

В.А. Лебедев

(ГП "ОКБ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины", Киев)

Состояние и направления развития систем и способов управления переносом электродного металла, формированием шва и валика при электродуговой механизированной и автоматической сварке—наплавке

Рассмотрены проблемы, связанные с решением задач энергосбережения, повышения качества сварных швов и наплавленных слоев при механизированных дугowych процессах сварки и наплавки. Показан большой спектр технико-технологических приемов, влияний, методик, позволяющих в большей или меньшей степени решить эти задачи с применением основных и дополнительных аппаратных средств, а также новых электродных материалов, защитных сред и активирующих материалов. Особое внимание уделено оборудованию с импульсными алгоритмами функционирования, а также комбинированным системам влияния на дуговой процесс, что позволит охватить более широкий спектр воздействия на формирование сварных швов и наплавленных слоев. Часть технико-технологических решений требуют дальнейших исследований в части конкретных задач сварочно-наплавочного производства, а также выбора доступной и совершенной элементной базы и материальных ресурсов.

Ключевые слова: дуговой процесс; сварка—наплавка; плавление; перенос; формирование; управление; системы и способы.

The problems that are associated with solving the problems of energy saving, improving in the quality of welded seams and deposited layers in mechanized arc welding and surfacing processes are considered. Shown is wide range of technical and technological methods, influences, techniques that allow to greater or lesser extent to solve these problems with the use of basic and additional hardware, and with the use of new electrode materials, protective media and activating materials. Particular attention is paid to equipment using pulse algorithms of functioning, as well as combined systems of influence on the arc process, which will allow covering wider range of effect on the formation of welded seams and deposited layers. Some of the technical and technological solutions require further researches in terms of specific tasks of welding and surfacing production, as well as the choice of affordable and perfect element base and material resources.

Keywords: arc process; welding—surfacing; melting; transfer; formation; control; systems and methods.

Один из наиболее распространенных способов получения неразъемных соединений, в частности, для изготовления ответственных изделий — дуговая сварка плавящимся электродом. По объему наплавленного металла в мировом производстве электродуговая сварка занимает ведущее положение, которое, согласно экономическим прогнозам, сохранится в обозримом будущем [1–3].

Однако использование данного способа связано с определенными трудностями. Главной проблемой является нестабильный перенос электродного металла в сварочную ванну, сопровождающийся его повышенным разбрызгиванием. Это негативно отражается на технологическом процессе изготовления сварных конструкций: необходимы дополнительные операции по очистке поверхности деталей от брызг металла, что в целом снижает эффек-

тивность производства и повышает энергозатраты [4–6].

Обычно при электродуговой сварке с выполнением конвенциональных требований техники и технологии прочность сварного шва составляет 85...90 % прочности основного металла.

Совершенствование техники и технологии дуговой механизированной сварки и наплавки — постоянно действующая задача для исследователей, разработчиков производителей и потребителей этого способа соединения, упрочнения и восстановления узлов и деталей различных видов техники, строительства и других объектов. Целью совершенствования, в частности, является повышение прочности сварного шва.

Указанный процесс сопровождается переносом электродного металла в сварочную ванну и при этом перенос наряду с другими характеристиками — важнейшая особенность свар-

ки плавящимся электродом в защитных газах и под флюсом и самозащитными электродными проволоками. В связи с этим выделяют две основные задачи: уменьшение разбрызгивания электродного металла и увеличение стабильности процесса сварки.

От характера тепломассопереноса зависят многие технологические характеристики и сферы эффективного применения процессов сварки и наплавки, их качество и энергетические и ресурсные показатели.

Значимым является влияние характера переноса на кристаллизацию металла шва и наплавленного слоя, которая во многом определяет эксплуатационные свойства конструкции (прочность, износостойкость и др.).

Существует достаточно большое число способов и устройств, которые в той или иной мере оказывают влияние на перенос электродного металла при дуговой механизированной и автоматической сварке—наплавке. Среди способов имеются активные и пассивные, а среди устройств те, которые являются частями или узлами сварочного оборудования и те, которые относятся к дополнительным.

Для влияния на процесс переноса используются активирующие порошки и охлаждающие жидкости, различные физические поля, в частности, магнитное, акустическое, естественное гравитационное поле.

Следует особо отметить применение при сварке и наплавке импульсных воздействий, применяемых для процессов в защитных газах, под флюсом при работе со стальными конструкциями и конструкциями из сплавов алюминия с применением электродных проволок сплошного сечения, порошковых, активированных. Рациональное применение импульсных воздействий позволяет решать многие задачи, относящиеся к управлению переносом электродного металла, формированию сварного соединения, зоны термического влияния, структуры металла шва. В создании технических средств для импульсных технологий сварки—наплавки выполнено наибольшее число разработок, в том числе ряд алгоритмов функционирования.

Цель работы — анализ и оценка применения систем и способов управления или упорядочивание процесса переноса капель электродного металла, формирование структуры швов или наплавленных слоев на основе рассмотрения доступных материалов (статей, патентных материалов, собственных исследований и др.) для определения возможностей применения на практике, в том числе и для разработки новых типов оборудования.

Для дальнейшего анализа и оценки систем и способов влияния на перенос электродного металла классифицируем их (см. рисунок). На рисунке приведены только общие названия известных в настоящее время систем и способов влияния на перенос электродного металла. Для анализа и оценки их эффективности необходимо представить их техническую и технологическую суть.

