

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-2.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/18TVN217.pdf>

Статья опубликована 23.03.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Арутюнов Ю.А., Дробязко А.А., Чашин Е.А., Шашок П.А., Шилов И.В., Фероян А.А. Математическая модель коррекции тока для компенсации изменения высоты электрода в процессе ручной дуговой сварки // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/18TVN217.pdf> (доступ свободный).
Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.3

Арутюнов Юрий Артемович

ФГБУ «Научно-клинический центр спортивной медицины федерального медико-биологического агентства России», Россия, Москва
Ведущий научный сотрудник
Кандидат физико-математических наук, доцент
E-mail: double-spiral@yandex.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=9311

Дробязко Александр Александрович

ООО «Двойная спираль», Россия, Москва
Инженер
E-mail: omegaversion@yandex.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=880781

Чашин Евгений Анатольевич

ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева», Россия, Ковров¹
Заведующий кафедрой «Электротехники»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: kanircha@list.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=42261

Шашок Павел Александрович

ООО «Двойная спираль», Россия, Москва
Инженер
E-mail: omegaversion@yandex.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=880773

Шилов Игорь Вячеславович

ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева», Россия, Ковров
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: kanircha@list.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=42266

Фероян Аршак Артемович²

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II», Россия, Москва
Студент
E-mail: vafren1969@yandex.ru

¹ 601910, Владимирская обл., г. Ковров, ул. Маяковского, 19

² <https://vk.com/id68686390>

Математическая модель коррекции тока для компенсации изменения высоты электрода в процессе ручной дуговой сварки

Аннотация. Работа направлена на повышение устойчивости и стабильности процесса ручной дуговой сварки плавящимися электродами диаметром 2 мм с основным или рутиловым покрытием при выполнении операций стыковой сварки углеродистых и легированных сталей толщиной до 1 мм, а именно разработку электронного преобразователя тока для компенсационного управления динамическими свойствами источника питания. В работе показано, что при выполнении операции ручной дуговой сварки появление дефектов сварного соединения в виде прожига или непровара связано с изменением эффективной тепловой мощности сварочной дуги вызываемой изменением ее длины. Стабилизация эффективной тепловой мощности поддержанием длины дуги постоянной, путем визуального контроля не представляется возможной, так как визуальное наблюдение позволяет «удерживать» длину дуги при зазоре 4-5 мм, что недостижимо при сварке малых толщин, для которых длина дуги должна лежать в диапазоне 1-3 мм. Предложена математическая модель и проведен анализ термодинамических процессов в зоне сварки. По результатам моделирования определены требования, предъявляемые к электронному преобразователю тока. Показано, что стыковую сварку плавящимся электродом целесообразно производить током до 80 А при поддержании эффективной мощности теплового источника 700 Вт. Так же показано, что сохранение эффективной мощности теплового источника при изменении длины дуги в диапазоне 1-3 мм можно обеспечить путем динамической коррекции силы тока при скорости линейного перемещения электрода относительно кромок свариваемых поверхностей 0,005...0,03 м/с.

Ключевые слова: математическая модель; ручная дуговая сварка; источник питания; тепловой процесс; компенсационное управление; длина дуги

Введение

В настоящее время одной из актуальных задач является стыковая сварка металла, толщиной до 1 мм. Выполнение сварных соединений в этом случае возможно различными способами, однако для целого ряда задач предпочтительным является ручная дуговая сварка плавящимся электродом [1]. При ручной дуговой сварке зажигание дуги, поддержание ее длины во время сварки, перемещение вдоль свариваемых кромок и подача электрода в зону горения дуги по мере его расплавления осуществляется сварщиком вручную [2]. Основные параметры, определяющие качество получаемого сварного соединения регламентированы ГОСТ 5264-80, 11534-75, 16037-80 и при заданных типе сварного соединения, роде тока и его полярности включают в себя: диаметр электрода $d_{\dot{y}}$, силу сварочного тока $I_{\dot{n}\dot{a}}$, напряжение дуги $U_{\dot{a}}$ и скорость сварки $v_{\dot{n}\dot{a}}$. Род тока зависит от источника питания, различают сварку постоянным и переменным током, в работе принимаем что сварка осуществляется постоянным током. Полярность $I_{\dot{n}\dot{a}}$ зависит от толщины металла. Согласно известным рекомендациям [2] при сварке постоянным током среднеуглеродистых сталей небольшой толщины, для уменьшения вероятности прожогов и перегревов металла, целесообразно вести сварку с использованием обратной полярности. Скорость сварки, т.е. равномерность перемещения дуги вдоль свариваемых кромок, во многом зависит от квалификации сварщика, который должен вести электрод вдоль свариваемой поверхности. В работе принимаем $v_{\text{св}}=\text{const}$ полагая, что квалификация сварщика позволяет вести электрод вдоль свариваемой поверхности с одинаковой скоростью.

