

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 62-503.55

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-9-20

Борис Патон, Владимир Лебедев, Геннадий Жук, Владимир Пичак

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ – НАПЛАВКИ

Актуальность темы исследования. Процессы электродуговой сварки и наплавки автоматическим или механизированным оборудованием одни из наиболее востребованных технологий постоянно совершенствуются, в том числе и за одним из основных направлений – применение импульсных воздействий. Перспективным является применение импульсной подачи электродной проволоки, а в последнее время подачи с управляемыми характеристиками и дозированной подачи. Широкое применение оборудования с импульсными алгоритмами движения электродной проволоки несколько сдерживается, в том числе из-за недостатка исследований по технико-технологическим возможностям сварки–наплавки с импульсной подачей электродной проволоки.

Постановка проблемы. С целью обоснованного выбора способа импульсной подачи электродной проволоки и эффективного его применения при сварке и наплавке, в том числе сложных для дугового процесса duplexных сталей, необходима комплексная оценка влияния импульсов движения проволоки с различными параметрами на формирование металла шва, наплавленного слоя, а также их структуру и другие характеристики сварочного процесса.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследования, касающиеся влияния импульсной подачи электродной проволоки на технико-технологические результаты электродуговой сварки и наплавки механизированным оборудованием, проводятся постоянно, что частично отражено в отечественной и зарубежной технической литературе, однако, как правило, они не носят комплексного характера и зачастую не подтверждены доказательными экспериментальными исследованиями с использованием современной техники эксперимента. Всё это не позволяет оценить в полной мере возможности импульсной подачи электродной проволоки и расширить применение соответствующего оборудования.

Выделение неисследованных частей общей проблемы. До настоящего времени остаются не до конца исследованными вопросы, связанные со структурой металла шва или наплавленного слоя, выполненных с импульсной подачей электродной проволоки в управляемом режиме. При этом следует детально изучить колебания сварочной ванны, распределение температур в ванне и околосшовной зоне и др. Особое внимание следует уделить новому способу сварки–наплавки с дозированной подачей.

Постановка задачи. На основе комплексных экспериментальных исследований необходимо рассмотреть и проанализировать ряд основных возможностей применения механизмов управляемой импульсной подачи электродной проволоки, дозированной подачи с определением их влияния на свойства металла шва и наплавленного валика. Экспериментальные исследования провести с выявлением колебаний ванны, распределений тепла, сравнительным анализом микроструктур, замеров кристаллитов и др.

Изложение основного материала. Представлены и проанализированы результаты экспериментальных исследований, касающиеся результатов, получаемых при сварке–наплавке с управляемой и дозированной подачей электродной проволоки. Эти результаты относятся к формированию сварного шва, его структуре, выявлению её особенностей. При этом изучены явления колебаний ванны, формирование теплового поля, микроструктуры сечений наплавленных валиков, определены размеры кристаллитов. Полученные данные свидетельствуют о факте значительного положительного влияния на формирование сварного шва и наплавленного слоя, их структуру и возможности управления ими за счёт изменения параметров импульсов подачи электродной проволоки, что делает возможным расширение применения рассмотренных способов сварки и наплавки.

Выводы в соответствии со статьёй. Ряд исследований, которые направлены на выявление эффективности процессов сварки и наплавки при применении управляемой импульсной подачи электродной проволоки относятся к физико-механическим и другим свойствам сварных соединений и наплавленных слоёв и показывают существенные преимущества в сравнении с конвенциональной подачей, обеспечивая повышение качества металла, в том числе и за счёт дробления кристаллитов и снижения тепловложений. Среди ряда способов обеспечения импульсной подачи дозированной подачи, с обратными связями по параметрам дугового процесса, наиболее эффективна. Эффективность применения процессов сварки и наплавки может быть использована при сварке плохо свариваемых сталей и сплавов алюминия. Это, в частности, касается сварки duplexных сталей, некоторых сплавов алюминия, тонколистовых конструкций. Следует рекомендовать всё более широко применять механизированное и автоматическое оборудование в технологической практике при создании и ремонте самых разнообразных конструкций.

Ключевые слова: электродуговая сварка; плавящийся электрод; перенос электродного металла; сварочная ванна; качество шва; наплавленный слой, изучение.

Рис.: 4. Табл.: 5. Библ.: 15.

Актуальность темы исследования. Процессы автоматической и механизированной электродуговой сварки и наплавки с применением различных видов электродных проволок имеют очень широкое распространение практически во всех отраслях промышленности, строительства и др., включая специальные задачи. Сферы использования сварочных и наплавочных автоматов и полуавтоматов включают в себя как цеховые условия, так и открытые площадки. Распространение получает оборудование для сварки под водой мокрым способом с получением достаточно качественных результатов [1].

Разработано большое число различных конструкций сварочного оборудования, в том числе на основе цифровых технологий, в которых используются новые технико-технологические решения, позволяющие в той или иной мере осуществить управление различными элементами дугового процесса. Это, в частности, относится к использованию в сварочном оборудовании инверторных источников тока, на основе которых реализуются различные импульсные алгоритмы управления переносом электродного металла – наиболее эффективного способа организации сварочного процесса с уменьшением разбрызгивания, повышением качества сварного соединения и др.

В настоящее время появилась альтернатива инверторным источникам сварочного тока – механизмы подачи с импульсными формами перемещения электродной проволоки, в том числе с управляемыми характеристиками. Такое оборудование может решать практически все проблемы сварки, в частности при сварке – наплавке в защитных газах, включая значительное повышение эксплуатационных свойств сварного соединения и наплавленного слоя при снижении материальных и энергетических ресурсов [2; 3]. Применение в сварочном оборудовании механизмов с импульсной подачей электродной проволоки не исключает включение в его состав инверторных источников. Такой тандем позволяет ещё более эффективно применять и автоматы, и полуавтоматы для сварки и наплавки, как это отчасти показано в работе [4].

