УДК 621.791.03

Современные способы импульсно-дуговой MIG/MAG сварки

Крампит А.Г., Зернин Е.А., Крампит М.А.
ГОУ ВПО «Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета», Юрга, Россия (652050, Юрга, Россия, ул. Ленинградская, 26)
e-mail: krampitm@tpu.ru

В статье представлены способы управления свойствами сварочной дуги, путем программирования силы тока, напряжения и скорости подачи проволоки. Рассмотрены способы импульсно-дуговой сварки по назначению от различных производителей, рассмотрены осциллограммы и полученные микрошлифы. Показана область применения данных процессов.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка, сварка модулированным током, сварка пульсирующей дугой, сварка с импульсной подачей проволоки.

Modern methods of pulsed-arc MIG / MAG welding

KrampitA.G., Zernin E.A., KrampitM.A.
Yurga Institute of Technology (branch) of Tomsk Polytechnic University, Yurga, Russia (652050, Jurga , Russia,. street Leningradskaya, 26)
e-mail: krampitm@tpu.ru

The article presents the methods of controlling properties of the arc by programming current, voltage and wire feed speed. The methods of pulsed arc welding diversion from different manufacturers are considered and the resulting waveform Microsections. Shows the area of application of these processes.

Ключевыеслова: pulse arc welding, the modulated current, pulsed arc welding, pulsed welding wire feed.

Введение

Управление сварочной дугой и ее свойствами необходимо для повышения стабильности горения дуги и получения направленного переноса электродного металла в сварочную ванну, что особенно актуально при сварке в положениях, отличных от нижнего, а также воздействия на процессы, протекающие в сварочной ванне в околошовной зоне (управление первичной кристаллизацией металла шва и термическим циклом в околошовной зоне)[1].

Импульсные процессы при сварке можно разделить на:
-сварку модулированным током;
-импульсно-дуговую сварку;
-сварка пульсирующей дугой;
-импульсная подача проволоки.

Сварка модулированным током

С целью удержания сварочной ванны в пространственных положениях отличных от нижнего сварочный ток необходимо снизить, а для обеспечения требуемых сварочно-технологических свойств электрода ток должен быть значительно больше величины, обеспечивающей удержание сварочной ванны. Сварщик решает эту задачу, выполняя электродом различные манипуляции, вплоть до обрыва дуги, что приводит к образованию дефектов, как при сварке корня шва, так и заполняющих слоев.

Выполнение указанных противоречивых требований возможно методами импульсной модуляции сварочного тока (рисунок 1). По сравнению со сваркой стационарной дугой, сварка модулированным током имеет ряд основных преимуществ это улучшение

формирования шва во всех пространственных положениях, повышение механических свойств, сварных соединений, улучшение дегазации сварочной ванны, снижение сварочных деформаций и др. [2].

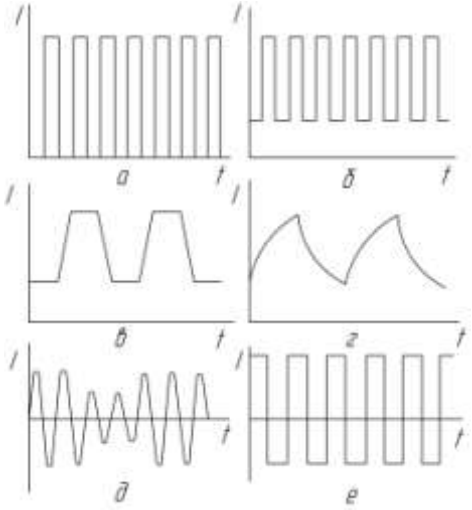


Рис. 1 - Циклограммы процессов сварки модулированным током [3]:
а, б, в, г) низкая частота следования импульсов с изменением скорости подачи;
д) изменение амплитуды при модулировании переменного тока; е) сварка разнополярными импульсами.

Дополнительные импульсы, протекающие в интервале основной паузы, обеспечивают технологическую устойчивость процесса сварки модулированным током. Их длительность и частота влияют на равномерное плавление покрытого электрода без образования “козырька”, а также при сварке корневых швов и изделий малой толщины – на поддержание существования “замочной скважины” [4].

