

УДК 621.791.754.029

В. В. АТРОЩЕНКО, В. Н. ТЕФАНОВ, К. А. КРАЕВ**К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ
ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА
ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ
С КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ ДУГОВОГО ПРОМЕЖУТКА**

Рассмотрена проблема переноса электродного металла для дуговой сварки плавящимся электродом, а также методы оптимизации процесса. Указаны основные недостатки существующих методов управления переносом металла. Сформировано направление научного исследования, где перенос электродного металла контролируется с учетом большинства параметров сварочной дуги. *Перенос металла; СПЭ; СМТ; СТТ; управление параметрами дуги; корреляция*

Одним из наиболее распространенных способов дуговой сварки является сварка плавящимся электродом из-за простоты осуществления процесса, универсальности и меньших затрат на вспомогательные операции и оборудование. Однако наряду с известными достоинствами, этот процесс характеризуется нестабильностью и повышенным разбрызгиванием электродного металла, что снижает эффективность его применения. В связи с этим в исследованиях наибольшее внимание уделяется изучению теплофизических характеристик дуги, стабильности процесса сварки, переносу электродного металла и управлению им, разработке новых конструкций источников питания, токоподвода, подающих механизмов и т. д.

Авторами было отмечено, что при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка, характер плавления и переноса электродного металла значительно влияет на технику наложения, производительность и качество сварного шва; в частности, управление данным процессом позволяет существенно снизить разбрызгивание металла, что повышает характеристики сварного шва и исключает его последующую обработку [1]. Характеристики переноса расплавленного металла зависят от многих трудноучитываемых факторов. Их значения в процессе сварки колеблются около некоторой средней величины, подчиняясь закону нормального распределения.

Исследования процессов образования и переноса капель связаны с большими трудно-

стями. В настоящее время прояснилась общая картина явлений плавления и переноса металла [2, 3]. Однако недостаток экспериментального материала до сих пор затрудняет их полную количественную характеристику.

Настоящая работа посвящена анализу современного состояния вопросов управления переносом электродного металла при импульсно-дуговой сварке, а также рассмотрению наиболее эффективных путей их решения.

**1. МЕХАНИЗМ КАПЛЕОБРАЗОВАНИЯ
И ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА**

Интерес к процессу переноса электродного металла активизировался с середины XX в. До этого этапа процесс был неконтролируемым, и параметры дуги определялись в основном лишь заданным током сварки и регулированием вылета электрода.

Механизм каплеобразования и переноса электродного металла [4] в сварочную ванну на примере базового способа сварки [5] можно представить следующим образом [6]. На стадии горения дуги τ_2 происходит интенсивное расплавление торца электрода и свариваемой детали. При этом вследствие силового воздействия дуги металл сварочной ванны вытесняется в хвостовую часть и удерживается там в течение всей стадии плавления. По истечении заданного времени τ_2 производится ступенчатое уменьшение значения сварочного тока до тока паузы. Это приводит к соответствующему снижению скорости плавления электрода и ослаблению силового

воздействия дуги на сварочную ванну, которая стремится в этот момент заполнить кратер, образовавшийся под торцом электрода на стадии действия импульса тока. Одновременно с этим, вследствие уменьшения сил реактивного давления паров испаряющегося металла и выделения газа, ослабления электродинамической силы и силы потоков плазмы дуги, капля электродного металла, в основном благодаря действию силы тяжести и силы поверхностного натяжения, стремится занять соосное с электродом положение.

В результате этих встречных движений и непрерывной подачи электрода происходит принудительное короткое замыкание, в начальный момент которого в сварочной цепи производят увеличение тока. Ток нарастает по экспоненте, определяемой в основном индуктивным сопротивлением сглаживающего дросселя. При таком механизме переноса электродного металла образование устойчивой перемычки между электродом и сварочной ванной достигается в первой фазе короткого замыкания, что позволяет значительно повысить скорость нарастания тока короткого замыкания и тем самым ускорить образование и разрушение жидкой перемычки. При этом на стадии короткого замыкания переход электродного металла в сварочную ванну сопровождается увеличением падения напряжения; при лавинообразном его росте производят ступенчатое уменьшение тока. Перемычка разрушается при небольшом токе паузы. Длительность паузы устанавливается либо параметрически, либо в зависимости от состояния дугового промежутка на данной стадии. По окончании паузы ток увеличивают и осуществляют плавление электрода в импульсе. Далее процессы протекают аналогично описанным выше.