Постановка проблемы. Процессы сварки и наплавки с применением инверторных источников сварочного тока и их возможности достаточно хорошо изучены. Технологические возможности применения механизмов импульсной подачи современных конструкций с применением малоинерционных электродвигателей (вентильных, шаговых) с компьютеризованными системами управления и регулирования, например, такими, которые описаны в работе [5] и которые использовались в настоящей работе, изучены недостаточно. Следовательно, не до конца определены сферы применения механизированного оборудования с такими системами.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящей работе не рассматриваются вопросы, связанные со снижением разбрызгивания электродного металла. Управление геометрическими характеристиками сварного шва и наплавленных валиков, так как они достаточно подробно отображены в целом ряде работ, например [6].

Известно [7], что вибрационные воздействия на жидкий металл, которым является сварочная ванна, оказывают существенное влияние на кристаллизацию этого металла. Вибрация жидкого металла позволяет существенно уменьшить рост зерна кристаллитов, способствовать его дезориентации, повысить вероятность дегазации ванны и способствовать выходу неметаллических соединений и повышению прочности сварного шва и наплавленного валика. Этим и рядом других явлений объясняется необходимость изучения сварочной ванны при использовании импульсной подачи электродной проволоки.

Выделение неисследованных частей общей проблемы. Следует указать, что параметры импульсной подачи для предварительного анализа и формулирования данных для последующего комплекса исследований выбирались из ранее наработанного банка данных, частично изложенных в работах [8; 9], и позволяющих получить близкие к оптимальным по большинству характеристик результаты.

Получение реального математического описания явлений в сварочной ванне представляет очень сложную задачу, хотя имеются работы в этом направлении с моделированием движения для ряда конкретных случаев [10]. Можно считать, что основным направлением комплекса исследований должны быть экспериментальные исследования с применением современного оборудования.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является рассмотрение некоторых возможностей применения механизмов управляемой импульсной подачи электродной проволоки с определением её влияния на свойства металла шва и наплавленного валика с применением экспериментальных исследований и их анализом при ведении дугового процесса в среде защитных газов, а также определение направлений рационального применения современных разработок механизмов импульсной подачи, включая дозированную подачу.

Изложение основного материала. Движение ванны расплавленного металла изучали по результатам скоростной видеосъемки во время переноса электродного металла. Использовалась камера скоростной видеосъемки *Mikrotron MC – 1310* с частотой съемки кадров до 1 кГц, лампа подсветки столба дуги *LSB 640 Hg*.

На фотографии рис. 1 представлены кадры сравнительного переноса электродного металла при наплавке обычным процессом и процессом с импульсной подачей электродной проволоки Св08Г2 с диаметром 1, 2 мм при сварке в защитных газах. На фотографиях можно видеть, что колебания жидкого металла при импульсе подачи более значимы, чем при обычной подаче. Это особенно заметно в момент короткого замыкания (кадры 2, 3). Здесь важно заметить, что при импульсной подаче переносимая капля электродного металла не деформируется и стабильна в осевом направлении в отличие от капли в обычном процессе. Это свидетельствует о том, что сила, действующая на каплю при ускорении в импульсе превышает противодействующие силы в виде реактивного движения газов и частично сил поверхностного натяжения, что характерно для обычной подачи электродной проволоки.

По характерным результатам видеосъемки всего участка ванны определялась зависимость

$$h = f(l), \quad (1)$$

где h – высота ванны; l – расстояние по длине ванны.

Точки измерения h , l отсчитывались от оси подачи электродной проволоки на уровне наплавленного металла.

Зависимость (1) для ряда временных промежутков от 0 до 3 мс представлена на графиках рис. 2.

Можно заметить, что движение поверхности сварочной ванны при импульсной подаче носят колебательный характер с частотой идентичной частоте подачи.