1а. Питание дуги. Использование источников сварочного тока для получения модулированных и импульсных режимов влияния на дуговой процесс является распространенным [7]. До инверторных источников сварочного тока для получения модулированных и импульсных алгоритмов работы использовали обычные источники с различными модификациями и приставками, а также специализированные источники. Основной недостаток таких источников — их ограниченность из-за частоты преобразования энергии — 50 Гц. Практически неизвестны источники этого типа с введением обратных связей по параметрам дугового процесса.

Инверторные источники сварочного тока позволяют реализовать практически любые



Классификация систем и способов влияния на перенос электродного металла, формирование сварного шва и наплавленного слоя

импульсные алгоритмы управления переносом электродного металла. Их широкие возможности в сочетании с их малыми массогабаритными характеристиками позволили им занять исключительное место в структуре мирового рынка сварочного оборудования.

К недостаткам инверторных источников относится необходимость генерирования импульсов большой мощности, так как при управлении переносе кроме сил поверхностного натяжения используются силы, характеристики которых зависят от параметров выходных импульсов источника. Также инверторные источники практически не подлежат ремонту в условиях эксплуатации.

16. Подача электродной проволоки. Направление, связанное с использованием системы подачи электродной проволоки как генератора импульсов влияния на дуговой процесс для управления или стабилизации переноса электродного металла в сварочную ванну, не распространено, но интенсивно развивается. Создано значительное число конструкций механизмов импульсной подачи, часть из которых может быть использована в реальных разработках сварочного оборудования, часть может быть отнесена к перспективным.

Можно разделить реальные механизмы импульсной подачи на группы:

- с роликовыми движителями и редукторным снижением частоты вращения вала приводного электродвигателя для реализации низкочастотной модуляции сварочного тока с регулируемыми параметрами (частота, амплитуда, скважность);

- на основе односторонних захватов без применения дополнительных преобразователей вращения вала приводного электродвигателя и без возможности широкого управления параметрами импульсов движения;

- на основе преобразователей вращения вала электродвигателя в импульсное движение подающего ролика с частично регулируемыми параметрами;

- с использованием специализированных компьютеризированных электроприводов с вентильными, шаговыми электродвигателями и передачей вращения вала непосредственно на подающий ролик (безредукторные).

Исследование на реальных процессах всех этих групп механизмов показало, что они в той или иной мере обеспечивают решение задач

управления или стабилизации переноса электродного металла.

Сварка—наплавка с импульсной подачей электродной проволоки по жестко заданной программе обеспечивает достаточно высокие результаты в практическом применении, но реализация такого алгоритма формирования импульсов имеет определенные сложности в установке параметров импульсов, которые базируются на результатах трудоемких экспериментов.

Любое изменение в энергетических характеристиках дугового процесса (колебания вылета, изменения сопротивления движению проволоки в канале или токоподводе) влияет на эффективность процесса с импульсной подачей по жесткой программе [8].

Сварка с импульсной подачей электродной проволоки по жесткой программе может быть выполнена двумя способами — с нерегулируемыми или частично регулируемыми параметрами и с регулируемыми параметрами.

Повысить эффективность управления переносом электродного металла, а следовательно, сварочным процессом можно в результате отслеживания, по крайней мере, одного из изменяющихся энергетических параметров дугового процесса — тока или напряжения. При этом управление подачей проволоки должно строиться с применением синергетических алгоритмов [9]. Такой способ управления процессом сварки был разработан и получил название — дозированная подача, алгоритм управления которой описан в [10]. При использовании способа сварки с дозированной подачей устанавливают три основных параметра: уровень тока $I_{\text{св min}}$, при котором включается подача; уровень тока $I_{\text{св max}}$ — подача прекращается; скорость подачи в импульсе v_z . Сочетание этих параметров определяет характер переноса электродного металла.

Способ проверен и отработан в сравнительных экспериментах в автоматическом режиме при наплавке в нижнем, вертикальном и потолочном положениях с использованием сплошных и порошковых самозащитных электродных проволок. Выполнена сварка тонколистового сплава алюминия (электродная проволока АМг диаметром 1,0 мм; изделие толщиной 0,9 мм) с производительностью, более чем в 2 раза превышающей производительность сварки неплавящимся электродом. Процесс наплавки выполнен на обратной и прямой полярности с получением результатов: низкий уровень потерь

электродного металла (в 2—4 раза меньше, чем при традиционных способах сварки); меньшее энергопотребление (на 10...25 % в сравнении с традиционными способами подачи электродной проволоки); возможность управления геометрическими размерами шва; улучшение структуры металла шва и околошовной зоны.

Быстродействующий вентильный электропривод с безредукторным механизмом подачи и компьютеризированным управлением [11] специальной разработки вместе с новыми разработками датчиков тока, устройств интерфейса, системами регулирования позволил решить практически весь комплекс управления движением электродной проволоки: от плавного до дозированного.

Синтез регулятора электропривода проведен с возможностью получения максимального быстродействия с введением блока предиктивного управления, обеспечивающего необходимое быстродействие с минимально возможным перерегулированием. В системе подачи применен вентильный электродвигатель новой эффективной конструкции, позволяющий при максимальном быстродействии обеспечить приемлемый момент на валу с подающим роликом. Простота установки любого режима подачи с необходимыми параметрами обеспечивается двумя органами управления — установкой параметров и переключателем выбора и установки способов дугового процесса с отображением параметров на дисплее.