Изложенный механизм (способ электродуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка) [5] управляемого переноса электродного металла в сварочную ванну сохраняется и при реализации других алгоритмов импульсного управления энергетическими параметрами процесса. Отличие состоит лишь в том, что возмущающие воздействия, вызываемые капельным переносом электродного металла и обуславливаемые особенностями формирования металла шва в различных пространственных положениях, отрабатываются на разных этапах сварочного цикла.

2. ИСТОРИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА

Проблема каплепереноса встала перед исследователями довольно давно, но бурное развитие получила в 70-е гг. XX в. Позже, в середине 90-х гг., в связи с развитием электроники и прецизионной техники, появлением нейронных сетей и других методов автоматизации процесса, проблема стала развиваться с еще большей интенсивностью.

При исследовании дуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка выделяются две основные стадии (характерные для каждого сварочного микроцикла) — короткого замыкания и горения дуги. Первая соответствует переносу, вторая — как плавлению электродного металла, так и движению металла сварочной ванны в пределах отдельного микроцикла. С учетом этого сформулированы две основные технологические задачи применительно к совершенствованию процесса сварки короткой дугой: уменьшение разбрызгивания электродного металла и повышение стабильности процесса сварки [6].

Для решения этих задач исследованы существующие способы сварки [7, 8, 9, 10], в которых производится уменьшение сварочного тока к моменту разрыва перемычки. В одном из этих способов [7] пауза в протекании сварочного тока задается с определенным запаздыванием относительно начала короткого замыкания, в других [8, 9, 10] начало паузы в протекании сварочного тока совмещается с достижением перемычкой критических размеров (процесс ее разрушения необратим). Во всех указанных способах сварки разрушение перемычки происходит при небольшом значении тока паузы, что обеспечивает уменьшение разбрызгивания электродного металла в момент повторного возбуждения дуги.

При использовании других методов уменьшения разбрызгивания в начальный период короткого замыкания производят уменьшение тока в момент начала короткого замыкания [4, 11, 12, 13]. При таких способах сварки обеспечиваются благоприятные условия для развития контакта капли и сварочной ванны в момент начала короткого замыкания. При этом в способе сварки [11, 12] паузу в протекании сварочного тока в момент начала короткого замыкания делают минимально возможной с таким расчетом, чтобы исключить влияние непрерывной подачи электрода на устойчивость процесса. После окончания паузы ток увеличивают и при достиже-

нии переключкой критических размеров вновь уменьшают его. Описанный характер изменения мгновенной мощности на стадии короткого замыкания позволяет полностью исключить неполные короткие замыкания и уменьшить разбрызгивание электродного металла.

Для устранения влияния силового воздействия дуги на сварочную ванну были предложены способы сварки [14], в которых осуществляется гашение энергии, запасенной в дросселе на интервале короткого замыкания. В одном из них гашение энергии осуществляется путем введения в сварочную цепь активного сопротивления, а в другом — посредством применения специальной схемы шунтирования сварочного дросселя диодом и резистором. В обоих случаях происходит ограничение газодинамического удара, что также способствует уменьшению разбрызгивания.

Проанализировав проведенные с целью решения первой технологической задачи многочисленные исследования, способствовавшие выявлению причин разбрызгивания электродного металла, следует отметить, что такой путь решения проблемы позволяет лишь частично устранить причины разбрызгивания электродного металла, как правило, в области малых значений тока и при использовании электродных проволок малых диаметров.

В связи с этими обстоятельствами, наиболее перспективным представляется второе направление исследований, связанное с решением задачи повышения стабильности процесса сварки, то есть поддержания неизменных во времени его электрических и тепловых характеристик, либо изменения их по определенной программе.

Существуют способы сварки [14, 15, 16], в которых для расплавления определенного количества электродного металла используют принудительные короткие замыкания — путем наложения на ток дуги постоянной полярности импульсов тока противоположной полярности либо посредством периодического снижения напряжения с заданной частотой. Указанные способы сварки позволяют стабилизировать процессы каплеобразования и переноса электродного металла в сварочную ванну. Однако при практической реализации этих способов не удается полностью устранить основные недостатки процесса, так как расплавление и перенос электродного металла не осуществляются при строго повторяющихся микроциклах, что является непременным условием стабильности процесса сварки.