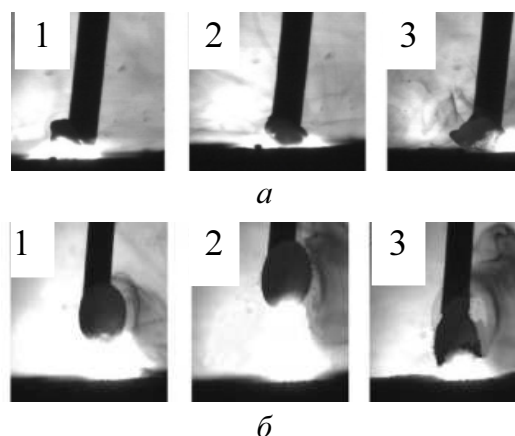


Рис. 1. Перенос электродного металла:
а – обычная подача; б – импульсная подача

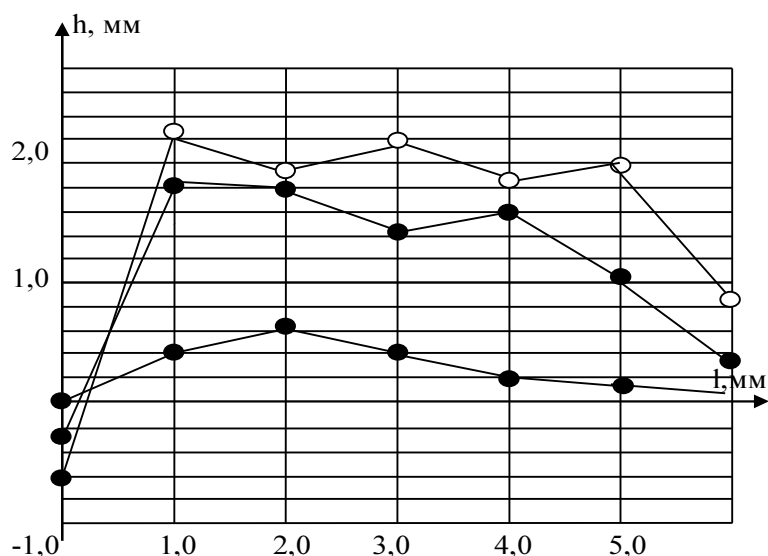


Рис. 2. Перемещение поверхности сварочной ванны относительно начала измерений

Если выполнить комплекс измерений колебаний сварочной ванны для массива импульсов подачи электродной проволоки с анализом полученных микрошлифов, то можно найти зависимости влияния параметров импульсной подачи на структуру металла шва, в частности на измеряемую характеристику – величину кристаллитов.

На фотографии рис. 3 для качественной оценки представлены микроструктуры наплавленного металла в поперечном сечении в сравнении с основным металлом, наплавленным металлом при сварке с обычной подачей и импульсной подачей электродной проволоки с дозированным регулированием за счёт введения регулируемой обратной связи по току дугового процесса. Анализ массива микрошлифов, полученных в результате наплавки, в том числе с импульсными алгоритмами воздействия электродной проволоки на ванну расплавленного металла показывает, что в случае действия импульса движения происходит дробление кристаллитов и их дезориентация, что способствует повышению механических свойств сварного шва или наплавленного слоя.

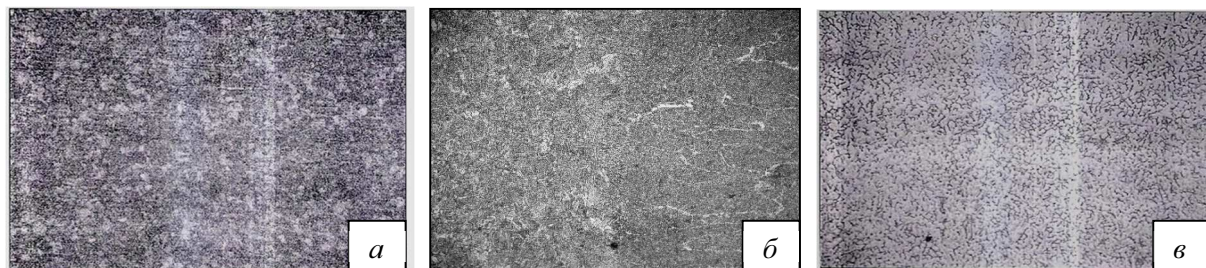


Рис. 3. Микрошлифы поперечных сечений металла наплавленного в среде CO_2 электродной проволокой диаметром 1,2 мм с 200 кратным увеличением при сварке: а – с плавной подачей проволоки; б – с импульсной подачей; в – с дозированной подачей

Изучение этого эффекта проводилось на образцах путём измерения твёрдости наплавленных слоев и опосредованного определения размеров кристаллитов при различных способах подачи для сравнительного анализа при применении электродных проволок одного и того же состава.

Размер кристаллитов в структуре наплавленного металла определялся на оптическом микроскопе НЕОРНОТ 32 с использованием методик, регламентированных ГОСТ 5639 – 82. Следует отметить, что кристаллитом считается отдельный кристалл поликристаллического конгломерата, который ограничен смежными поверхностями - границами зерна.

Сравнительный анализ микроструктуры формы и размеров кристаллитов в центральной части наплавленного металла показал, что при импульсной подаче они имеют существенно меньшую ширину и коэффициент формы. В табл. 1 представлено сравнение показателей формы кристаллитов в наплавленном металле при наплавке легированных сталей в средней части наплавленного валика. При сварке в значительной мере снижается также длина кристаллитов, значительная часть из которых не превышает 210 мкм по сравнению с 640...700 мкм при постоянной подаче электродной проволоки. При сварке – наплавке с дозированной подачей электродной проволоки, используя специальные целенаправленные настройки системы управления, можно ещё более снизить геометрические размеры кристаллитов.

Таблица 1

Количественные показатели формы кристаллитов в наплавленном металле

Подача электродной проволоки	Ширина кристаллитов, мкм	Коэффициент формы кристаллитов
Плавная	97,5	6,8
Импульсная	70,0	4,56
Дозированная с целенаправленной настройкой	52	3,12

Показано, что используя импульсную подачу электродной проволоки можно более, чем двукратно уменьшить размеры кристаллитов в структуре наплавленного слоя, а, следовательно, обеспечить улучшенные эксплуатационные свойства изделия.

Для наплавленного слоя, выполненного с целью придания изделию определённых свойств, связанных с прочностью и износостойкостью был выполнен цикл работ по определению твердости и сопротивления трению (трибологические испытания). Испытания проводились в сравнении результатов для сварки-наплавки с обычной и импульсной подачей электродной проволоки одного и того же типа.

Показатели твёрдости были получены с помощью твёрдомера LECO M – 400 по методикам ДСТУ ISO 6507-1:2007 при нагрузке индентора на образец 1 кГ. Некоторые усреднённые результаты измерений наплавленного слоя в его центре и в зоне термического влияния даны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследований твёрдости

Способ подачи проволоки	Твердость наплавленного металла $B \times 10^7$ Па	Твердость металла зоны термического влияния ЗТВ $B_{зтв} \times 10^7$ Па
Плавный	165	161
Импульсный	198	212
Дозированный	202	218...225

Можно отметить, что используя импульсную подачу электродной проволоки, твердость наплавленных валиков существенно возрастает, повышая эксплуатационные возможности наплавленного изделия. Этот эффект можно объяснить, в основном реструктуризацией наплавленного слоя, а также частично уровнем перехода легирующих элементов, определяющих физические свойства наплавленного слоя.