Диаметр используемых плавящихся электродов d_y определяется сортаментом проволоки, из которого они изготавливаются. Согласно ГОСТ 2246-70 для изготовления электродов используются проволоки номинальным диаметром не менее 1,6 мм. Однако, согласно действующему реестру сварочных материалов в настоящее время электроды для ручной дуговой сварки производятся диаметром не менее 2,0 мм с рутиловым или основным покрытием. Принимаем в расчетах, что сварка выполняется электродами марки УОНИ 13/55 R тип Э50А по ГОСТ 9467. Для выбранного электрода, в соответствии с известными рекомендациями [3] из условия возбуждения дуги в момент отрыва электрода, принимаем что значения силы сварочного тока и напряжения дуги изменяются в диапазонах $U_{\dot{a}}=20-25$ В и $I_{\dot{a}}=25-35$ А.

Известно, что устойчивость горения и стабильность режима сварки зависит как от физико-химических условий существования дугового разряда, так и от свойств и параметров источника питания. Пренебрегая процессами массопереноса в сварочной ванне, принимаем в работе, что $I_{\dot{a}}$ зависит от расстояния между концом электрода и сварочной ванной $l_{\dot{a}}$. В этом приближении ВАХ источника питания задается двумя значениями: напряжением холостого хода U_{xx} и максимальным значением тока $I_{\dot{e}c}$ достигаемым в режиме короткого замыкания в момент касания электрода и детали при первоначальном поджиге дуги (рис. 1).

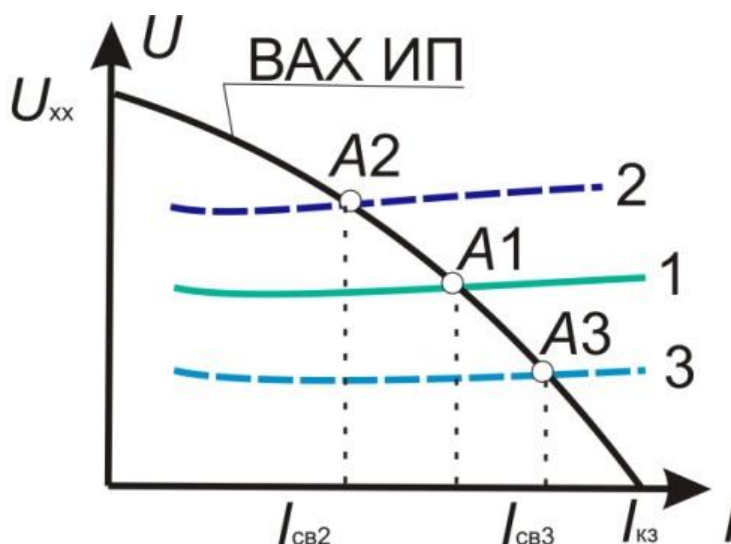


Рисунок 1. Соответствие ВАХ источника питания и сварочной дуги [3]: 1 - ВАХ для «номинального» значения $l_{\dot{a}}$; 2 - ВАХ для значения $l_{\dot{a}}$ больше «номинального»; 3 - ВАХ для значения $l_{\dot{a}}$ меньше «номинального». A1-A3 - рабочие точки устойчивого горения дуги

При ручной дуговой сварке плавящимся электродом металла толщиной более 1 мм, работа производится на линейном (жестком) участке ВАХ дуги, характеризуемом практически нулевым активным сопротивлением дуги (рис. 1, точки устойчивого горения дуги A1-A3), на котором при изменении длины дуги (рис. 1, кривые 1-3), наблюдается практически линейная зависимость изменения значений $I_{\dot{a}}$.