Полуавтомат с универсальным блоком управления подачей обеспечивает интегральную скорость движения проволоки 60...960 м/ч, частоту импульсной подачи 5...60 Гц с ускорением 15...18 м/с². Эти параметры [12] могут обеспечить управляемый перенос электродного металла даже без коротких замыканий дугового промежутка, в частности, при сварке алюминия и его сплавов. Дозированная подача характеризуется четко выраженными импульсами тока, с некоторой девиацией частот и скважности, а сварки и наплавки в разных пространственных положениях представлены в [8—10].

Из-за низкой стабильности дуги и сильного разбрызгивания в промышленности не применяют механизированную сварку плавящимся электродом на прямой полярности. Способ сварки с дозированной подачей позволяет получить высокие результаты по формированию валиков, проплавлению, качеству металла шва

на процессах с прямой и на обратной полярности со снижением затрат электроэнергии.

Для получения заданной структуры и геометрии наплавленного слоя используют различные методы регулирования тепловложения и физико-химического воздействия на дугу и сварочную ванну [13, 14]. Управление структурой обеспечивает необходимые механические характеристики металла наплавки, а управление проплавлением повышает производительность, сокращает долю основного металла в наплавленном слое. Эти результаты наиболее значимы при процессе с дозированной подачей сплошной и порошковой проволоки.

1в. Подача защитной среды. Способ сварки с импульсной подачей защитного газа в настоящее время находится еще в состоянии экспериментального изучения. Перспективность этого направления определяется тем, что изменение скорости подачи газа ведет к изменению параметров переноса капель электродного металла в сварочную ванну. При увеличении скорости газового потока из сопла возрастает его давление на каплю и в ванну переходят более мелкие капли, но с большей частотой. Вследствие снижения времени перехода капли в жидкую ванну изменяются скорость металлургических процессов и интенсивность выгорания легирующих элементов.

Существуют различные варианты импульсной подачи защитных газов, среди которых: применение одного типа газа и попеременная подача нескольких типов газов. Эффективность применения поочередной подачи газов рассмотрена в работе [15], где, например, показано, что при подаче в попеременном режиме аргона и гелия получен новый технологический процесс, в котором благодаря импульсному изменению давления в дуговом промежутке, определяемом, в том числе, различными плотностью и потенциалами ионизации аргона и гелия, возникает дополнительный эффект импульсного воздействия на сварочную ванну, способствует получению металла наплавленного слоя с дезориентированной мелкозернистой структурой с высокими показателями пластичности и прочности, при этом гелий, обладая высокой текучестью, проникает в стык между кромками и обеспечивает защиту и подогрев обратной стороны шва.

Как показано в работах [16, 17], внешний вид швов при различной частоте импульсной подачи аргона и гелия различен. Частота влияет

на форму и чешуйчатость поверхности металла швов. Импульсная подача защитного газа с частотой до 20 Гц влияет на геометрические размеры металла швов [18]. Необходимо учитывать, что с увеличением частоты импульсной подачи сложнее обеспечить подачу защитных газов отдельными порциями без смещения и более высокие требования предъявляют к газовой аппаратуре, в частности к ее инерционности.

Относительно новый процесс [19] основан на способе сварки с двухструйной газовой защитой, при которой внутренняя струя охватывается наружной струей, и стабилизирует внутреннюю струю, снижает ее турбулентность и обеспечивает защиту околошовной зоны без подсоса и воздуха в зону горения дуги. Газодинамическое давление внутренней газовой струи способствует более интенсивному перемешиванию жидкой ванны и расплавленной капли электродного металла со снижением выгорания легирующих элементов.

2а. Использование электромагнитных полей.

На управление формированием сварного соединения оказывают влияние целенаправленно налагаемые на дугу магнитные поля [20], хотя сложность их применения в сварочном оборудовании зачастую ограничена, но в ряде случаев целесообразна и имеет перспективу на дальнейшее развитие.

В работе [21] проведена оценка эффективности управления формированием и кристаллизацией швов с помощью внешних импульсных электромагнитных воздействий, определены их параметры для управления переносом электродного металла. Установлено, что применение аксиальных импульсных электромагнитных полей позволяет увеличить частоту переноса капель и вследствие этого уменьшить их размеры. Определено, что эффективность электромагнитных полей увеличивается с повышением частоты импульсов, при этом существует возможность снижения потерь металла на разбрызгивание. Влияние управляющего магнитного поля может быть таковым, что может изменять тип переноса, например, с крупнокапельного на струйный.

Оптимальные режимы импульсных магнитных полей с частотой 215 Гц при сварке алюминиевых сплавов обеспечивают измельчение кристаллитов во всем сечении швов.

При воздействии магнитных полей отмечено укорочение в пробах горячих трещин, а при

оптимальных параметрах импульсов хрупкое разрушение в образцах может быть исключено.

Интересны и перспективны работы по формированию сварных соединений с колебаниями дуги электромагнитными полями [22], например для сканирования шва, что обеспечивает точность ведения процесса с получением шва товарного вида [23, 24].

2б. Применение акустических и высокочастотных электромагнитных полей [25]. При автоматической и в некоторых случаях механизированной сварке возможно применение ультразвуковых воздействий в двух основных интерпретациях: с передачей воздействий через изделие в сварочную ванну и на электродную проволоку, при этом колебания высокой интенсивности, вводимые непосредственно в ванну, используются в сварочном процессе для повышения прочности сварного шва при его кристаллизации с обеспечением однородности сварного шва, более равномерного распределения неметаллических включений по всему объему шва, уменьшения уровня ликвационных процессов, снижения размеров зерна, разрушения столбчатой структуры.