Сварка пульсирующей дугой

Сварка пульсирующей дугой представляет собой специализированный процесс сварки со струйным переносом металла. При горении пульсирующей дуги в инертных газах может наблюдаться очень мелкокапельный перенос электродного металла. Название "струйный" он получил потому, что при его наблюдении невооруженным глазом создается впечатление, что расплавленный металл стекает в сварочную ванну с торца электрода непрерывной струей. Изменение характера переноса электродного металла с капельного на струйный происходит при увеличении сварочного тока до "критического" для данного диаметра электрода или же при подаче импульсного напряжения.

Сварка пульсирующей дугой может применяться и в сварке вольфрамовой дугой (TIG). Контур шва и глубина провара отлаживаются при этом процессе очень хорошо. Импульсы высокого напряжения быстро обеспечивают глубину расплавления основного металла, но не вызывают интенсивного разогрева материала. Фоновый ток при этом поддерживает нужное состояние дуги между импульсами. По сравнению с постоянной дугой пульсирующая усиливает проникновение, не повышая температуру соединения. Однако, надо заметить, что скорость сварки при этом падает на 20 - 40%

Пульсирующая дуга может быть настроена от 1 до 100 импульсов в секунду, а на некоторых типах оборудования даже до 1000 импульсов [5].

Импульсная подача сварочной проволоки

Генерирование импульсов подачи основывается на 2-х основных способах ее получения: за счет применения специальных электродвигателей в механизме подаче электродной проволоки и при использовании механических модуляторов различных конструкций.

Объяснить увеличение коэффициента наплавки при импульсной подаче электродной проволоки можно следующими причинами:

-управляемым процессом образования капли электродного металла, не позволяющим расходовать лишнюю энергию на ее перегрев;

-отсутствием больших значений токов короткого замыкания, обычно характерных для процесса сварки с короткими замыканиями;

-увеличение тока в импульсе подачи способствует росту коэффициента плавления, при этом фактически импульсный ток не превышает 30-35% времени цикла образования и переноса капли, отсюда и рост коэффициента плавления по сравнению со средним значением тока при постоянной скорости подачи [6].

Исходя из особенностей сварки с импульсной подачей электродной проволоки один цикл каплепереноса протекает в четыре этапа (рисунок 2):

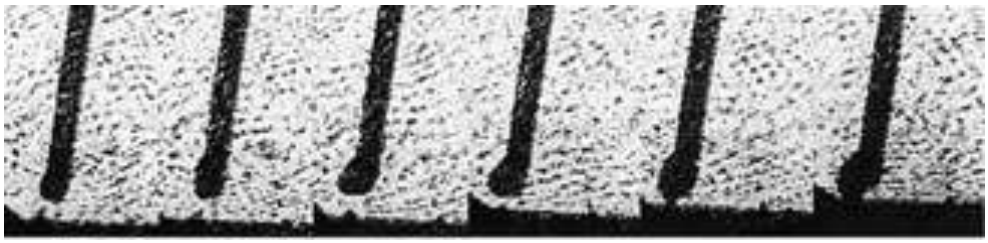


Рис. 2 - Видеокадрыпроцессаобразования капли электродного металла присваркепроволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в CO_2 с импульсной подачей с частотой 30 с–1: а—е — $t_ф$равно 0,001, 0,004,0,008, 0,012, 0,016 и 0,020 с соответственно[8].

-формирование капли за счет плавления электродной проволоки;

-движение электродной проволоки: под действием упругих сил за счет использования механизма импульсной подачи происходит перемещение электродной проволоки с находящейся на ее торце жидкой каплей в направлении металлической ванны;

-торможение капли: происходит торможение подачи сварочной проволоки в результате достижения штоком конца угла опускания. При этом в силу определенной инерционности жидкого металла капля, находящаяся на торце электрода, продолжает движение;

-короткое замыкание: происходит соприкосновение жидкой капли, находящейся на торце электрода и металлической ванны, образования перемычки и переход металла капли в сварочную ванну [7].

В работе [9] была разработана математическая модель для определения параметров импульсной подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке и наплавке.