Ко второй группе способов сварки [17, 18], предложенных в целях решения задачи повышения стабильности процесса, относятся способы, обеспечивающие импульсную подачу проволоки. Такие способы особенно эффективны, когда необходимо управлять формированием металла шва.

В рамках третьей группы способов сварки [19] управление переносом электродного металла достигается наложением на дугу импульсов тока. На стадии импульса происходит интенсивное плавление электродного металла, затем осуществляется его переход в сварочную ванну на стадии короткого замыкания. При этом в рассматриваемом способе в течение всей стадии короткого замыкания производится ограничение тока, что обеспечивает уменьшение энергии взрыва переключки, но одновременно и увеличивает длительность ее существования. Такое течение процесса в определенных условиях сварки, например, при повышении средних значений тока, неизбежно приводит к нарушению устойчивости процесса. Обеспечивается управление скоростью плавления электрода путем наложения на дугу кратковременных импульсов тока, но при этом не создаются условия для принудительного переноса сформированной капли электродного металла в сварочную ванну на стадии короткого замыкания. Переход электродного металла в сварочную ванну носит здесь случайный характер, что приводит к увеличению разбрызгивания и нарушению стабильности процесса.

При анализе данного направления исследований следует отметить, что все разрабатываемые алгоритмы управления переносом электродного металла во время коротких замыканий дугового промежутка реализуются в основном при помощи жестко задаваемой программы. Именно поэтому такие процессы сварки весьма чувствительны к различного рода возмущающим воздействиям, что, как правило, приводит к нарушению стабильности процесса и требует длительной настройки на требуемый режим.

В конце 80-х гг. сформировалось и успешно осуществлялось направление исследований, которое позволяет значительно расширить технологические возможности электродуговых процессов благодаря реализации алгоритмов импульсного управления, выбираемых в зависимости от изменения энергетических параметров процесса, задаваемых по каналам обратных связей. Суть такого подхода заключается в периодическом импульсном

воздействию, с одной стороны, на характеристики плавления и переноса электродного металла, а с другой — на процессы формирования сварного шва.

На сегодняшний день одним из самых современных процессов в этой области является дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки — процесс CMT (Cold Metal Transfer — перенос холодного металла). Здесь процесс переноса металла достигается за счет отвода проволоки в момент возникновения короткого замыкания, что помогает отделению капли. Короткое замыкание под контролем, ток короткого замыкания незначителен, что обеспечивает перенос металла с минимальным образованием брызг.

Также довольно известным является процесс STT (Surface Tension Transfer — перенос за счет сил поверхностного натяжения) [20], который принципиально отличается возможностью прямого управления условиями переноса наплавляемого металла в сварочную ванну. Эта возможность обеспечивается быстродействующей инверторной схемой источника питания, специальным электронным микропроцессорным модулем, принудительно задающим необходимый уровень сварочного тока и контуром обратной связи, динамично отслеживающим изменения напряжения на дуге. В течение всего цикла переноса капли в сварочную ванну величина сварочного тока жестко зависит от фазы формирования и перехода последней. Идентификация фазы переноса осуществляется за счет обработки величины напряжения, постоянно снимаемого с дугового промежутка.

В настоящее время интенсивно развиваются следующие принципиально разные направления управления каплемаассопереносом электродного металла в сварочную ванну:

- механическим воздействием на электродную проволоку с целью придания ей продольных импульсов движения при подаче в зону горения дуги;
- импульсное изменение характеристик источника сварочного тока;
- силовое воздействие потока газа на перенос капли непосредственно в зоне горения дуги;
- использование защитной атмосферы дуги с активирующими веществами.

Для реализации процесса управления каплемаассопереносом используют конструкции полуавтоматов с введением обратных связей по параметрам технологического процесса (току и напряжению дуги) с источником

питания дуги. При этом можно разделить обратные связи по источникам получения информации о текущем состоянии дугового процесса: по току и напряжению дугового процесса (I_d , U_d) и временным характеристикам цикла переноса электродного металла (время горения дуги $\tau_{г.д.}$, время короткого замыкания $\tau_{к.з.}$, время цикла сварки τ) [21].

Известно, что обратные связи по технологическим параметрам дугового процесса (I_d , U_d) существенно влияют на устойчивость процесса сварки, способствуют снижению разбрызгивания электродного металла, улучшают формирование сварного соединения.