Широкое применение ультразвуковых колебаний при электродуговой сварке плавлением ограничено из-за отсутствия в настоящее время надежных систем, которые могут устойчиво работать в реальных условиях сварочного производства.

Ультразвуковые колебания могут вводиться непосредственно в стальную электродную проволоку (ферромагнетик) [26].

При наложении на движущуюся электродную проволоку высокочастотных электромагнитных колебаний определенной частоты в ней создается продольная волна, которая в виде энергетического влияния непрерывно передается капле металла на торце электрода. Это позволяет увеличить частоту перехода капель в сварочную ванну, что приводит к снижению области (зоны) термического воздействия и как следствие — к повышению качества сварных швов.

При указанном воздействии проволока изменяет свои линейные размеры (магнитоstrictionный эффект), что может рассматриваться как наноимпульсная подача электродной проволоки, сопутствующая конвенциональному движению с передачей импульса капле на торце проволоки при горении дуги. Это, как уже было

отмечено, увеличивает частоту перехода капель в сварочную ванну с технологическим эффектом.

2в. Системы колебаний сварочного инструмента. Системы колебаний сварочного инструмента и свариваемого и наплавляемого изделия имеют большой ряд технических и технологических решений.

Низкочастотные колебания сварочной горелки в составе каретки обеспечивают поперечное относительно сварного шва движение. Все конструкции таких колебателей позволяют эффективно решить задачу увеличения ширины шва, или, например, сварка в широкую разделку [27] обеспечивает повышение производительности процесса и влияет на качество шва и наплавленного слоя из-за снижения времени нахождения металла ванны в зоне перегрева, а это повышает поверхностное натяжение и вязкость валика с получением его плоской формы и снижает требования последующей обработки, а также уменьшает размер зерна основного металла в зоне оплавления, что способствует формированию мелкозернистой структуры наплавленного слоя.

Для выполнения таких колебаний требуется специальный механизм [28]. Обычно частотный спектр таких колебаний составляет 0,2...5,0 Гц.

В настоящее время разработан способ сварки с высокочастотными поперечными колебаниями электродной проволоки [29] для получения комбинированного управляющего воздействия, при котором реализуются условия управления переносом металла и геометрией наплавленного слоя при автоматической наплавке под слоем флюса.

Экспериментально подтверждено, что для определенного диаметра электродной проволоки в зависимости от частоты колебаний и их амплитуды можно получить следующие выраженные эффекты: управление толщиной жидкометаллического слоя на торце электрода; микрокапельный перенос металла в результате гравитационно-капиллярного распыления; управление переносом металла и производительностью плавления электрода, влиять на проплавление. Высокочастотные колебания электрода способствуют рассредоточению теплового потока и изменению геометрии наплавки. При наплавке на низкоуглеродистую сталь дугой мощностью 7 кВт увеличение амплитуды поперечных колебаний до 20 мм приводит к снижению глубины проплавления на

50 % по сравнению с наплавкой без колебаний. Установлено, что при наплавке с колебаниями частотой 250 Гц максимальная температура на расстоянии 6 мм от оси валика превышает температуру металла без колебаний на 15 % [30].

Установлена целесообразность использования магнитострикционного генератора для создания поперечного колебания электрода. Такая работа ведется в ГП "ОКТБ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины".

Процесс вибродуговой наплавки имеет ряд положительных эффектов, но сложность реализации этого способа ограничила его применение.

Сварка с колебаниями электрода в стесненных условиях без применения специальных механизмов, а за счет привода механизма подачи проволоки, как пример оригинального технического решения, выполнена в ГП "ОКТБ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины" для приварки заглушек внутри трубы диаметром 157 мм и толщиной стенки 10 мм в жидкой среде мокрым способом на глубине более 200 м. Решение применено в автоматах для глубоководной сварки и использовано в Великобритании при выполнении заглушек тепловых насосов. Конструкция колебателя с элементами расчета, с учетом ограниченного энергоресурса приводного электродвигателя, описана в работе [31].

2г. Механические колебатели и поглотители тепла сварочной ванны. Ранее было отмечено, что вибрации сварочной ванны ведут к изменению структуры металла шва или наплавленного слоя. При этом сведения о частотах и амплитудах колебаний крайне противоречивы. Основываясь на достижениях современной мехатроники с компьютеризованным управлением, предложены новые технические решения для колебаний сварочной ванны с управляемыми параметрами — частота, амплитуда, форма с безредукторной передачей движения от бесколлекторного электродвигателя непосредственно на рабочий стол [32]. Применение таких систем обеспечивает производительность значительно выше, чем наплавка неподвижного изделия с улучшенной структурой наплавленного металла, подтвержденной металлографическими исследованиями [33].

Технологии наплавки с колебаниями изделия следует развивать, используя другие формы колебаний, частоты и амплитуды с эффективным применением для восстановления

элементов сельскохозяйственной техники, узлов штампового и металлорежущего инструмента и др. [34].

В настоящее время предложен и испытан способ сварки—наплавки с локальным введением механических колебаний жидкого металла дополнительным вибратором [35], при этом в жидкую ванну позади дуги под углом вводится эксцентриковый вибратор с приводом от электродвигателя, амплитуда колебаний которого определяется удвоенным значением эксцентриситета, а частота вводимых колебаний определяется частотой вращения вала приводного механизма. В качестве инструмента, возбуждающего колебания, используют стержни из тугоплавких материалов, а также из углеграфитных материалов. Решаются задачи снижения интенсивного роста дендритов по всему сечению сварочной ванны.