Сравнительная оценка трибологических свойств наплавленного слоя производилась при трении металла по металлу на специализированной установке для комплексной оценки свойств наплавленного металла (разработка ИЭС им. Е. О. Патона), при следующих условиях: удельное давление в месте контакта 100 МПа; скорость трения 11...12 м/мин. При этом виде исследования использовались образцы, наплавленные электродной проволокой Нп-30ХГСА при двух способах её подачи с режимами, обеспечивающими одинаковые количества поданной проволоки или одинаковые параметры наплавленного валика.

Некоторые результаты трибологических сравнительных исследований с усреднением результатов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследований темпа износа

Способ подачи	Частота подачи f , Гц	Сквасность S	К-во наплавленных слоёв n	Средний темп износа, мм ³ /км
Плавная	0	0	1	7,3
Импульсная	15	3	1	3,8
Импульсная	60	3	1	6,6
Импульсная	20	5	1	4,2
Импульсная	60	5	1	5,8
Плавная	0	0	5	3,9
Импульсная	15	3	5	3,2
Импульсная	20	5	5	2,7

Необходимо отметить факт изменения уровня перехода легирующих элементов при использовании процессов сварки – наплавки с импульсной подачей электродной проволоки, который в существенной степени влияет на качество металла шва или наплавленного слоя с получением определённых эксплуатационных свойств.

Химический состав наплавленного слоя определялся с использованием атомно-эмиссионного метода спектроскопии. Выборочное определение состава наплавленного слоя, полученное для сравнения при плавной и импульсной подаче электродной проволоки Нп-30ХГСА с разными параметрами представлены в табл. 4.

Таблица 4

Массовая доля легирующих элементов в наплавленном слое


(f/S)	C, %	Cr, %	Mn, %	Si, %	
(20/5)	0,17	0,55	1,06	0,80	1 слой
постоянная подача	0,17	0,63	1,10	0,87	
(20/5)	0,21	0,98	0,84	0,78	5 слоёв
постоянная подача	0,20	0,90	0,81	0,70	

Очевидно, что массовая доля легирующих элементов, в частности для 5-слойной наплавки, заметно выше для способа сварки с импульсной подачей электродной проволоки.

Большое число источников, например [11], показывают, что при прочих равных условиях и полученных результатах тепловложения от дугового процесса с применением импульсных алгоритмов подачи электродной проволоки в сравнении с плавной подачей снижаются. В работе даются некоторые результаты измерения температуры в границах 400-700° С в области, сопрягающейся со сварочной ванной.

При дистанционном измерении температуры весьма желательно иметь возможности фиксации прибора на участке, близком к точечному.

Измерения проводились с использованием современной инфракрасной камеры OPTRIS Xi 80 с верхним диапазоном измеряемых температур 150...900° С. Поле измерения камеры в диапазоне 12° ($f = 12,7$ мм)...80° ($f = 2,3$ мм).

Замеры производились (по возможности) в одних и тех же маркированных точках на ряде наплаваемых образцов, а результаты замеров представлены на рис. 4, где значком  обозначены зоны измерений в диапазоне температур 400–650°С.

Рассмотрение результатов измерений температуры зоны выполняемой наплавки валика показанных на рис. 4 позволяет доказательно утверждать, что при одинаковой геометрии валика или одинаковом расходе электродной проволоки (использован специальный датчик движения на основе энкодеров) тепловложения при сварке с постоянной подачей электродной проволоки больше.