Авторы в работе [10] рассмотрели возможность применения сварки с импульсной подачей сварочной проволоки при ремонте крупногабаритных деталей. Достигается большая энерговыгода и также упрощается конструкция, в сравнении с полуавтоматами с автоматической подачей самозащитной проволоки больших диаметров.

В процессе сварки тонколистового металла возникает проблема его коробления. Эта проблема актуальна и часто возникает, например, при ремонтной сварке кузовов автомобилей, сварке различных емкостей для пищевой промышленности и др. Исследовали влияние импульсной подачи и ее параметров на возможность снижения коробления тонколистового металла в результате термического воздействия дуги на образцах толщиной 1,0 и 2,0 мм. Следует отметить, что коробление при импульсной подаче заметно ниже, чем при сварке с непрерывной подачей электродной проволоки [11].

Применение новых регулируемых механизмов импульсной подачи электродной проволоки при дуговой механизированной сварке сплавов алюминия позволило существенно улучшить формирование металла шва и его структуру и снизить потери электродного металла. Улучшение электропроводных свойств алюминиевого сварного соединения при

механизированной сварке может быть достигнуто в том числе и при использовании импульсной подачи электродной проволоки с управляемыми параметрами. При этом обеспечивается качественное выполнение сварного соединения, влияющее на электротехнические свойства токоведущих шин [12].

Одним из путей повышения эффективности применения сварки с импульсной подачей сварочной проволоки является использование смеси $Ar+CO_2$. Это позволяет обеспечить лучшее формирование шва и уменьшить разбрызгивание электродного металла, чем при сварке в чистом углекислом газе. Сварка в смеси газов с использованием устройства импульсной подачи сварочной проволоки позволяет существенно снизить потери металла на угар и разбрызгивание [13].

Импульсно-дуговая сварка

В настоящее время появляются новые способы импульсно-дуговой сварки. Это, к примеру, импульсно-дуговая сварка с подогревом электродной проволоки, двухдуговая импульсная сварка, импульсная сварка с увеличенным вылетом электродной проволоки, технологии SpeedPulse, STT, ForceArc, ColdArc.

С целью повышения эффективности сварки плавящимся электродом в среде инертных газов применяют предварительный подогрев сварочной проволоки проходящим током и импульсно-дуговую сварку. Полуавтоматическая импульсно-дуговая сварка титановых сплавов обеспечивает повышение производительности сварочных работ в 2 ... 3 раза при снижении погонной энергии сварки в 2 ... 2,5 раза [14].

Двухдуговая сварка “расщепленным” электродом с общим токоподводом применяется с целью повышения коэффициента наплавки, увеличения скорости сварки. В процессе сварки происходят короткие замыкания между одной из электродных проволок и ванной, а также прекращается горение дуги на второй проволоки.

Импульсные процессы широко применяются и при наплавке. К примеру, для получения более чистого слоя наплавленного металла применяют увеличение вылета электродной проволоки [15]. Также при повышенном вылете электрода становится возможна сварка “в узкую разделку”.

Объединив качество импульсной дуги и скорость струйной дуги, получили технологию SpeedPulse. При этом обеспечиваются уменьшенное тепловложение, улучшенный провар и четкое формирование шва. Отличие от традиционного импульсного процесса заключается в том, что во время пауз между импульсами на долю миллисекунды включается струйный процесс сварки, тем самым перенос электродного металла происходит и между импульсами тоже [16].

Сварочный процесс по технологии SpeedPulse ведется при дистанции порядка 65 - 70 мм, при этом длина дуги составляет всего 3 - 4 мм. При уменьшении дистанции работ процесс переходит в нестабильную фазу с повышенным разбрызгиванием; дугу «затягивает» внутрь металла. Особенностями технологии SpeedPulse являются высокая скорость сварочного процесса (увеличение составляет до 40 - 45%) и резкое снижение удельного тепловложения.

Сварочный процесс STT (сокращение от английского термина SurfaceTensionTransfer – перенос за счет сил поверхностного натяжения) был разработан компанией «LincolnElectric» в результате активных исследований в области управляемого переноса металла при сварке.

Процесс STT – преемник обычного сварочного процесса MIG/MAG с переносом короткими замыканиями. Однако STT принципиально отличается от него возможностью прямого управления условиями переноса в сварочную ванну наплавляемого металла [17].