Проблема при сварке плавящимся электродом — остаточные деформации, которые в большей мере проявляются при сварке тонколистовых металлоконструкций.

Известны способы уменьшения остаточных напряжений и деформаций, среди которых сварка с принудительным теплоотводом. Вариантом сопутствующего охлаждения являются прижимные устройства различных конструкций [36]. Для прямолинейных швов используют жесткие прижимные балки различных сечений. В патентной и технической литературе описаны прижимные устройства с шарнирами и соединениями в виде диафрагм, лент и др. Такие теплоотводы используют при сварке криволинейных конструкций [37].

При выборе прижимных устройств для принудительного охлаждения учитывают связь размеров активной зоны сварочного процесса с температурным полем и возможностью регулирования ширины активной зоны, а следовательно, остаточных деформаций и напряжений путем дополнительного теплоотвода.

За. Охлаждающие устройства, жидкости и газы. Прижимные устройства для принудительного охлаждения могут дополняться системами с газом или жидкостями. Это особенно важно при сварке металлов с повышенной чувствительностью к высокотемпературному нагреву, например, коррозионно-стойкие стали с повышенным содержанием бора и дисперсионно-твердеющие алюминиевые сплавы.

Известны различные варианты систем для охлаждения потоком газа. Например, сварной шов и прилегающие к нему участки защищаются потоком газа, обеспечивающего горение

дуги. Снизу направляется второй поток газа, защищающий обратную сторону шва, а коаксиально к нему — охлаждающий третий поток. Это позволяет уменьшить ширину шва, зону термического влияния и получить благоприятную структуру металла.

С большей эффективностью применяют различные схемы охлаждения жидкостью, например сварка на медных подкладках или стальных прижимных элементах с каналами для потока жидкости (чаще всего воды) [38], которая может использоваться в виде разбрызгивания или пропитки пористых материалов, их устанавливают по линии сплавления выше по шву.

Недостатком применения разбрызгивания является ухудшение газовой защиты ванны.

На основе математической модели определено, что водяной поток снижает ширину активной зоны на 65...70 %, а применение пропитанных пористых материалов — на 50...55 %.

Формирование теплоотвода непосредственно на поверхности сварки повышает требования к точности сборки свариваемых кромок и трудоемкость технологии в целом [39].

36. Активирующие и модифицирующие присадки. При использовании модифицирования металла шва или наплавленного слоя [40] можно получить: измельчение микроструктуры (дендритные ячейки); измельчение макроструктуры; измельчение формы и изменение размера и распределения неметаллических включений (интерметаллидов, карбидов, оксидов и др.).

Модифицирование металла сварочной ванны можно осуществить различными способами, например: вводом в жидкий металл добавок — модификаторов; применением комбинированных способов, например ввод добавок — модификаторов с одновременным применением ультразвука и др.

Повышение производительности сварки за счет увеличения количества наплавленного металла имеет ограниченные перспективы. Решением может быть увеличение глубины проплавления в результате повышения проплавающей способности дуги, в том числе благодаря применению активирующих флюсов (активация дуги), которые кроме увеличения производительности улучшают условия капельного переноса, стабильность горения дуги и качество сварных соединений путем улучшения их формирования и механических свойств [41]. Активирующие флюсы (преимущественно в виде паст) наносят на свариваемые кромки свариваемых деталей [42].

Активирующий флюс инициирует сжатие дуги и повышение плотности тока, увеличиваются концентрация нагрева и газодинамическое давление дуги на ванну и это повышает проплавляющую способность дуги, увеличивает глубину проплавления, снижает разбрызгивание и улучшает формирование сварных швов.

Эффективно применение специального активирующего флюса при многопроходной сварке, когда первый проход проводят с применением флюса на пониженных значениях тока с проплавлением за один проход без разделки кромок стали толщиной до 10 мм, что предупреждает образование в металле шва закалочных структур, пор, непроваров, несплавлений, трещин. Можно получить швы с химическим составом, близким со свариваемым металлом.

Широкому применению активирующих флюсов препятствует снижение производительности из-за ручного приготовления и нанесения флюсов на место сварки с неравномерной толщиной и шириной слоя шликера, что снижает стабильность формирования сварного шва.

Проблемой XXI в. в сварочном производстве СНГ, Японии, Германии, США является развитие электродуговых способов сварки за счет повышения их производительности, увеличения глубины проплавления, улучшения качества сварных соединений и разработки новых сварочных материалов. Приоритетным в США, Японии признано развитие электродуговых способов сварки с применением активирующих флюсов. В Германии развиваются сварочные технологии с применением гибридных способов сварки с введением активирующих флюсов.

Вариант применения активирующих способов воздействия на дуговую сварку — активированные электродные проволоки [43], которые, имея в основе проволоку Св-08Г2С, предназначены в основном для сварки в CO_2 и его смесях. Шлакообразующие компоненты в активирующем составе снижают силу поверхностного натяжения металла ванны, способствуют мелкокапельному переносу, снижают разбрызгивание, улучшают формирование шва и по применению не отличаются от обычной сварки в углекислом газе.

4. Комбинированные воздействия. Повышение производительности и качества сварочно-наплавочных работ может быть основано на развитии гибридных сварочных процессов, таких как лазер-дуга и применении комбинированных воздействий с использованием традиционных технологий, где даже воздействия

одной и той же физической природы могут быть по-разному использованы при достижении определенных влияний на сварочный процесс.