При введении отрицательной обратной связи по напряжению дуги в цепь управления электроприводом подачи осуществляется поддержание оптимальной зависимости между током и напряжением при существенных колебаниях напряжения сети, питающей источник сварочного тока. При введении отрицательной обратной связи по току возможна компенсация изменений тока дугового процесса любого происхождения. Имеются технические решения, когда обратные связи по технологическим параметрам вводятся не только с определенными коэффициентами, но и с выполнением определенных алгоритмов оптимизации.

Известны некоторые технические решения, в которых в качестве обратных связей используются временные характеристики процесса переноса электродного металла. В этом случае важна информация о длительности горения дуги t_r , короткого замыкания $t_{к.з.}$ и цикла переноса электродного металла. Естественно, обратные связи по временным характеристикам процесса переноса информативны в том случае, если сварка осуществляется с подачей импульсов тока при переходе капли электродного металла в ванну [22].

Ряд исследователей [22, 23, 24] провели анализ расчетных данных формы импульсов тока, который показал следующее. Наименее эффективна с точки зрения относительного уменьшения времени короткого замыкания форма импульса тока (рис. 1, а), которая реализуется наиболее распространенными в настоящее время инверторными источниками питания. К тому же для реализации такой формы импульсов необходимо учитывать скорость нарастания тока и максимальный ток в конце импульса. Форма импульса тока, приведенная на рис. 1, б, тем эффективнее по сравнению с формой, приве-

денной на рис. 1, а, чем больше максимальное значение тока импульса. Для обеспечения устойчивости первоначального контакта капли с ванной, наименьшего разбрызгивания при окончании короткого замыкания и достижения при этом высокой эффективности по времени короткого замыкания, наиболее эффективна форма импульса тока, приведенная на рис. 1, в, даже при незначительном повышении тока в импульсе по сравнению с принятым базовым значением тока. Форма импульса тока (рис. 1, г), хотя и обеспечивает максимальную эффективность, но трудна в реализации, поскольку необходимо обеспечить окончание действия импульса до разрыва перемычки. Результаты проведенных исследований показали, что одинаковую эффективность с формой импульса тока, приведенной на рис. 1, б, обеспечивает окончание действия импульса тока формы (рис. 1, г) приблизительно за 0,0075 с до разрыва перемычки.

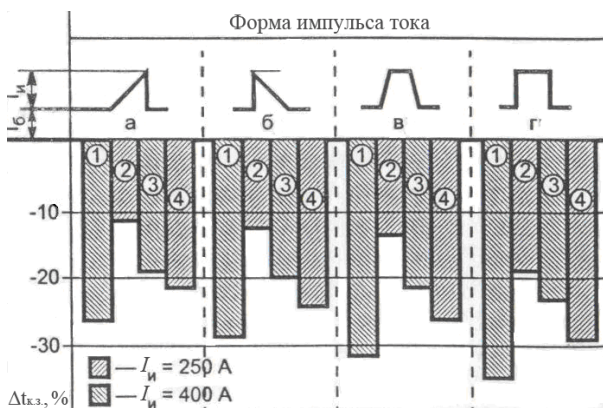


Рис. 1. Зависимость относительного уменьшения времени короткого замыкания от формы дополнительного импульса тока $\tau_{к.з.}$ после касания (1, 3) и с момента касания капель поверхности ванны (2, 4) [24]

Кроме того, были проведены исследования по зависимости размера капли от мгновенной скорости плавления электрода, периодически изменяющейся во времени. При этом большинство существующих графических обработок кинограмм процесса плавления и переноса электродного металла показывают, что масса капли в течение небольшого отрезка времени растет чаще линейно (с небольшими отклонениями, позволяющими выполнить аппроксимацию), а иногда плавно замедляясь к концу периода данного времени. На рис. 2 [25] в графическом виде показано плавное снижение скорости роста капли к завершению периода времени τ . Согласно исследованиям, скорость плавления стержня, а следо-

вательно, скорость роста капли (в промежутке τ) должна замедляться по мере увеличения размеров капли до ее отрыва. Однако несмотря на это, можно утверждать, что закон, описывающий изменения массы капли в течение отрезка времени τ , остается нераскрытым. В публикациях пока не просматриваются и четкие различия между закономерными изменениями скорости плавления в небольшом промежутке времени τ и случайными изменениями скорости плавления на протяжении всего процесса сварки; к этому не относятся закономерные изменения скорости плавления, связанные с нагревом электрода. Кроме того, рис. 2 наглядно отражает несостоявшийся процесс плавного отделения капли от торца электрода, что позволяет утверждать, что проблематика вышеупомянутого процесса актуальна и по сей день.