Механизированная сварка короткой дугой с короткими замыканиями

Современные сварные конструкции требуют высоких показателей качества. И импульсные процессы – один из методов, помогающих добиться высокого качества. Они позволяют снизить разбрызгивание, что сказывается на внешнем виде сварных соединений и

снижает затраты на последующую механическую обработку. Сниженноетепловложение позволяет вести сварку без прожогов, а также в положениях, отличных от нижнего.

Сейчас многие производители сварочного оборудования предлагают процесс сжатой, короткой дуги.

Форсированная дуга имеет ряд преимуществ перед дугой со струйным переносом:

- Глубокое проплавление благодаря увеличенному давлению дуги на ванну жидкого металла;
- Отсутствие подрезов благодаря короткой дуге;
- Высокая производительность, обусловленная более высокой скорости сварочного процесса и увеличению коэффициенту наплавки (уменьшение числа проходов);
- Уменьшение необходимой ширины разделки.

Процесс SpeedArc нацелен на повышение качества сварных соединений из толстолистового металла, связанного с обеспечением гарантированного проплавления в корне шва, а также MIG/MAG сварки в узкую разделку. Функция SpeedArc в отличие от стандартной струйной дуги поддерживает уверенный струйный процесс переноса металла более короткой дугой. Дуга становится более сфокусированной, очень устойчивой. Благодаря высокому плазменному давлению в дуге обеспечивается более глубокое проплавление. При этом снижается тепловложение в основной металл и снижается вероятность возникновения таких дефектов, как подрезы [18].

Осциллограммы процесса SpeedArc компании Lorch были проанализированы в сравнении с осциллограммами процесса RapidArc от компании LincolnElectric [19] (рисунок 3).

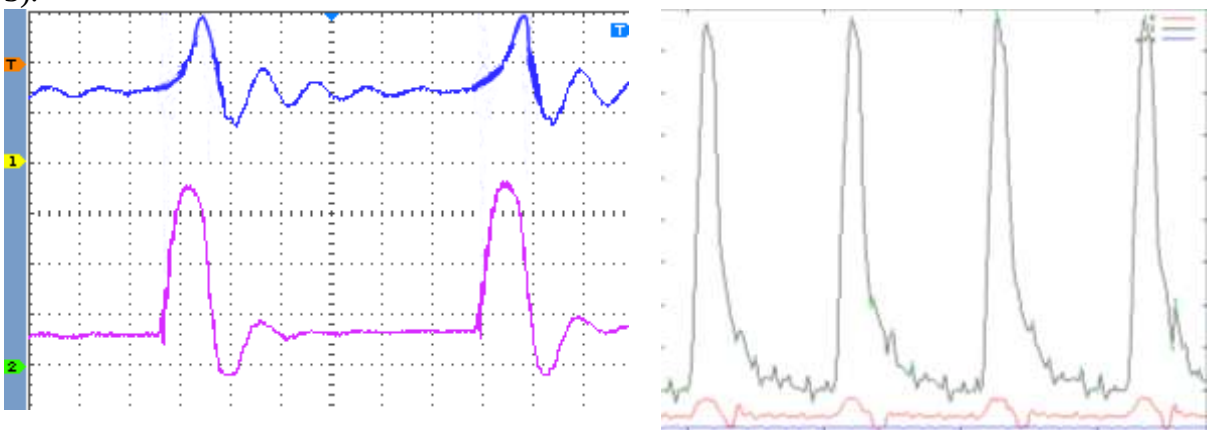


Рис. 3 - Осциллограммы по току и напряжению процессов SpeedArc (слева) и RapidArc (справа)

Как видно из осциллограммы по напряжению, сварка в обоих случаях ведется с коротким замыканием. В момент короткого замыкания идет снижение тока до базового значения, или даже ниже его. Это обеспечивает перенос металла без разбрызгиваний, которые происходят из-за “взрыва” перемычки в связи с увеличением силы тока.

Сравним теперь макрошлифы соединений (рисунок 4). Как мы видим, в обоих случаях наблюдается глубокое проплавление, достаточно узкое. Отсутствуют подрезы.