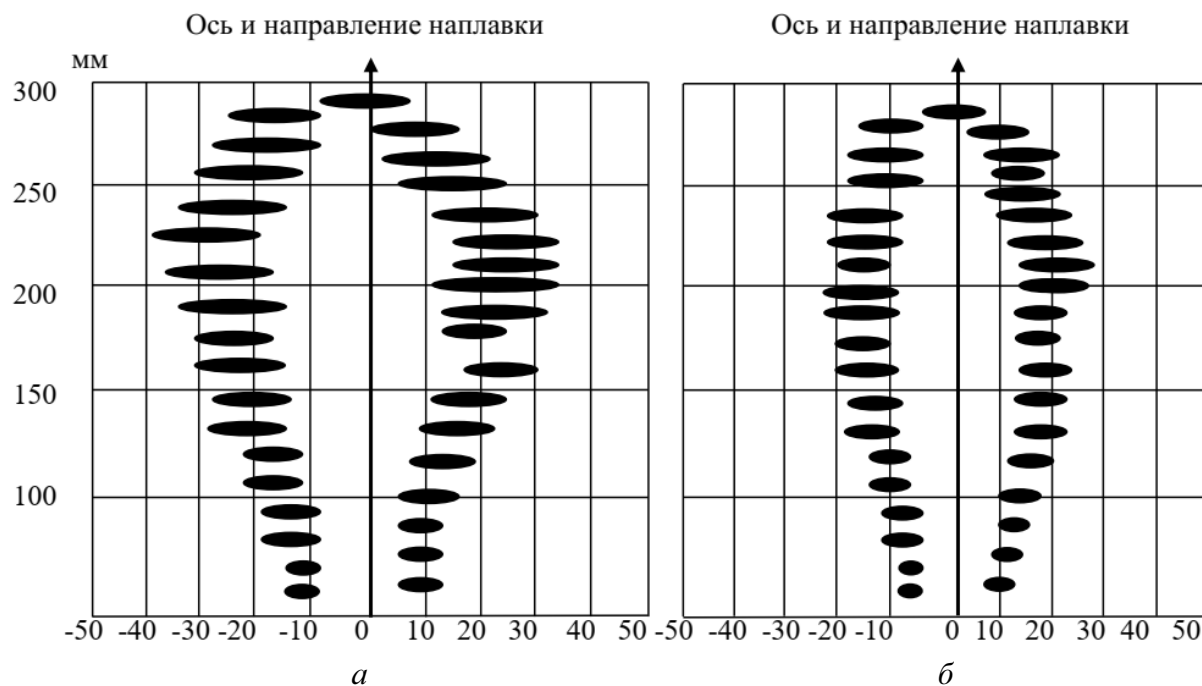


Рис. 4. Распределение температур при сварке: а) с импульсной подачей электродной проволоки, б) с постоянной подачей электродной проволоки (показан температурный интервал 600...400°C)

Как видно из графиков распределение температур при сварке с постоянной подачей электродной проволоки имеют более развитую форму, что объясняется большим тепловложением.

Следует отметить, что снижение тепловложений при сварке-наплавке с импульсной подачей электродной проволоки хорошо коррелируется с результатами параллельных замеров расхода электроэнергии, производимых с применением специально разработанного прибора ИЭ-1 -200, работа которого описана в работе [12], и который используется нами, в основном, при сравнительных исследованиях.

Серьёзная проблема при сварке и наплавке это деформация изделия, возникающая как действие последующих остаточных напряжений. Остаточные напряжения и деформации в сварных изделиях необходимо уменьшать и целесообразнее всего это нужно делать ещё в процессе сварки и наплавки.

Существует большое число способов уменьшения деформаций, как следствия остаточных напряжений. Одно и того, на что можно влиять, используя результаты настоящей работы – снижение тепловложения в металл. Таким образом уменьшаются эпюры остаточных продольных пластических деформаций укорочения, являющиеся, в основном, ответственными за остаточные напряжения и деформации.

Качественную оценку действия тепловложений проводили в сравнительных измерениях для обычного процесса и процесса с импульсной подачей электродной проволоки. Для определения напряжений были использованы два вида датчиков: магнестрикционный и тензорезисторный датчики с многоканальными системами измерений и регистрации. Измерялись напряжения до и после сварки для каждого из способов подачи.

Как и в случае определения температуры, режимы дугового процесса были выбраны таковыми, чтобы для обычной и импульсной подачи соблюдались условия равенства геометрии наплавленного валика и количества проволоки, затраченной на получение указанной геометрии.

Используя результаты проведенных исследований по замеру деформаций можно заключить, что при механизированной дуговой сварке в защитных газах с использованием импульсной подачи электродной проволоки в зависимости от параметров импульсов и установленных режимов за счёт снижения тепловложений можно снизить показатели остаточных деформаций изделия в 1,5...2,0 раза. Этот эффект с большими возможностями может быть использован, в частности, при сварке длинномерных конструкций, которые, например, часто применяются в конструкциях судов.

Представляет интерес возможность эффективного использования импульсных алгоритмов управления подачей электродной проволоки при сварке дуплексных (аустенитно-ферритная структура) сталей [13; 14]. В последнее время такие стали находят всё более широкое применения благодаря их свойствам. Вследствие своей двухфазной структуры, все современные типы дуплексных сталей имеют высокую стойкость к трещинообразованию при коррозии. Дуплексные нержавеющие стали имеют низкое содержание углерода и это делает их устойчивыми к межкристаллитной коррозии. Эти и другие свойства, например, прочностные характеристики дуплексных сталей требуют особого подхода к их сварке. Это касается сохранения у этих сталей мелкозернистой структуры и необходимости сохранения в зоне сварки фазового состава аустенита и феррита близкого к составу свариваемого металла. Кроме этого существуют рекомендации касающиеся ограничения тепловложений в сварочную ванну, при этом тепловложения Q где U , отнесённые к скорости выполнения сварного шва v должны составлять:

$$Q = k \frac{UI}{v} \leq 2,5 \text{ кДж/мм}, \quad (2)$$

где U , I – напряжение и ток сварочного процесса; k – коэффициент, учитывающий отличия величин от системы СИ.

Коэффициент k , с ограничениями по тепловложениям $Q \leq 2,5 \text{ кДж/мм}$, отмеченным в рекомендательной литературе по сварке дуплексных сталей, имеет размерность $k = 0,06$.

С учётом указанного выражение (2) примет вид:

$$Q = \frac{0,06 UI}{v} \leq 2,5 \text{ кДж/мм}. \quad (3)$$

В этом случае скорость ведения сварочного процесса v измеряется в мм/мин.

Исходя из выражения (3) можно выбрать режим сварки, при котором равновесная структура дуплексных сталей сохраняется. Однако выбранные параметры U , I и v с соблюдением условия (3) более характерны для аргонодуговой сварки, производительность которой может быть недостаточной.

Применение механизированной сварки дуплексных сталей может быть эффективным в случае применения оборудования с управляемыми импульсными характеристиками импульсов подачи электродной проволоки, в частности с использованием дозированной подачи, т.к. обеспечивают существенно меньшие затраты электроэнергии и, соответственно тепловложения Q .

Исследование действия импульсной подачи на характеристики металла дуплексной стали в сравнении с результатами, полученными при сварке с плавной подачей электродной проволоки стали 12Х21Н5Т.

Пробные сравнительные процедуры сварки выполнялись в нижнем положении на режимах, формирующих одинаковые сечения швов и расход электродной проволоки и приведены в табл. 5.