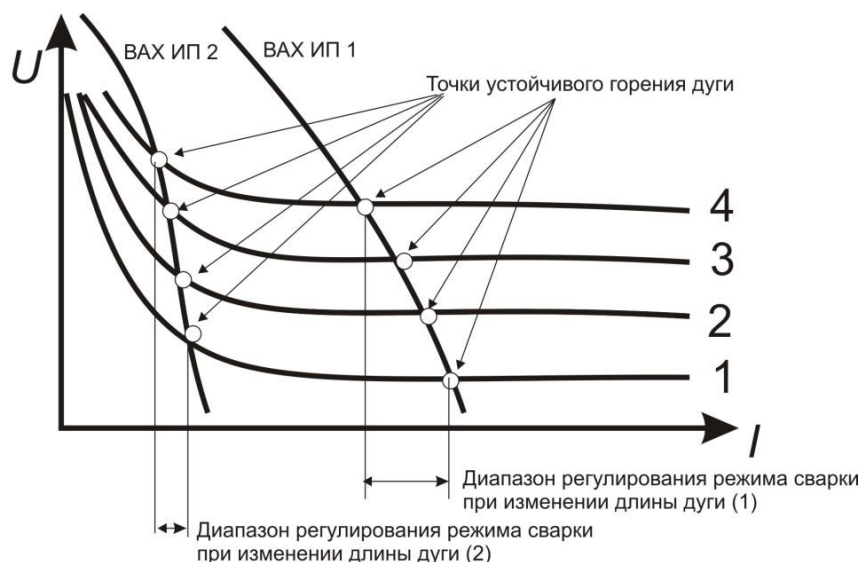


Рисунок 2. Соответствие ВАХ источника питания (ВАХ ИП1 - сварка толщин более 1 мм, ВАХ ИП2 - сварка толщин менее 1 мм) и сварочной дуги 1-4 - ВАХ дуги для разных значений $l_{\dot{a}}$ ($l_{\dot{a}1} < l_{\dot{a}2} < l_{\dot{a}3} < l_{\dot{a}4}$) (разработано авторами)

При сварке малых толщин менее 1 мм (рис. 2) работа производится на падающем участке ВАХ дуги, активное сопротивление дуги в этом случае имеет нелинейный характер и отрицательное значение. Кроме того, следует указать, что диапазон изменения $l_{\dot{a}}$ сужается. Это ужесточает требования, предъявляемые к сохранению неизменным расстояния между концом электрода и сварочной ванной. Действительно, при ручной дуговой сварке плавящимся электродом дуговой разряд существует между изделием и концом непрерывно расплавляемого электрода, металл которого переходит в сварочную ванну и таким образом участвует в формировании шва, т.е. расстояние $l_{\dot{a}}$ постоянно возрастает. Известно, что при ручной дуговой сварке визуальное наблюдение позволяет «удерживать» расстояние $l_{\dot{a}}$ постоянным при зазоре 4-5 мм (см. рис. 2, ВАХ ИП1). В то же время, шов считается хорошо сформированным если расстояние между концом электрода с сварочной ванной $l_{\dot{a}}$ постоянно и удовлетворяет зависимости [4]:

$$l_{\dot{a}} = (0,5 \div 1,2)d_y \quad (1)$$

Из выражения (1) и данных, приведенных на рис. 2. видно, что $l_{\dot{a}}$ должно составлять 1-2,4 мм. Уменьшение $l_{\dot{a}}$ ниже рекомендуемого значения приведет к прожогу, а превышение - сопровождается уменьшением глубины провара и разбрызгиванием. Таким образом, сварщик не может на основании «визуального контакта» обеспечивать заданное положение и ориентацию источника нагрева (конец непрерывно расплавляемого электрода) относительно свариваемого соединения с компенсацией случайных отклонений длины сварочной дуги, которая в 2-5 раз короче «визуально корректируемой».

Механизация основных работ, применительно к ручной дуговой сварке плавящимся электродом, так же не позволяет обеспечить корректировку положения сварочного инструмента в процессе сварки [5]. А известные способы поддержания горения дуги увеличением индуктивности [6-8] сопровождаются существенным усложнением конструкции и ростом массогабаритных параметров блока питания сварочного аппарата.