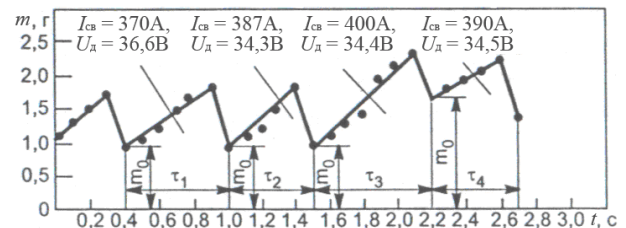


Рис. 2. Изменение массы жидкого металла электрода с покрытием большой толщины по времени [25]

3. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ КАПЛЕМАССОПЕРЕНОСА

Итак, в настоящее время существует множество способов получения импульсно-дугового процесса, а именно [26]: изменение эффективного потенциала ионизации атмосферы дуги, воздействие на системы подачи присадочного материала, электромагнитные методы воздействия, силовое воздействие потока газа на перенос капли непосредственно в зоне горения дуги, модулирование тока воздействием на электрические параметры сварочной цепи и др. К причинам, препятствующим достижению требуемого технического результата при использовании известных способов регулирования, относится то, что эти способы не обеспечивают достаточной стабильности процесса сварки, так как в процессе регулирования используется параметр — время цикла короткого замыкания [27] и не учитывается ряд других характеристик процесса, определяющих его стабильность, например, размер капли, характер движения капли и взаимодействие ее с жидкой ванной расплавленного металла. Поэто-

му все эти методы оценки состояния капле-массопереноса являются усредненными и не обеспечивают постоянного контроля за всеми основными параметрами сварочной дуги (такими как мгновенные значения тока, напряжения на дуге, длины дугового промежутка, мгновенной мощности дуги и пр.) с введением обратных связей для своевременного контроля этих параметров и формирования управляющего воздействия на дугу, а также не регулируют процесс образования капли до нужного размера и ввод ее в сварочную ванну.

Целью данного исследования является повышение качества сварного соединения за счет улучшения управляемости переносом электродного металла и стабилизации размера переносимых капель за счет более точного дозирования энергии на расплавление капли [1]. Поставленная задача решается тем, что в способе импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом производится автоматическое регулирование длины дугового промежутка путем изменения параметров импульсов сварочного тока в зависимости от вышеперечисленных параметров; способ позволит учитывать изменяющиеся в процессе сварки параметры режима и корректировать их в соответствии с эталонными значениями. Учет в процессе сварки реального характера изменения энергетических и временных параметров режима и контролирование мгновенной мощности дуги дает возможность учитывать объем капли и регулировать характер ее перехода и взаимодействия с ванной, что уменьшает разбрызгивание расплавленного металла электрода из сварочной ванны, повышает стабильность горения дуги и, следовательно, качество соединения; при появлении высокочастотной составляющей напряжения дуги, предшествующей разбрызгиванию капли, происходит контролирование (уменьшение) сварочного тока [1].

При изучении дуговой сварки разных соединений из различных материалов часто используются экспериментальные методы построения модели процесса в виде регрессионной зависимости между параметрами [28]. Точность такой модели в значительной степени зависит от достоверности результатов экспериментов. Это обстоятельство играет существенную роль для многопараметрических процессов, когда суммарная ошибка контроля или измерения всех величин может превысить допустимое значение, при котором данную модель можно использовать для расчетов. Однако при экспериментах практически невозможно избежать ошибок. Область опти-

мальных режимов сварки, при которых возможно выделение импульсов тока и напряжения дуги в период между короткими замыканиями, мала, поэтому при реализации методов исследований не исключена возможность выхода из указанной области, что приведет к нестабильности процесса сварки, повышенному разбрызгиванию расплавленного электрода из сварочной ванны.