Таблица 5

Состав металла шва дуплексной стали, при различных способах подачи электродной проволоки

Зона сварного соединения	Способ подачи электродной проволоки			
	Плавная		Дозированная	
	Содержание фазовых составляющих, %			
	Феррит	Аустенит	Феррит	Аустенит
Основной металл	68,9	31,1	56,3	43,7
Середина шва	61,2	38,8	53,9	46,1
Корень шва	60,8	39,2	52,6	47,4

Можно заметить, что исходя из результатов, приведенных в табл. 5, сварка с плавной подачей проволоки при сварке дуплексных сталей (в зависимости от режима) может привести к повышению ферритной составляющей, а, следовательно, к ухудшению свойств исходного материала в зоне сварки. В тех же случаях сварка с импульсной подачей электродной проволоки позволяет снизить выделение ферритной составляющей и получить близкое к равновесному ферритно-аустенитному состоянию шва.

Механические испытания образцов показали удовлетворительные характеристики значений предела прочности и ударной вязкости при комнатной температуре для сварки с импульсной подачей электродной проволоки. Свойства полученных сварных соединений не уступают свойствам основного металла

Важно заметить, что другие типы легированных сталей, в том числе тонколистовые конструкции из них, могут быть эффективно сварены с применением импульсной подачи электродной проволоки.

Дополнительно можно отметить, что в некоторых случаях применение импульсной подачи электродной проволоки позволяет избежать необходимости послесварочной термической обработки при сварке нержавеющей сталей.

Необходимо особо указать на существенное снижение выбросов вредных аэрозолей при дуговой сварке – наплавке с импульсными алгоритмами движения электродной проволоки, которое подробно рассмотрено в работе [15], что расширяет сферы и условия использования этого вида технологического процесса.

Выводы в соответствии со статьёй.

1. Комплекс исследований, проведенных для оценки эффективности применения управляемой импульсной подачи электродной проволоки при дуговой механизированной сварке и наплавке и касающихся физико-механических свойств результатов дугового процесса показывает, что по всем изученным направлениям импульсная подача имеет преимущества в сравнение с традиционной плавной подачей, обеспечивая повышение качества металла шва и наплавленного слоя, в том числе и путём дробления кристаллитов и их дезориентации, а также снижением тепловложений в зону шва и околошовную зону.

2. Параметры импульсной подачи по разному влияют на результаты процессов сварки и наплавки, при этом наиболее универсальной является дозированная подача электродной проволоки, в реализации которой используются обратные связи по дуговому процессу, в том числе и по току, который является ситуативным параметром.

3. Дальнейшие исследования эффективности применения различных алгоритмов формирования импульсной подачи, в частности дозированной подачи, как варианта синергетического управления переносом электродного металла, должно основываться на выборе оптимальных импульсных воздействий, для эффективного решения сразу нескольких задач регулирования сварочного процесса, который в своей сложности в этом случае становится всё более управляемым.

4. Эффективность применения импульсной подачи электродной проволоки при ведении процессов сварки и наплавки с созданием соответствующего оборудования с участием украинских производителей предполагает все более широкое его применение, а также организацию производства полуавтоматов различного назначения на основе рассмотренных технологий.

Список использованных источников

1. Патон Б. Е. Избранные труды. Киев, 2008. 894 с.
2. Лебедев В. А., Лендел И. В. Исследование технологических возможностей дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей электродной проволоки. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2015. № 9. С. 20–27.
3. Kuo C.-W., Yang S.-M., Chen J.-H., Lai G.-H., Chen Y.-C., Chang Y.-T., & Wu W. Preferred Orientation of Inconel 690 after Vibration Arc Oscillation Welding. *Materials Transactions*. 2008. Vol. 49(3). Pp. 688–690. DOI: 10.2320/matertrans. mep2007305.
4. Патон Б. Е., Лебедев В. А., Пичак В. Г., Полосков С. Ю. Эволюция систем импульсной подачи проволоки для сварки и наплавки. *Сварка и диагностика*. 2009. № 3. С. 46–51.
5. Лебедев В. А., Гулый М. В. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки. *Мехатроника. Автоматизация, Управление*. 2014. № 6. С. 47–51.
6. Lebedev V., Reisgen U. & Lendel I. Study of technological opportunities of GMAwelding and surfacing with pulse electrode wirefeed. *Welding in the World*. February 2016. P. 9.
7. Jose M. J., Kumar S. S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds. *Science and Technology of Welding & Joining*. 2016. Vol. 21(4). DOI: 10.1179/1362171815y.0000000088.
8. Воропай Н. М. Параметры режимов и технологические возможности дуговой сварки с импульсной подачей электродной и присадочной проволоки. *Автоматическая сварка*. 1996. № 10. С. 3–9.
9. Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б. Е. Патон др. *Сварочное производство*. 2002. № 2. С. 24–31.
10. Судник В. А., Ерофеев В. А., Масленников А. В., Цвелёв Р. В. Математическая модель формирования сварочной ванны при дуговой сварке под флюсом и анализ процесса переноса металла. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2015. Вып. 6. Ч. 2. С. 21–31.
11. Морозов В. П. Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений. *Известие ВУЗов: Машиностроение*, 2006. № 8. С. 41–54.
12. Лебедев В. А., Гулый М. В., Плехотко Г. А. Устройство для оценки энергоэффективности процессов. *Сварка и диагностика*. 2011. № 3. С. 50–53.
13. Сварка дуплексных нержавеющей сталей. URL: <http://www.avestawelding.com/4976.epibrw>.
14. Mondal A., Kumar Saha M., Hazra R., Das S. Influence of heat input on weld bead geometry using duplex stainless steel wire electrode on low alloy steel specimens. *Cogent Engineering*. 2016. Vol. 3(1). Pp. 14. DOI: 10.1080/23311916.2016.1143598.
15. Лебедев В. А., Левченко О. Г., Максимов С. Ю., Лукьяненко С. Ю., Лендел И. В. Гигиенические характеристики механизированной дуговой сварки с импульсной подачей электродной проволоки. *Безопасность Жизнедеятельности*. 2015. № 9. С. 15–18.