Таким образом, сложность «механического» поддержания $l_{\dot{a}}$ постоянным и равным 1 мм, работа на нелинейном участке ВАХ дуги, отличающемся отрицательным активным

сопротивлением дуги, сужение, допускаемого для формирования качественного сварного соединения, диапазона изменения $I_{\bar{n}\hat{a}}$ делает актуальным разработку парциального корректора, обеспечивающего преобразование тока для компенсационного управления динамическими свойствами источника питания.

Целью исследований является определение, по результатам математического моделирования термодинамических процессов, требований, предъявляемых при ручной дуговой сварке в стык листового материала толщиной до 1 мм, к парциальному корректору тока.

Основная часть

Рассмотрим зажигание дуги и процесс ее устойчивого горения. Известно [9], что процесс возникновения дуги при сварке протекает следующим образом: при касании концом электрода свариваемого металла происходит короткое замыкание сварочной цепи (рис. 3, а). Проходя через отдельные выступы, обусловленные шероховатостью контактирующих поверхностей, ток, имеющий в точках соприкосновения электрода с металлом очень высокую плотность, практически мгновенно расплавляет их, вследствие чего между электродом и металлом образуется тонкая прослойка из жидкого металла (рис. 3, б). В следующий момент сварщик несколько отводит электрод, отчего в жидком металле образуется шейка (рис. 3, в), где плотность тока и температура металла возрастают. Затем благодаря испарению расплавленного металла шейка разрывается и в ионизированном промежутке газов и паров между электродом и металлом образуется сварочная дуга (рис. 3, г). Возникающая при этом термо- и автоэлектронная эмиссия электронов между катодом и электродом создает условие для устойчивого горения дуги при токе и напряжении сварочной цепи.

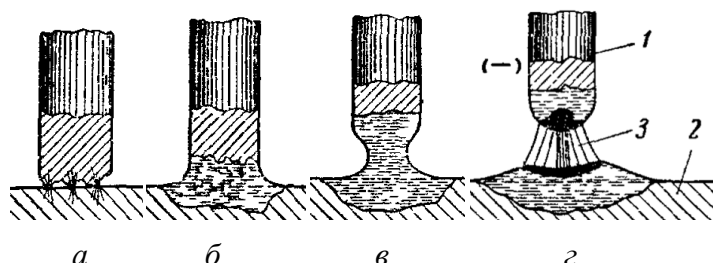


Рисунок 3. Схема возникновения дуги между металлическим электродом и металлом [9]:
а - короткое замыкание, б - образование прослойки из жидкого металла, в - образование шейки, г - возникновение дуги, 1 - электрод, 2 - металл, 3 - дуга

Из рис. 3 видно, что U_d как разность потенциалов между электродом и свариваемым металлом, зависит в основном от длины l_d и в общем случае может быть определена [3]:

$$U_{\bar{a}} = a + b \cdot l_{\bar{a}} + (\bar{n} + d_y l_{\bar{a}}) / I_{\bar{n}\hat{a}}, \quad (2)$$

где: a - суммарное анодно-катодное падение напряжения; b - градиент потенциала в столбе дуги; c , d - мощности, затрачиваемые на вырывание электронов из катодного пятна, и на продвижение электронов в межэлектродном промежутке, соответственно.

Видно, что в выражении (2) падение напряжения $(\bar{n} + d_y l_{\bar{a}}) / I_{\bar{n}\hat{a}}$ зависит от силы тока, что соответствует падающему характеру ВАХ (см. рис. 2) и подтверждает допустимость применения формулы (2) для расчета. Следует заметить, что выражение (2) для малых токов до 80...100 А неприменимо для дуги длиной менее 1 мм. Однако для режимов РДС с токовой корректировкой колебаний высоты электрода использование сверхкоротких дуг должно быть исключено.