Поэтому для изучения процесса капле-массопереноса в данном исследовании рассматриваются методы математической статистики как наиболее точные способы регистрации параметров режимов импульсно-дуговой сварки. При обработке результатов экспериментов используется один из методов математической статистики — корреляция. Возможности применения корреляционных методов в технике измерений заключаются в использовании специальных свойств корреляционных функций. Имеются три основные области применения [28]:

- анализ сигнала по методу автокорреляции для обнаружения или подчеркивания детерминированных составляющих из сопровождающего шума;
- определение времени прохождения тел или же их скорости при помощи взаимной корреляции;
- определение передаточной функции систем при помощи взаимной корреляции.

Спектральный анализ — это один из методов обработки сигналов, который позволяет охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала. Преобразование Фурье является математической основой, которая связывает временной или пространственный сигнал (или же некоторую модель этого сигнала) с его представлением в частотной области. Методы статистики играют важную роль в спектральном анализе, поскольку сигналы, как правило, имеют шумовой или случайный характер. Если бы основные статистические характеристики сигнала были известны точно или же их можно было бы без ошибки определить на конечном интервале этого сигнала, то спектральный анализ представлял бы собой отрасль точной науки. Однако в действительности по одному-единственному отрезку сигнала можно получить только некоторую оценку его спектра [29].

Реализация корреляционных алгоритмов осуществляется решением уравнений, определяющих корреляционную функцию, с тремя основными операциями — сдвигом сигнала по времени, умножением двух сигналов и

кратковременным усреднением полученного произведения; а также нахождением обратного преобразования Фурье спектральной плотности какой-либо функции — этот метод, казалось бы обходной, представляет интерес благодаря преимуществам эффективного алгоритма быстрого преобразования Фурье.

Имеются два рода корреляционных функций: автокорреляционная функция $\Phi_{ii}(\tau)$, $\Phi_{uu}(\tau)$ и взаимная корреляционная (кросс-корреляционная) функция $\Phi_{xy}(\tau)$, которые для непрерывных сигналов определяются следующим образом [30]:

$$\Phi_{ii}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{t=-T}^{+T} [i(t)i(t-\tau)] dt,$$

$$\Phi_{uu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{t=-T}^{+T} [u(t)u(t-\tau)] dt$$

и

$$\Phi_{iu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{t=-T}^{+T} [i(t)u(t-\tau)] dt,$$

где $i(t)$ и $u(t)$ — текущие значения сварочного тока и напряжения на дуге соответственно.

Несмотря на то, что корреляционные функции являются функциями от средних значений по времени, они наряду с указанием средней мощности сигнала $\Phi_{iu}(\tau)$ содержат также в неявной форме и всю информацию о его спектральных свойствах. Корреляционные функции и спектральные плотности являются взаимными по преобразованию Фурье, то есть могут быть преобразованы одна в другую без потери информации. Следовательно, все статистические процессы, имеющие одну и ту же корреляционную функцию, имеют одинаковый характер мощностного спектра [31].

При измерении параметров сварочной дуги все экспериментальные данные систематизируются, случайные ошибки отбрасываются и строятся взаимно-корреляционные зависимости тока и напряжения на дуге.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно истории развития знаний о каплемассопереносе, наиболее проблемным остается автоматизация процесса и обеспечение стабильного переноса металла с учетом всех кинетических, электрических и других параметров сварочной дуги в условиях действия

всевозможных возмущающих факторов. Импульсный режим для MIG и MAG сварки часто реализуется за счет импульсной подачи проволоки, в то время как для сварки штучным электродом этой возможности нет, поэтому ситуация с определением параметров и контроля сварки усложняется. К тому же, при всех преимуществах сварки с подачей электродной проволоки, сварка штучным электродом еще долгое время будет широко применяться при проведении различных сварочных работ, поэтому данный тип сварки заслуживает повышенного внимания как наименее управляемый с точки зрения переноса электродного металла.

Указанные в настоящей работе преимущества управляемых процессов сварки позволяют разрабатывать роботизированные технологические процессы, реализуемые при помощи адаптивных систем автоматического управления на базе ЭВМ и микропроцессоров. Создание таких роботизированных технологических комплексов обеспечивает значительное повышение эффективности дуговой сварки и наплавки.

На данный момент практически отсутствуют исследования спектральных частот сварочной дуги, что дает определенный пробел знаний в данной области. Использование же указанных методик позволяет оценить параметры сварочной дуги на качественно новом уровне.