В работе [44] отмечено влияние комбинации магнитных полей на формирование валиков при электродуговой наплавке. Установлено, что при одновременном влиянии на дугу и ванну переменного импульсного и постоянного, соосного электроду магнитных полей, наблюдается увеличение высоты и ширины валика на 10 % с уменьшением проплавления на 15...20 %. Лучшие результаты по формированию сварного шва получены при комбинации трех магнитных полей: пульсирующего, направленного перпендикулярно вектору наплавки частотой до 10 Гц, постоянного соосного электроду, переменного частотой 50 Гц. Валик имеет гладкую и равномерную поверхность с увеличенной шириной и уменьшенным проплавлением.

Примером комбинированного воздействия разных физических происхождений является способ управления переносом электродного металла при одновременном воздействии составляющих — источника сварочного тока и механизма импульсной подачи с различными алгоритмами работы [45]. Исследованы и использованы различные варианты следования импульсов источника сварочного тока и механизма подачи друг относительно друга. Учитывая инерционность системы подачи, импульс тока всегда должен предварять импульсное движение электродной проволоки. Определено и подтверждено экспериментально, что лучшие варианты сварки получаются при отставании импульса тока, а его генерирование проводилось во время t , определяемое в виде $t_{к.з} \geq t \geq T/2$, где $t_{к.з}$ — время наступления короткого замыкания; T — период переноса капли.

При оптимальных параметрах синхронизации комбинированного воздействия 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 % со следующими преимуществами:

- расширяется диапазон устойчивых режимов сварки и, как следствие, возможность управления геометрическими характеристиками сварного соединения;
- достигается высокий уровень управления переносом электродного металла;
- облегчаются условия работы импульсных механизмов подачи;

— достигается высокий уровень структуризации металла шва со снижением размеров кристаллов и повышением механических свойств свариваемого изделия;

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

Сварка с дозированной подачей электродной проволоки позволяет достаточно просто решать задачу комбинированного воздействия с введением импульса от источника в любое программно обусловленное время. Это перспективное направление может быть применено для разных типов сталей и сплавов алюминия и с использованием сплошных и порошковых электродных проволок.

Известны разработки способов сварки, сочетающих в себе импульсно-дуговые процессы и импульсной подачи газа или попеременной подачи нескольких видов газов [46]. Процессы приближены к сварке модулированным током с периодами горения дуги и паузами, но с существенными нововведениями в виде применения источника с импульсными алгоритмами функционирования и импульсным режимом подачи защитного газа. Применение такого комбинированного воздействия обеспечивает формирование качественных швов, влияющего на структуру металла шва и улучшающего его механические характеристики.

К недостатку описанных выше оригинальных способов сварки можно отнести сложность в выборе газовой аппаратуры.

Перспективным является разрабатываемый в ИЭС им. Е.О. Патона с привлечением других институтов НАН Украины способ сварки, в котором наряду с электродуговым процессом используется процесс с перемешиванием металлов, описанный, например, в работе [47], что обеспечивает высокое качество металла шва.

Рассмотренные средства, системы и оборудование, созданные и применяемые в сварочном производстве и технологиях восстанавливающей и упрочняющей наплавки, по-разному и с различным эффектом оказывают влияние на результаты применения механизированного и автоматического оборудования для электродуговой сварки и наплавки. Можно выделить воздействия по их влиянию на результат дугового процесса. Среди них универсальные и специфические. К универсальным воздействиям по большинству технико-технологических показателей следует отнести импульсные воздействия. При этом следует отметить развитые способы применения современных конструкций инверторных источников питания дуги с синергетическими алгоритмами управления, производимые большим числом фирм [48], а также быстроразвивающиеся способы сварки—наплавки с импульсной подачей электродной проволоки сплошного сечения и порошковых. В работах [49, 50] показана эффективность применения импульсной подачи ленточного электрода при проведении наплавки.

Перспективность применения импульсной подачи электродной проволоки можно оценить

Эффекты от применения различных способов подачи электродной проволоки

Эффект	Способ подачи		
	Конвенциональный	Импульсный управляемый	Дозированный
Возможность управления размерами наплавленного валика, %	Ограничена	До 20...25	Более 25
Потери электродного металла, %	8...12	Менее 5	2...4
Снижение затрат электроэнергии, %	Естественное	7...22	До 30
Уменьшение зерна металла шва, %	—	20...30	30...50
Снижение выгорания легирующего элемента Mn, %, не более	1,10	1,06	1,05
Средний темп износа, мм ³ /км	4,2	3,3	Не более 3,1
Возможность качественной наплавки в вертикальном и потолочном положениях	Ограничена	На некоторых режимах	Расширена возможность в широком диапазоне режимов
Возможность сварки на разных полярностях	С недостатками		
Число операций установления параметров движения	1	До 6	3

по результатам, приведенным в таблице, при наплавке в CO_2 углеродистой стали электродной проволокой Св-08Г2С (ток 170...200 А) при применении различных способов подачи электродной проволоки [51]. Сравнимые показатели определяли по усредненным значениям.

Комплексный характер проведенного анализа может способствовать практическому ее использованию в части выбора способов сварки—наплавки при решении конкретных задач производства.

Выводы

1. Существует большое число технических решений и технологических приемов повышения качества и производительности выполнения операций сварки и наплавки электродуговым способом с применением плавящегося электрода с их преимуществами и недостатками, при этом основными проблемами их эффективного применения являются степень их отработанности для реализации в оборудовании, стоимость и уровень влияния на технологический процесс.