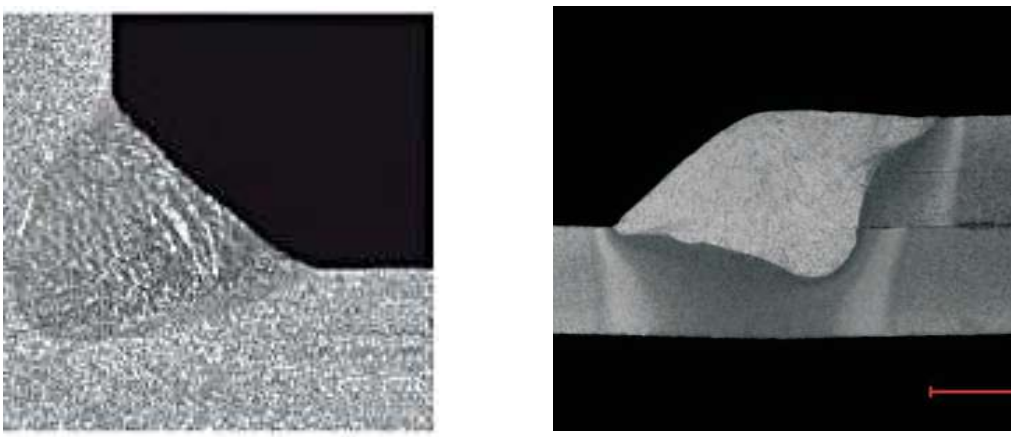


Рис. 4 - Макрошлифы процесса SpeedArc (справа) и RapidArc (слева)

Процесс короткой сфокусированной дугой с короткими замыканиями позволяют добиться сниженного разбрызгивания, глубокого проплавления и увеличения скорости сварки без потери качества сварных соединений.

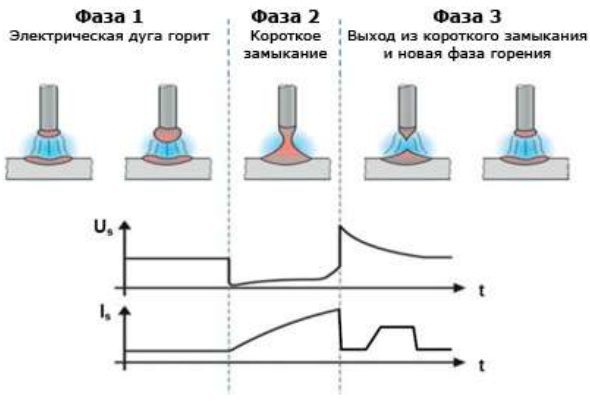
Область применения процесса сварки короткой дугой с короткими замыканиями:

- Сварка толстолистового металла;
- Сварка корневых швов;
- Сварка в узкую разделку;
- Сварка легированных сталей и сплавов.

Сварка “холодной” дугой

Разработки с целью создания процесса малой мощности без механического вмешательства в подачу проволоки привели к созданию варианта процесса, при котором все необходимые воздействия производятся исключительно в источнике тока. Этот вариант MIG/MAG процесса, называемый ColdArc, предлагаемый компанией EWM, относится к сварке короткой дугой и поэтому характеризуется циклической сменой дуг и фаз короткого замыкания. Поскольку электрическое напряжение при зажигании является решающим критерием эффективности сварки тонких листов, то оно оказывает большое влияние на динамику подвода энергии всего процесса, то есть на фазу дуги, фазу короткого замыкания и, в первую очередь, на зажигание дуги, рисунок 6. Характер изменения напряжения идентичен изменению при обычной сварке короткой дугой. Напряжение является задающим параметром при регулировке силы тока.

Для этого необходимо непрерывно измерять напряжение и соответствующим образом реагировать на каждое его изменение (высокодинамичная регулировка мгновенных значений). Благодаря цифровому процессу обработки сигналов (DSP) можно отнять энергию от дуги менее чем за 1 микросекунду до зажигания(рисунок 5), в результате чего зажигание пройдет очень мягко.