Метод корреляции позволяет наиболее полно оценить картину образования капли и ввода ее в сварочную ванну как более «сильный» математический метод по сравнению с ранее использовавшимся регрессионным методом математической статистики. Применение статистических методов корреляции в других областях техники, в частности, в электрических измерениях, позволяет с некоторой степенью уверенности утверждать, что данный способ исследований актуален и является достоверным для сварочного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Атрощенко, В. В.** Экспериментальные исследования и построение математической модели процесса сварки плавящимся электродом / В. В. Атрощенко, В. Н. Тэфанов, К. А. Краев. Сварка. Контроль. Реновация—2006 : тр. 6-й науч.-техн. конф. Уфа : Гилем, 2007. С. 12–17.
2. **Дюргеров, Н. Г.** Определение свойств дуги при импульсных процессах сварки / Н. Г. Дюргеров, Д. Х. Сагиров // Сварочное производство. 2004. № 4. С. 14–17.

3. **Шатило, С. П.** Модель переноса электродного металла при РДС / С. П. Шатило, В. Д. Макаренко // Сварочное производство. 1999. № 7. С. 3–6.
4. **Потапьевский, А. Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А. Г. Потапьевский. М. : Машиностроение, 1974. 240 с.
5. **Князьков, А. Ф.** Способ электродуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка. А.с. 768108 СССР, МКИЗ В 23 К 9/00 / А. Ф. Князьков, Ю. Н. Сараев, Р. И. Дедюх. Оpubл. 15.01.84, Бюл. № 2.
6. **Сараев, Ю. Н.** Управление переносом электродного металла при сварке в CO₂ с короткими замыканиями дугового промежутка / Ю. Н. Сараев // Автоматическая сварка. 1988. № 12. С. 16–23.
7. **Заруба, И. И.** Способ электродуговой сварки плавящимся электродом. А.с. 271680 СССР, МКИ1 В 23 К 9/00 / И. И. Заруба. Оpubл. 26.05.70, Бюл. № 8.
8. **Зайцев, А. И.** Способ электродуговой сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка. А.с. 592539 СССР, МКИ2 В 23 К 9/16 / А. И. Зайцев, А. Ф. Князьков, Р. И. Дедюх [и др.]. Оpubл. 15.02.78, Бюл. № 6.
9. **Пинчук, И. С.** Способ электродуговой сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка. А.с. 563241 СССР, МКИ2 В 23 К 9/00 / И. С. Пинчук, В. Ф. Постаушкин, Г. Д. Куликов [и др.]. Оpubл. 30.06.77, Бюл. № 24.
10. **Степанов, В. В.** К вопросу о механизме разрушения перемычки жидкого металла между электродом и сварочной ванной / В. В. Степанов, В. Н. Белоусов, Д. Д. Остров // Сварочное производство. 1977. № 1. С. 3–8.
11. **Пинчук, И. С.** Стабилизация переноса и снижение разбрызгивания электродного металла при сварке в CO₂ короткой дугой / И. С. Пинчук, А. Л. Хейфец, В. Ф. Постаушкин [и др.] // Сварочное производство. 1980. № 6. С. 9–10.
12. **Boughton, P.** Control of short circuiting in MIG-welding / P.Boughton // Weld. Res. Int. 1974. 4, № 2. P. 31–53.
13. **Заруба, И. И.** Влияние метода ограничения тока короткого замыкания на формирование вертикальных и потолочных швов при сварке в углекислом газе / И. И. Заруба, В. П. Баргамен, В. В. Андреев [и др.] // Автоматическая сварка. 1973. № 4. С. 64–67.
14. **Лосев, В. Г.** Способ электродуговой сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка. А.с. 519293 СССР, МКИ2 В 23 К 9/16 / В. Г. Лосев, Б. Е. Пенкевич, В. Е. Пенкевич. Оpubл. 30.06.76, Бюл. № 24.
15. **Способ** дуговой сварки. А.с. 316542 СССР, МКИ1 В 23 К 9/08 / А. Г. Потапьевский, В. С. Мечев, Н. И. Костенюк. Оpubл. 07.01.72, Бюл. № 30.
16. **Щекин, В. А.** Принудительный перенос металла при сварке модулированным током в углекислом газе / В. А. Щекин, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров [и др.] // Сварочное производство. 1973. № 3. С. 23.
17. **Шигаев, Т. Г.** Приемы модулирования сварочного тока и устройства для их осуществления / Т. Г. Шигаев // Автоматическая сварка. 1983. № 8. С. 51–55.
18. **Патон, Б. Е.** Управление процессом дуговой сварки путем программирования скорости подачи электродной проволоки / Б. Е. Патон, Н. М. Воропай, В. Н. Бучинский [и др.] // Автоматическая сварка. 1977. № 1. С. 1–5.
19. **Патон, Б. Е.** Способ автоматической импульсно-дуговой сварки. А.с. 162262 СССР, МКИ1 В 23 К 9/00 / Б. Е. Патон, А. Г. Потапьевский. Оpubл. 22.12.69, Бюл. № 3.
20. **Stava, E. K.** Method and apparatus for electric arc welding : Пат. 754671 Австралия, МПК6 В 23 К 009/09 В 23 К 009/09 / E. K. Stava, C. Hsu, P. Nicholson. Lincoln Global, Inc. № 200155933; Заявл. 24.07.2001; Оpubл. 21.11.2002.
21. **Сергиенко, С. В.** Цифровая обработка сигналов / С. В. Сергиенко. М. : Машиностроение, 2005. 544 с.
22. **Князьков, А. Ф.** Способ импульсно-дуговой сварки. Пат. 2133660 Россия, МПК6 В 23 К 9/09 / А. Ф. Князьков, И. Ю. Крампит, А. В. Петриков. ПО Юргин. машиностроит. з-д. № 97113232/02; Заявл. 31.07.97; Оpubл. 27.07.99, Бюл. № 21.
23. **Лебедев, В. А.** Управление процессом механизированной сварки в углекислом газе с использованием параметров переноса электродного металла / В. А. Лебедев [и др.] // Сварочное производство. 2002. № 5. С. 6.
24. **Шатило, С. П.** Модель переноса электродного металла при ручной дуговой сварке / С. П. Шатило // Сварочное производство. 1999. № 7. С. 3.
25. **Тарасов, Н. М.** Численное моделирование процесса формирования капли расплавленного металла на торце плавящегося электрода / Н. М. Тарасов, А. К. Горлов, С. Н. Лашко // Автоматическая сварка. 2002. № 6. С. 24.
26. **Князьков, А. Ф.** Способ импульсно-дуговой сварки. Пат. 2133660 Россия, МПК6 В 23 К 9/09 / А. Ф. Князьков, И. Ю. Крампит, А. В. Петриков; ПО Юргин. машиностроит. з-д. № 97113232/02; Заявл. 31.07.97; Оpubл. 27.07.99, Бюл. № 21.
27. **Гладков, Э. А.** Оценка качества сварных соединений при аргонодуговой сварке с помощью нейросетевых моделей с регрессионным входом / Э. А. Гладков, А. В. Малолетков // Сварочное производство. 2000. № 2. С. 9.
28. **Мирский, Г. Я.** Аппаратурное определение характеристик случайных процессов / Г. Я. Мирский. М. : Наука, 1967. 241 с.

