім. адмірала Макарова. Значну увагу приділено способам з використанням систем імпульсного впливу на процеси перенесення електродного металу, формування зварних швів і структуру наплавленого металу. Показано перспективність застосування систем з імпульсною, дозованою подачею електродного дроту, наведені результати ефективного управління зварювальним та наплавочним процесами. Розглянуто способи дугового зварювання з імпульсною подачею захисного газу і з двоштрумним газовим захистом та вказано проблеми, що перешкоджають широкому використанню цих способів. Наведено результати деяких досліджень щодо впливу зовнішніх електромагнітних впливів на перенесення електродного металу, формування та кристалізацію швів і наведено приклади ефективного застосування даного способу управління зварювальним процесом. Виконано аналіз способів механічного впливу на зварювальний процес з використанням різних систем коливання. Показана можливість комбінованого управління перенесенням електродного металу, формуванням наплавленого валика і структурою його металу в залежності від схеми введення коливань і параметрів коливального процесу. Зазначено на перспективність застосування способу для наплавочних робіт. Бібліогр. 34, табл. 2, рис. 12.

*Ключові слова: зварене з'єднання, властивості, управління, технічні засоби, аналіз, застосування*

## APPLICATION OF PULSED IMPACT IN CONSUMABLE ELECTRODE GAS-SHIELDED ARC WELDING (Review)

V.A. Lebedev<sup>1</sup>, S.V. Dragan<sup>2</sup>, G.V. Zhuk<sup>1</sup>, S.V. Novikov<sup>1</sup>, I.V. Simutenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str.

03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroiv Ukrainy, 54025, Mykolaiv. E-mail: welding@nuos.edu.ua

The papers presents the main technical means and methods of pulsed control of the process of consumable electrode gas-shielded arc welding, developed over the recent years at PWI and Admiral Makarov National University of Shipbuilding. A lot of attention is given to methods using systems of pulsed impact on the processes of electrode metal transfer, weld formation and deposited metal structure. Good prospects for application of systems with pulsed dozed feed of electrode wire are shown, and results of effective control of welding and surfacing processes are given. Methods of arc welding with pulsed feed of shielding gas and two-jet gas shielding are considered, and problems are indicated, which prevent extensive application of these processes. The paper gives the results of some studies of the influence of external electromagnetic impact on electrode metal transfer, weld formation and crystallization, and presents some examples of effective application of this method of welding process control. Analysis of the methods of mechanical impact on the welding process using different oscillator systems was performed. The possibility is shown of combined control of electrode metal transfer, deposited bead formation and its metal structure, depending on the scheme of oscillation application and oscillation process parameters. The good prospects for this method application for surfacing operations are pointed out. 34 Ref., 2 Tabl., 12 Fig.

*Keywords: welded joint, properties, control, technical means, analysis, application*

Поступила в редакцію 21.06.2019



**ЖУРНАЛИ**  
для професіоналів

Журнали входят до Переліку наукових фахових видань України  
(380-44) 200-8277  
journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com