2. Часть технико-технологических решений требует дальнейших исследований для решения конкретных задач сварочно-наплавочного производства, а также выбора доступной и совершенной элементной базы и материальных ресурсов для создания электродных материалов, активирующих и охлаждающих составов.

3. Важнейшая роль технико-технологических влияний на процессы электродуговой сварки и наплавки отводится импульсным воздействиям с использованием импульсных воздействий систем сварочного оборудования (источники питания дуги, подачи электродной проволоки, подачи защитных сред) и интегрированных систем (генераторы электромагнитных полей, колебателей сварочного инструмента и др.), при этом все большее внимание следует уделять совершенствованию и изучению их возможностей.

4. Особое внимание следует уделить комбинированным системам влияния на дуговой процесс, что позволит охватить более широкий спектр воздействия на формирование сварных швов и наплавленных слоев с минимизацией энергоресурсозатрат и при этом обеспечить оптимальные условия функционирования указанных систем (работа без перегрузок).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патон Б.Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Автоматическая сварка. 2003. Октябрь—ноябрь. С. 7—13.
2. Маковецкая О.К. Основные тенденции на рынке сварочной техники в 2008—2011 гг. и прогноз его развития (Обзор) // Автоматическая сварка. 2012. № 6. С. 44—50.
3. Патон Б.Е. Сучасні дослідження та розробки ІЕЗ ім. Є.О. Патона в галузі зварювання та споріднених технологій // Автоматическая сварка. 2019. № 11. С. 5—18.
4. Патон Б.Е. Проблемы сварки на рубеже веков // Автоматическая сварка. 1999. № 1. С. 4—14.
5. Бадьянов Б.Н. Некоторые проблемы технологии сварки на рубеже веков // Сварочное производство. 2000. № 1. С. 8—11.
6. Патон Б.Е. Технология электрической сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1974. 768 с.
7. Миронов С. Инверторные источники питания для дуговой сварки // Сварочное производство. 2003. № 4. С. 41—43.
8. Эволюция систем импульсной подачи проволоки для сварки и наплавки / Б.Е. Патон, В.А. Лебедев, В.Г. Пичак, С.Ю. Полосков // Сварка и диагностика. 2009. № 3. С. 46—51.
9. Лебедев В.А. Механизированная синергетическая сварка с импульсной подачей электродной проволоки // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 2. С. 19—24.
10. Лебедев В.А., Жук Г.В. Механизированная дуговая сварка и наплавка в разных пространственных положениях с управляемой дозированной подачей электродной проволоки различных типов // Тяжелое машиностроение. 2017. № 6. С. 19—23.
11. Лебедев В.А., Гулый М.В. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2014. № 6. С. 47—51.
12. Брунов О.Г., Федько В.Т., Слистин А.П. Механизмы импульсной подачи сварочной проволоки // Технология металлов. 1999. № 11. С. 7—9.
13. Лебедев В.А., Гедрович А.Н. Техника и технология дуговой сварки и наплавки (нестационарные процессы и режимы работы). Луганск: Ноулидж, 2010. 255 с.
14. Григораш В.В. Управление кристаллизацией металла шва с целью повышения технологической прочности сварных соединений: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1989. 227 с.
15. Денисов Л.С., Барсуков И.В., Аполоник С.А. Разработка и анализ оборудования для сварки с переменной подачей газов // Прогрессивная техника и технология машиностроения, приборостроения и сварочного производства: тр. науч. конф. Киев, 1998. Т. 4. С. 310—313.
16. Тарасов Н.М., Тулин В.М. Управление переносом электродного металла кратковременным повышением скорости истечения защитного газа // Сварочное производство. 1982. № 8. С. 23—25.
17. Жерносеков А.М. Тенденции развития управления процессами переноса металла в защитных газах (Обзор) // Автоматическая сварка. 2012. № 1. С. 33—38.
18. Жерносеков А.М., Сидорец В.Н., Шевчук С.А. Комбинированное импульсное воздействие защитных газов и сварочного тока при сварке плавящимся

электродом // Сварочное производство. 2013. № 12. С. 9—13.

19. **Чинахов Д.А.** Влияние двухструйной газовой защиты на эксплуатационные свойства сварных соединений судостроительной стали GL-E36 // Автоматическая сварка. 2009. № 9. С. 39—42.

20. **Kang Y.H., Na S.A.** Characteristics of welding and arc signal in narrow groove gas metal arc welding using electromagnetic arc oscillation // Welding J. 2003. No. 3. P. 93—99.

21. **Сидоренко П.Ю., Рыжов Р.Н.** Использование импульсных электромагнитных воздействий для управления процессом переноса электродного металла при дуговой сварке // Автоматическая сварка. 2010. № 6. С. 52—53.

22. **Рыжов Р.Н.** Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов // Автоматическая сварка. 2007. № 2. С. 56—58.

23. **Ситников Б.В., Барташ С.Н.** О формировании шва при сварке на весу поперечным магнитным полем // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2015. № 7 (138). С. 53—59.

24. **Васильева Е.И.** Анализ систем слежения за стыком сварного шва // Вестник науки и образования. 2020. № 13 (91). Ч. 1. С. 3—36.

25. **Ивашко В.С., Кураш В.В., Кудина А.В.** Формирование качественных износостойких металлопокрытий способом электродуговой наплавки в ультразвуковом поле с введением в расплав твердосплавной порошковой присадки // Теория и практика машиностроения. 2003. № 2. С. 77—81.