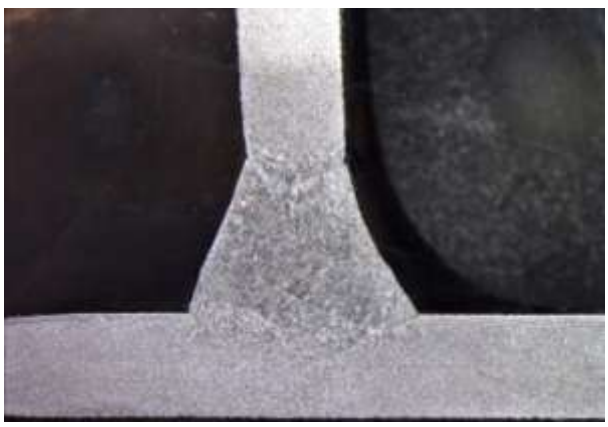


Рис. 5 - Осциллограммы и макрошлифы при сварочном процессе coldArc.

При этом на конце электрода может сразу же образоваться достаточное количество расплавленного материала, и это повысит потребность в энергии. Поэтому непосредственно после зажигания дуги сила тока за короткое время поднимается до так называемого импульса расплавления. Только после этого, чтобы минимизировать плавление, происходит переход на низкий ток и начинается следующая фаза. Из-за импульса расплавления после каждого короткого замыкания на электроде образуется большой расплавленный купол, что ведет к очень равномерному протеканию процесса. Только благодаря этому стало возможным работать в фазах между короткими замыканиями с очень низкой силой тока, не прибегая к последующему плавлению проволоки или гашению дуги. Это все гасит процесс сварки малой мощности ColdArc [20].

Программа KemppiWiseThinдля сварки тонколистовых конструкций отличается уменьшенной амплитудой импульса в момент разрыва жидкой перемычки металла между электродом и каплей. Это обеспечивает более мягкий поджиг дуги после короткого замыкания и минимизирует тепловое и силовое воздействие дуги на сварочную ванну, ограничивается ток на этапе формирования новой капли [21].

Фирма Merkle предлагает свой процесс, под названием ColdMIG (рисунок 6), теплоотдача в котором на 20-30% меньше, чем в режиме стандартной короткой дуги [22].

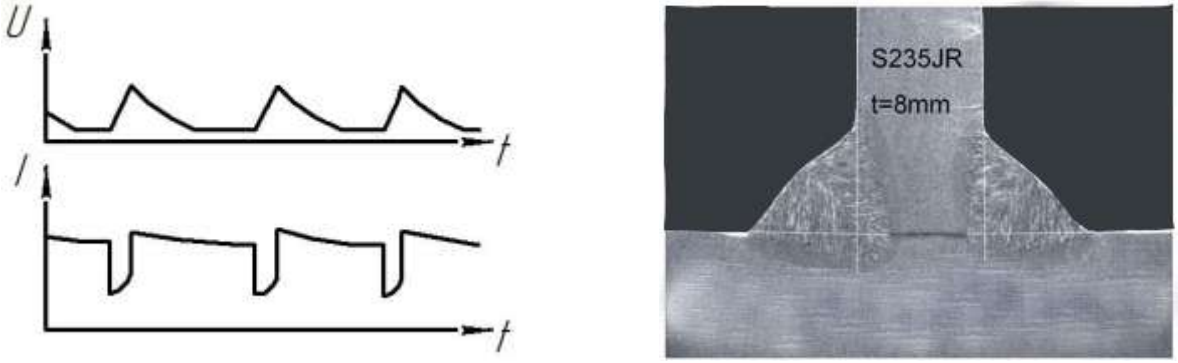


Рис. 6 - Осциллограммы и макрошлифы процесса ColdMig.

Аналогом данных процессов является процесс PrecisionPulse от компании LincolnElectric [23].

Область применения процесса сварки “холодной дугой”:

- Сварка тонких листовых металлов 0.6 – 3.0 мм
- Возможность сварки с большими зазорами
- MIG-пайка с низкой теплоотдачей
- Сварка смешанных металлов
- Сварка металлов с покрытием.