С учетом сделанных допущений определим зависимость мощности эквивалентного теплового источника от высоты дуги. Будем считать, что эффективность преобразования электрической мощности в тепловую составляет 75%. Тогда эквивалентная тепловая мощность дуги в режиме ручной дуговой сварки составляет

$$P_T = 0.75 \cdot U_{\dot{a}} I_{\dot{a}}, \quad (3)$$

Введем линейно связанный с длиной дуги параметр:

$$h = a + b \cdot l_{\dot{a}}. \quad (4)$$

Из выражений (2) и (3), с учетом подстановки (4) получаем зависимость, позволяющую оценить уровень коррекции тока сварки $I_{\dot{a}.\dot{e}\dot{i}\dot{o}}$:

$$I_{\dot{a}.\dot{e}\dot{i}\dot{o}} = \frac{d}{b} + \frac{1}{h} \left(\frac{P_T}{0.75} - c - \frac{a \cdot d}{b} \right). \quad (5)$$

Ток коррекции сварки (5) обеспечивает постоянными эффективные значения тока и тепловой мощности, что позволяет исключить при колебаниях $l_{\dot{a}}$ срыв дуги и нарушение баланса плавления и таким образом исключить вероятность возникновения непровара или прожига. Результаты расчета приведены на рис. 4. В расчете принимали $a = -2$ В, $b = 4,9$ В/мм, $c = 573$ ВА, $d = -15$ ВА/мм.

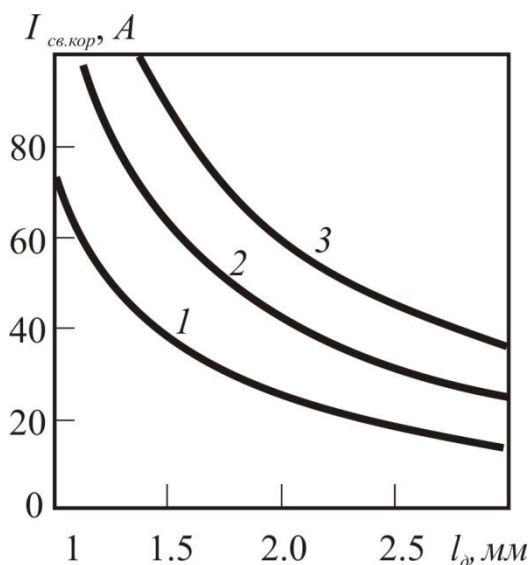


Рисунок 4. Зависимость величины тока коррекции от длины дуги: 1 - мощность теплового источника 600 Вт; 2 - 700 Вт; 3 - 800 Вт (разработано авторами)

Предполагая выполнение сварного соединения качественным из условия постоянства мощности теплового источника в приближении неизменности скорости линейного перемещения электрода вдоль свариваемых кромок. А также пренебрегая малым изменением глубины и ширины ванны расплава, вызванного изменением гидродинамического давления дуги вынужденная конвекция расплава, можно считать, что величина тока коррекции нелинейно падает с увеличением длины дуги (см. рис. 4). Это позволяет предположить возможность поддержания постоянства тепловой мощности источника при изменении длины $l_{\dot{a}}$ путем доработки сварочного инвертора подключением электронного корректора, обеспечивающего преобразование тока для компенсационного управления динамическими свойствами источника питания.

Определим, на примере наплавки валика, взаимосвязь режима сварки с погонной энергией и тепловой мощностью источника (рис. 5). Для линейного быстродвижущегося со скоростью $v_{\text{св}}$ источника тепла мощностью P_T в тонкой пластине толщиной δ распределение температуры в поперечном направлении “ y ” через время t [10]:

$$T = \frac{P_T}{v_{\text{н}a}\delta\sqrt{4\pi k c \rho t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right) \quad (6)$$

где a , k , c , ρ - температуропроводность, теплопроводность, теплоемкость и плотность материала пластины.

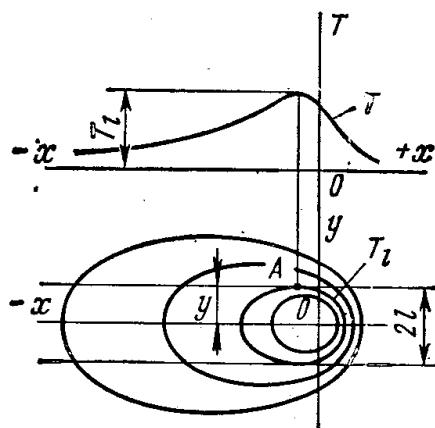


Рисунок 5. Определение ширины зоны $2l$, нагретой выше T_1 [10]: T_1 - заданная температура