References

1. Paton B. E. (2008). *Izbrannye trudy [Selected Works]*.
2. Lebedev V. A., Lendel I. V. (2015). Issledovanie tekhnologicheskikh vozmozhnostei dugovoi svarki i naplavki s impulsnoi podachei elektrodnoi provoloki [Research of technological capabilities of arc welding and surfacing with pulse feed of electrode wire]. *Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroenii – High-tech technologists in mechanical engineering*, 9, pp. 20–27.
3. Kuo, C.-W., Yang, S.-M., Chen, J.-H., Lai, G.-H., Chen, Y.-C., Chang, Y.-T., & Wu, W. (2008). Preferred Orientation of Inconel 690 after Vibration Arc Oscillation Welding. *Materials Transactions*, 49(3), pp. 688–690/ DOI: 10.2320/matertrans. mep2007305.
4. Paton, B. E., Lebedev, V. A., Pichak, V. G., Poloskov, S. Yu. (2009). Evoliutsiia sistem impulsnoi podachi provoloki dlia svarki i naplavki [Evolution of pulse wire feed systems for welding and surfacing]. *Svarka i diagnostika – Welding and diagnostics*, 3, pp. 46–51.

5. Lebedev, V. A., Gulyi, M. V. (2014). Bystrodeistvuyushhii ventilnyi elektroprivod dlia oborudovaniia mekhanizirovanoi dugovoi svarki [Fast-acting valve electric drive for mechanized arc welding equipment]. *Mekhatronika. Avtomatyzatsiia, Upravlenie – Mechatronics. Automation, Management*, 6, pp. 47–51.
6. Lebedev, V., Reisinger, U., & Lendel, I. (2016). Study of technological opportunities of GMA welding and surfacing with pulse electrode wire feed. *Welding in the World*. February, P. 9.
7. Jose, M. J., Kumar, S. S., & Sharma, A. (2016). Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds. *Science and Technology of Welding & Joining*, 21(4). DOI: 10.1179/1362171815y.0000000088.
8. Voropai, N. M. (1996). Parametry` rezhimov i tekhnologicheskiiye vozmozhnosti dugovoi svarki s impul'snoy podachej e`lektrodnoi i prisadochnoi provoloki [Parameters of modes and technological capabilities of arc welding with pulse feed electrode and filler wire]. *Avtomaticheskaiya svarka – Automatic welding*, 10, pp. 3–9.
9. Paton, B. E., Lebedev, V. A., Pichak, V. G., Poloskov, S. I., Shhavelev, L. N. (2002). Analiz tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh vozmozhnostei impulsnoi podachi elektrodnoi provoloki v protsessakh dugovoi svarki i naplavki [Analysis of technical and technological capabilities of pulse feed of electrode wire in arc welding and surfacing]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 2, pp. 24–31.
10. Sudnik, V. A., Erofeev, V. A., Maslennikov, A. V., Tsvelev, R. V. (2015). Matematicheskaiya model formirovaniia svarochnoi vannyi pri dugovoi svarke pod flusom i analiz protsessa perenosa metalla [Mathematical model of weld pool formation in submerged arc welding and analysis of metal transfer process]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of TulSU. Technical science*, 6(2), pp. 21–31.
11. Morozov, V. P. (2006). Analiz uslovii formirovaniia izmelchennoi struktury pri kristallizatsii metalla svarochnoi vannyi s nalozheniem vneshnikh periodicheskikh vozmushhenii [Analysis of the conditions for the formation of a ground structure during crystallization of the weld pool metal with the imposition of external periodic disturbances]. *Izvestie VUZov: Mashinostroenie – Bulletin of Universities: Mechanical Engineering*, 8, pp. 41–54.
12. Lebedev, V. A., Guly, M. V., Plekhotko, G. A. (2011). Ustroistvo dlia otsenki energoeffektivnosti protsessov [A device for assessing the energy efficiency of processes]. *Svarka i diagnostika – Welding and diagnostics*, 3, pp. 50–53.
13. Svarka dupleksnykh nerzhavayushhikh stali [Welding of duplex stainless steels]. (n.d.). <http://www.avestawelding.com/4976.epibrw>.
14. Mondal, A., Kumar Saha, M., Hazra, R., & Das, S. (2016). Influence of heat input on weld bead geometry using duplex stainless steel wire electrode on low alloy steel specimens. *Cogent Engineering*, 3(1), pp. 14. DOI: 10.1080/23311916.2016.1143598.
15. Lebedev, V. A., Levchenko, O. G., Maksimov, S. Yu., Lukianenko, S. Yu., Lendel, I. V. (2015). Gigienicheskie kharakteristiki meanizirovanoi dugovoi svarki s impul'snoy podachei elektrodnoi provoloki [Hygienic characteristics of meanized arc welding with pulsed electrode wire feed]. *Bezopasnost Zhiznedeyatel'nosti – Life Safety*, 9, pp. 15–18.