Сварка вертикальных швов

Импульсные процессы помогают в формировании шва при сварке вертикальных швов снизу-вверх. Возможность MIG/MAG сварки без сложных движений горелкой (техникой сварки «елочка» или поперечными колебаниями) достигается комбинированием двух технологий или, точнее, двух фаз сварочной дуги. Первая фаза – «горячая» фаза тока большой силы с высокой подачей энергии – для оптимального расплавления материала. Затем без переходов и, таким образом, практически без брызг наступает вторая, «холодная» фаза благодаря идеальному автоматическому регулированию.

Обычно сварка вертикальных швов требует от сварщика максимального умения и квалификации. Компания Шторм-Lorch для этой цели предлагает процесс SpeedUp. С функцией SpeedUp сварщику не нужно выполнять сложные движения горелкой (техникой сварки «елочка» или поперечными колебаниями), ему необходимо лишь перемещать горелку вдоль стыка с постоянной скоростью. Сварочный аппарат выстроит алгоритм импульсов так, чтобы обеспечить уверенный провар корня и получить качественное формирование шва с плавным переходом на основной металл (рисунок 7) [24].

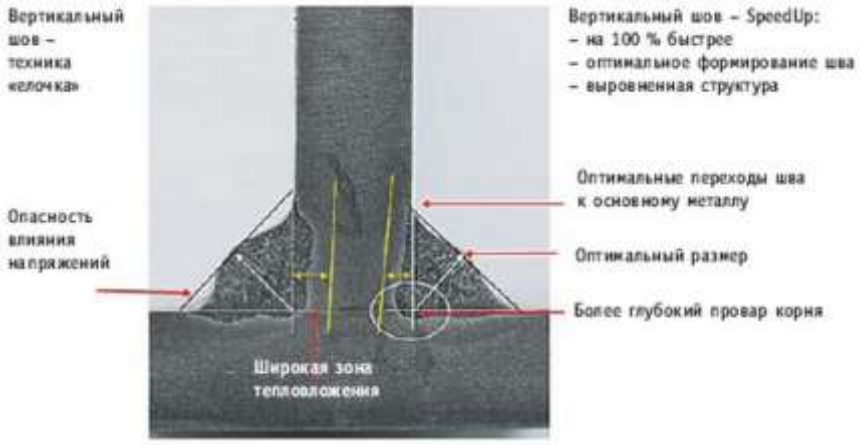


Рис. 7 - Макрошлифы вертикального шва техникой “елочка” (слева) и техникой SpeedUp (справа).

Фирма Merkle предлагает процесс HighUP, реализованный сочетанием импульсов DeepARC и PULSE [25].

Область применения процессов для сварки вертикальных швов:

- Сварка вертикальных швов на подъем;
- Сварка тонколистовых изделий;
- Сварка высоко текучих металлов и сплавов.

Заключение

Все рассмотренные способы имеют достаточно узкую область применения. Существенным недостатком является, в первую очередь, высокая стоимость источников питания.

В настоящее время в ЮТИ ТПУ проводятся работы по разработке систем питания на основе модулятора, работающего по принципу импульсно-регулируемого сопротивления, которые позволяют получать импульсы сварочного тока и напряжения неограниченные по длительности (времени протекания). Разработано и запатентовано устройство, позволяющее снизить общие потери энергии [26-27].

Целью дальнейших исследований является повышение производительности импульсно-дуговой сварки.

Для достижения цели необходимо:

- выявить недостатки существующих методов и устройств для ИДС и определить пути снижения затрат и повышения КПД устройств для ИДС;

- создать устройства для ИДС на базе отечественных источников питания;

- определить область применения данного устройства;

- провести и технико-экономическое сравнение разработанного оборудования с уже имеющимися на рынке;

- исследовать влияние предложенного способа на технологические показатели и механические свойства сварного соединения.

Список используемых источников

1. Крампит Н.Ю., Крампит А.Г. Управление процессом плавления и переноса при сварке в углекислом газе длинной дугой // Монография - 2009 г.

2. Князьков В.Л. Повышение эффективности ручной дуговой сварки модулированным током электродами с покрытием за счет автоматической адаптации параметров режима к технологическому процессу // Диссертация, 2006 г.

3. Шигаев Т.Г. Сварка модулированным током // Итоги науки и техники. Сварка. Том 17 – 1985 г.