Из рис. 5. видно, что время тепловой экспозиции удобно принять равным:

$$t = 2l / v_{\text{н}a} \quad (7)$$

Перепишем выражение (6) с учетом подстановки (7). В этом приближении стационарное распределение температур в тонкой пластине, движущееся синхронно вместе с источником тепла принимает вид

$$T = \frac{P_T}{2\pi k \delta} \exp\left(-\frac{v_{\text{н}a}}{2a}\right) K_0\left(r \sqrt{\frac{v_{\text{н}a}^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right) \quad (8)$$

где: K_0 - Бесселева функция, r - плоский радиус-вектор в подвижной системе координат, связанной с источником теплоты, определяемый из выражения $r^2 = x^2 + y^2$; b коэффициент теплоотдачи, учитывающий поверхностную теплоотдачу в среду.

$$b = 2\alpha_T / (c\rho\delta) \quad (9)$$

При принудительном охлаждении зоны сварки сжатыми газами такими как аргон, азот коэффициент $\alpha_T \geq 100$ Вт/(м²К). Поскольку зона теплового воздействия при выполнении операции ручной дуговой сварки, как правило, принудительно не охлаждается то поверхностная теплоотдача мала $\alpha_T \approx 5$ Вт/(м²К) и в дальнейших расчетах ее влиянием пренебрегаем. Так же пренебрегаем влиянием скрытой теплоты плавления, т.к. удельные затраты на нагрев плавящегося материала и теплоотдачу из зоны плавления в окружающий металл на порядок выше.

В соответствии с требованиями ГОСТ 5264-80 «Швы сварных соединений. Ручная электродуговая сварка. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» стыковая сварка металла толщиной до 1 мм выполняется без зазора и разделки кромок. При этом коэффициент формы шва, выражаемый отношением ширины стыкового шва к его толщине может изменяться в диапазоне 0,8...4. Таким образом ширина стыкового шва может изменяться в диапазоне 0,8-4 мм. Учитывая, что ручная дуговая сварка выполняется плавящимся электродом диаметром 2 мм принимаем, что полуширина сварного шва l (см. рис. 5) может изменяться в пределах 1-2 мм. С учетом сделанных допущений, задавая в левой части выражения (8) температуру T_l равной температуре плавления T_m , и принимая в правой части выражения мощность теплового источника определенной по выражению (3) построим для пластины толщиной $\delta = 1$ мм график зависимости скорости сварки (рис. 6).

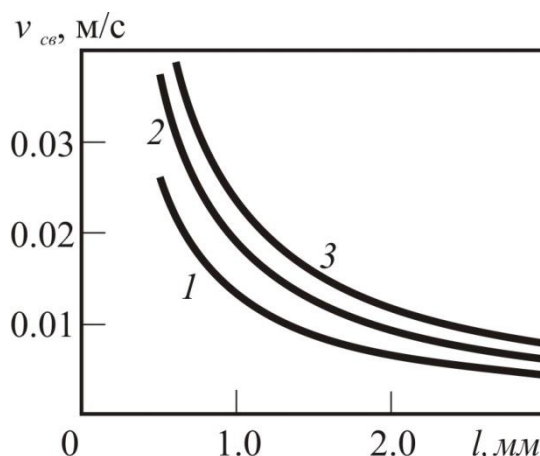


Рисунок 6. Зависимость скорости сварки от полуширины сварного шва: 1 - мощность теплового источника 600 Вт; 2 - 700 Вт; 3 - 800 Вт (разработано авторами)

Видно (см. рис. 6), что эффективная коррекция тока дуги при ручной дуговой сварке в стык металла толщиной до 1 мм возможна при скоростях линейного перемещения электрода вдоль свариваемой поверхности удовлетворяющих диапазону 0,005...0,03 м/с. При выполнении операции сварки с иными скоростями компенсационное управление динамическими свойствами источника питания не обеспечит постоянным эффективную мощность тепловыделения, обеспечивающую плавление металла без прожига или непровара.