29. **Френкс, Л.** Теория сигналов / Л. Френкс. М. : Сов. радио, 1974. 263 с.
30. **Дубров, А. М.** Многомерные статистические методы / А. М. Дубров. М. : Финансы и статистика, 2000. 156 с.
31. **Измерения** в промышленности. Справ. изд. в 3-х кн. Кн. 1. Способы измерения и аппарата. М. : Металлургия, 1990. 344 с.



ОБ АВТОРАХ

Атрощенко Валерий Владимирович, проф. каф. ОиТСП. Дипл. инженер по электромех. (УГАТУ, 1974). Д-р техн. наук по автоматизир. технологич. процессам электрообр. металлов (УГАТУ, 1991). Иссл. в обл. автоматизации и автоматизации сварочн. производства, прогрессивн. методов сварки.



Тэфанов Валерий Николаевич, доц. той же каф. Дипл. инженер по электрон. технике (УГАТУ, 1977). Канд. техн. наук по машинам и технолог. свароч. производства (ЛПИ, 1988). Иссл. в области автоматизац. и теории, техн. и оборуд. сварочн. производства, упр. параметрами дугов. и контактн. сварки.



Краев Константин Александрович, асп. каф. оборудования и технологии сварочного производства. Дипл. магистр техники и технологии по технологии и машинам сварочного производства (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. автоматизации и управления параметрами дуговой сварки.