4. Князьков А.Ф., Князьков В.Л. Исследование сварочно-технологических свойств покрытых электродов при сварке модулированным током // Сварочное производство – 2011 - №10 - С. 15-18
5. Сварка пульсирующей(импульсной) дугой. URL: http://www.se123.ru/tehnologiya/svarka-pulsiruyuschei-dugoi (дата обращения 15.01.2015)
6. Мозок В.М. Дополнительные особенности технологии дуговой механизированной и автоматической сварки с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство – 2010 - №2 - С. 34-38
7. Павлов Н. В., Крюков А. В., Зернин Е.А. Распределение температурных полей при сварке в смеси газов с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство – 2011 - №1 - С.35-36
8. Лебедев В.А. Математическая модель формирования капель электродного металла при механизированной дуговой сварке с импульсной подачей сварочной проволоки // Сварочное производство – 2008 - №7 - С.10-14
9. Лебедев В.А. Определение параметров импульсной подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке и наплавке // Сварочное производство – 2008 - №8 - С.11-15
10. Мозок В.М., Лебедев В.А. Ремонт крупногабаритных деталей с использованием управляемой импульсной подачи электродной проволоки // Сварочное производство – 2007 - №6 - С. 31-34
11. Лебедев В.А. Особенности сварки сталей с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство – 2007 - №8 - С. 30-35
12. Лебедев В.А. Некоторые особенности дуговой механизированной сварки алюминия с управляемой импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство – 2007 - №11 - С. 26-30
13. Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А. Сварка с импульсной подачей проволоки в смеси газов // Сварочное производство – 2010 - №4 - С.27-28
14. Жерносеков А.М., Андреев В.В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (обзор) // Автоматическая сварка – 2007 - №10
15. Жерносеков А.М. Влияние вылета электрода на параметры шва при импульсно-дуговой сварке сталей // Автоматическая сварка – 2004 - №8
16. Сварочно-технологический центр «ШТОРМ-ЛОРХ». URL: http://shtorm-lorch.ru(дата обращения 15.01.2015)
17. Райский В.Г. Технология импульсного сварочного процесса: TwinPulse, SpedPulse, STT, HighSpeed. URL: http://www.intertehno.ru/articles/c4/35/(дата обращения 15.01.2015)
18. Процесс SpeedArc. URL: http://www.shtorm-lorch.ru/rus/info/tech/speedarc.php(дата обращения 15.01.2015)
19. Waveform analysis for MIG / GMAW "Lincoln RapidArc" on steel. URL: http://www.weldsmith.co.uk/dropbox/cranu/110523_waveforms_GMAW_steel/waveforms_GMAW-P_RapidArc.html(дата обращения 15.01.2015)
20. С.-Ф. Гёке. Процесс дуговой сварки с уменьшенной отдачей энергии для чувствительных к теплу материалов. URL: http://www.ewm-russia.ru/articles/coldarc.php(дата обращения 15.01.2015)
21. Алёшин Н.П., Гладков Э.А., Бродягин В.Н., Кузнецов П.С., Копотева Е.Н., Шолохов М.А. Импульсные технологии управления каплепереносом при MIG/MAGсварке // Сварка и диагностика – 2014 - №3
22. ПроцессMerkleColdMIG. URL: http://merkle-russia.ru/files/merkle3.pdf (дата обращения 15.01.2015)
23. Precision Pulse Weld Process Overview. URL: http://www.lincolnelectric.com/assets/us/en/literature/te12007.pdf(дата обращения 15.01.2015)

24. Процесс SpeedUp. URL: http://www.shtorm-lorch.ru/rus/info/tech/speedup.php (дата обращения 15.01.2015)
25. ПроцессMerkleHighUP. URL: http://merkle-russia.ru/files/HighUP_RU_A4_screen.pdf (дата обращения 15.01.2015)
26. Крампит А.Г., Крампит Н.Ю., Крампит М.А. Устройство, использующее подогрев электродной проволоки // Ремонт, восстановление и модернизация – 2011 - №7
27. N.Yu. Krampit, M.A. Krampit. Pulsed-arc welding with preheating of electrode extension in the break period // Welding International – 2014 - DOI: 10.1080/09507116.2014.911408