26. **Зарипов М.З., Ибрагимов И.Г., Ризванов Р.Г. и др.** Исследование влияния вибрационных и ультразвуковых колебаний в процессе сварки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 12X18H10T // Нефтегазовое дело. 2010. № 2. С. 1—12.

27. **Макара А.М., Кушнеренко Б.Н.** Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений // Автоматическая сварка. 1967. № 1. С. 31—35.

28. **Чвертко А.И., Патон В.Е., Тимченко В.А.** Оборудование для механизированной дуговой сварки и наплавки. М.: Машиностроение, 1981. 264 с.

29. **Симутенков И.В., Драган С.В., Ярослав Ю.А.** Стабильность дугового процесса при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода // 36. науч. пр. НУК. 2014. № 4. С. 43—48.

30. **Лебедев В.А., Жук Г.В., Драган С.В. и др.** Разработка технологии автоматической наплавки под флюсом с поперечными высокочастотными колебаниями электродной проволоки // Тяжелое машиностроение. 2017. № 6. С. 15—18.

31. **Лебедев В.А.** Автоматическая подводная сварка по увеличенному зазору // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 3. С. 16—20.

32. **Лебедев В.А., Новиков С.В.** Колебатель изделия для автоматической наплавки // Технічні науки та технології. 2020. № 2. С. 11—21.

33. **Лебедев В.А., Новиков С.В.** Анализ параметров управления формированием структуры шва при воздействии механических колебаний низкой частоты на расплав сварочной ванны // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 12. С. 538—541.

34. **Lebedev V.A., Solomichuk T.G., Novykov S.V.** Study if a Welding Harmonic Oscillation influence on the Welded Metal Hardness and Weld Bead Width // Journal of Engineering Sciences. 2019. Vol. 6. P. 16—21.

35. **Пат. 138259.** Спосіб формування структури металу шва / Лебедев В.О., Драган С.В., Галь А.Ф., Симутенков І.В., Новіков С.В., Лой С.А. Опубл. 25.11.19, Бюл. № 22.

36. **А. с. 1729649172 СССР.** Устройство для теплоотвода при сварке / Медко Б.В., Конончук В.В., Лысак В.В., Тихончук П.П. Опубл. 30.04.92, Бюл. № 16.

37. **Крампит Н.Ю., Крампит А.Г.** Сварочные приспособления // ЮТИ ТПУ. 2008. 95 с.

38. **Гедрович А.И., Бородин Е.В., Ненкрутенко В.В.** Исследование перемещения металла при сварке боковых стенок подвижного состава // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2017. № 3 (20). С. 28—34.

39. **Гедрович А.И., Жидков А.Б.** Ресурсосберегающие методы регулирования деформаций и напряжений в сварных металлоконструкциях / Отв. ред. В.М. Лещинский. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2003. 96 с.

40. **Зернин Е.А., Кузнецов М.А.** Способы модифицирования наплавленного металла наноструктурированными порошками для увеличения механических свойств сварных соединений // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14858> (дата обращения: 19.01.2021).

41. **Патон Б.Е., Савицкий М.М., Гвоздецкий В.С.** Применение активных флюсов и активных газов для повышения эффективности дуговой и плазменной сварки // Автоматическая сварка. 2003. № 5. С. 3—6.

42. **Effects of activating flux on arc phenomena in tungsten arc welding** / M. Tanaka, T. Shimizu, H. Terasaki, M. Ushio, F. Koshi-ishi and C.L. Yang // Science and Technology of Welding and Joining. 2000. Vol. 5. No. 6.

43. **Воропай Н.М., Костенюк Н.И.** Влияние состава активированной проволоки на характеристики процесса сварки в углекислом газе // Автоматическая сварка. 1986. № 7. С. 2—5.

44. **Агеева М.В., Размышляев А.Д.** Влияние комбинированного магнитного поля на производительность расплавления проволоки при дуговой наплавке // Технічні науки та технології. 2019. № 4 (18). С. 22—27.

45. **Патон Б.Е., Лебедев В.А., Микитин Я.И.** Способ комбинированного управления процессом переноса электродного металла при механизированной дуговой сварке // Сварочное производство. 2006. № 8. С. 27—32.

46. **Применение** импульсных воздействий при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов / В.А. Лебедев, С.В. Драган, Г.В. Жук, С.В. Новиков, И.В. Симутенков // Автоматическая сварка. 2019. № 8. С. 30—40.

47. **Recent advances in friction stir welding process, weldment structure and properties** / R. Nandan et al. // Progress in Materials Science. 2008. No. 53.

48. **Development of digital gas metal arc welding system** / M.D. Ngo et al. // Journal of materials processing technology. 2007. Vol. 189. No. 6. P. 384—391.

49. **Лаврова Е.В.** Исследование процесса расплавления ленточного электрода с принудительным переносом электродного металла // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. 2015. № 2 (2). С. 62—67.

50. **Лебедев В.А.** Восстановление и упрочнение узлов строительной и монтажной техники с импульсной подачей электродной лентой // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2016. № 6. С. 2—4.

51. **Лебедев В.А., Новиков С.В., Жук Г.В.** Научно обоснованное совершенствование элементов дуговой механизированной сварки и наплавки // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 1. С. 14—18.

*Владимир Александрович Лебедев, д-р техн. наук,
dktbpaton@gmail.com*