UDC 4562-503.55

Boris Paton, Vladimir Lebedev, Hennady Zhuk, Vladimir Pichak

STUDYING PECULIARITIES OF PULSE ELECTRODE WIRE IMPACT ON THE RESULTS OF MECHANIZED ELECTRIC ARC WELDING – SURFACING

Relevance of the research topic. The processes of electric arc welding and surfacing with automatic or mechanized equipment are some of the most popular technologies, which constantly being improved, in one of the main directions – the use of impulse effects. The use of pulse feed of electrode wire, and more recently feed with controlled characteristics and metered feed, is being promising. The widespread use of equipment with pulsed electrode motion algorithms is somewhat constrained, in particular, due to the lack of research on the technical and technological possibilities of welding - surfacing with a pulsed electrode wire feed.

Formulation of the problem. In order to make a reasonable choice of the method of pulsed electrode wire feed and its effective use in welding and surfacing, including difficult for the arc process duplex steels, it is necessary to make a comprehensive assessment of the influence of wire impulses with different parameters on the formation of the weld metal, deposited layer, as well as their structure and other characteristics of the welding process.

Analysis of recent research and publications. Studies concerning the influence of pulsed electrode wire feed on the technical and technological results of electric arc welding and surfacing with mechanized equipment are carried out continuously, which is partially reflected in domestic and foreign technical literature, however, as a rule, they are not of a complex nature and are often not confirmed evidence-based experimental research using modern experimental techniques. All this does not allow us to fully assess the possibilities of pulsed electrode wire feed and expand the use of the corresponding equipment.

Isolation of unexplored parts of a common problem. Until now, the issues related to the structure of the weld metal of the deposited layer made with a pulsed feed of the electrode wire in a controlled mode remain not fully investigated. In this case, it is necessary to study in detail the fluctuations of the weld pool, the temperature distribution in the pool and the near-weld zone. Particular attention should be paid to the new controlling feed welding method.

Formulation of the problem. On the basis of complex experimental studies, to consider and analyze a number of basic possibilities of using the mechanisms of controlled pulse feed of electrode wire, controlling feed with determination of their influence on the properties of the weld metal and the deposited bead. Experimental studies should be carried out with the identification of pool oscillations, heat distributions, comparative analysis of microstructures, measurements of crystallites, etc.

Presentation of the main material. Presented and analyzed results of experimental studies concerning the results obtained in welding-surfacing with controlled and dosed feed of the electrode wire. These results relate to the formation of a weld, its structure, and the identification of its features. At the same time, the phenomena of oscillations of the pool, the formation of the thermal field, the microstructure of the sections of the deposited beads were studied, the sizes of crystallites were determined. The obtained data indicate the fact of a significant positive effect on the formation of the weld and the deposited layer, their structure and the possibility of controlling them by changing the parameters of the pulses of the electrode wire, which makes it possible to expand the considered welding and surfacing methods.

Conclusions in accordance with the article. A number of studies that are aimed at identifying the efficiency of welding and surfacing processes when using a controlled pulse feed of an electrode wire refer to the physical-mechanical and other properties of welded joints and deposited layers and show significant advantages in comparison with conventional feed, providing an increase in the quality of the metal, including and by crushing crystallites and reducing heat input. Among a number of methods for providing impulse feed, dosed feed with feedback on the parameters of the arc process is the most effective. The efficiency of the application of welding and surfacing processes can be used when welding poorly weldable steels and aluminum alloys. This, in particular, applies to the welding of duplex steels, some aluminum alloys, and thin construction. It should be recommended to use more and more widely mechanized and automatic equipment in technological practice in the creation and repair of a wide variety of structures.

Keywords: electric arc welding; consumable electrode; transfer of electrode metal; weld pool; weld quality; deposited layer, study.
Fig.: 4. Table: 5. References: 15.

Патон Борис Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, Президент НАН Украины. Институт электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины. (ул. Казимира Малевича, 11, г. Киев, 03150, Украина).

Paton Borys – Doctor of Technical Sciences, Professor, President of National Academy of Sciences of Ukraine. E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (11 Kazymyr Malevych St., Kiev 03150, Ukraine)

Лебедев Владимир Александрович – доктор технических наук, главный конструктор ГП ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Государственное предприятие “Опытное конструкторско-технологическое бюро Института электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины” (ГП «ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ») (ул. Боженко, 15, корп. 7, г. Киев, 03150, Украина).

Lebedev Vladimir – Doctor of Technical Sciences, chief designer SF “Experimental Design-Technological Office of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine” (SF “EDTO E. O. Paton EWI NASU”) (15 Bozhenko Str., bld. 7, 03150 Kiev, Ukraine).

E-mail: valpaton@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>

Жук Геннадий Владимирович – директор ГП ОКТЬ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Государственное предприятие “Опытное конструкторско-технологическое бюро Института электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины” (ГП «ОКТЬ ИЭС им. Е. О.Патона НАНУ») (ул. Боженко, 15, корп. 7, г. Киев, 03150, Украина).

Zhuk Hennady – Director of SF “Experimental Design-Technological Office of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine” (SF “EDTO E. O. Paton EWI NASU”) (15 Bozhenko Str., bld. 7, 03150 Kiev, Ukraine).

E-mail: dktbpaton@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6615-8239>

Пичак Владимир Григорьевич – начальник отдела ГП ОКТЬ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Государственное предприятие “Опытное конструкторско-технологическое бюро Института электросварки им. Е. О.Патона Национальной академии наук Украины” (ГП «ОКТЬ ИЭС им. Е. О.Патона НАНУ») (ул. Боженко, 15, корп. 7, г. Киев, 03150, Украина).

Pichak Vladimir – Head of Department of SF “Experimental Design-Technological Office of the E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine” (SF “EDTO E. O. Paton EWI NASU”) (15 Bozhenko Str., bld. 7, 03150 Kiev, Ukraine).

E-mail: dktbpaton@gmail.com