Заключение

В работе показано, что при выполнении операции ручной дуговой сварки исключение появления дефектов сварного соединения в виде прожига или непровара, вызванных изменением длины дуги, возможно путем компенсационного управления динамическими свойствами источника питания, а именно сохранением эффективной мощности посредством парциальной коррекцией тока дуги. Предложена математическая модель и проведен анализ термодинамических процессов в зоне сварки. Показано, что стыковую сварку плавящимся электродом диаметром 2,0 мм с основным или рутитовым покрытием металлов толщиной до 1 мм целесообразно производить при эффективной мощности теплового источника 700 Вт. Так же показано, что сохранение эффективной мощности теплового источника путем динамической коррекции силы тока возможно при скорости линейного перемещения электрода относительно кромок свариваемых поверхностей 0,005...0,03 м/с. Определены диапазоны изменения силы тока - до 80 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чашин Е.А. Продление ресурса оборудования для наземных обработок космических аппаратов / Е.А. Чашин, И.В. Шилов, С.А. Балашова, А.А. Митрофанов / Информация и космос. - 2009. - №2. с. 115-119.
2. Сварка и свариваемые материалы: в 3-х т. Т.П. Технология и оборудование. Справ. изд. / Под ред. В.М. Ямпольского. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. - 574 с.
3. Сварка в машиностроении: Справочник. Т.2. / Под ред. А.И. Акулова. - М.: Машиностроение, 1978. - 462 с.
4. Китаев А.М., Китаев А.Я. Справочная книга сварщика. - М.: Машиностроение, 1985. - 256 с.
5. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др.-М.: Машиностроение. Оборудование для сварки. Т. IV-6 / В.К. Лебедев, С.И. Кучук-Яценко, А.И. Четвертко и др.; Под ред. Б.Е. Патона, 1999. - 496 с.
6. Арутюнов Ю.А., Дробязко А.А., Крылов А.И., Чашин Е.А., Шашок П.А., Шилов И.В. Влияние топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии // Современные наукоемкие технологии. - 2016. - №10-1. - С. 29-32; URL: <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36273> (дата обращения: 09.03.2017).
7. Чашин Е.А., Арутюнов Ю.А., Бадалян Н.П., Дробязко А.А., Шашок П.А. Влияние топологии Мебиуса на магнитные свойства магнито-мягких ферромагнетиков в замкнутой магнитной цепи // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/53TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
8. Арутюнов Ю.А., Дробязко А.А., Крылов А.И., Митрофанов А.А., Чашин Е.А., Шашок П.А. Сравнительный анализ влияния топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии для магнитопровода с различными геометрическими параметрами // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/23TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
9. Кузнецов С.И. Пожарная профилактика при производстве огневых работ - М.: Издательство литературы по строительству, 1964. - 68 с.
10. Теоретические основы сварки / В.В. Фролов, В.А. Винокуров, В.Н. Волченко, В.А. Парахин, И.А. Арутюнова. Под ред. В.В. Фролова. - М.: Высшая школа, 1970. - 592 с.

Arutyunov Yuri Artemovich

Scientific-clinical center of sports medicine federal medical-biological agency of Russia, Moscow, Russia
E-mail: double-spiral@yandex.ru

Droblyazko Aleksandr Aleksandrovich

LLC «Double spiral», Russia, Moscow
E-mail: omegaversion@yandex.ru

Chaschin Yevgeny Anatolevich

Kovrov state technical academy, Russia, Kovrov
E-mail: kanircha@list.ru

Shashok Pavel Aleksandrovich

LLC «Double spiral», Russia, Moscow
E-mail: omegaversion@yandex.ru

Shilov Igor Vyacheslavovich

Kovrov state technical academy, Russia, Kovrov
E-mail: kanircha@list.ru

Feroyan Arshak Artemovich

Moscow state university of railway engineering (MIIT), Russia, Moscow
E-mail: vafren1969@yandex.ru

The mathematical model of the current correction for compensation of electrode changes during the manual arc welding

Abstract. The work is aimed at increasing the process stability of the manual arc welding by melting electrodes 2 mm in diameter with the main or rutile coating while performing butt welding of carbon and alloy steels up to 1 mm thick. Attention is given to the development of an electronic current converter for compensating control of the dynamic properties of a power source. It was shown that when performing a manual arc welding operation, the appearance of defects in a welded joint in the form of a burning or a fissure is associated with a change in the effective thermal power of the welding arc caused by a change in its length. Stabilization of effective thermal power by maintaining the constant arc length through visual control is not possible, since visual observation allows to "keep" the arc length with a gap of 4-5 mm, which is unattainable when welding small thicknesses, for which the arc length should lie in the range of 1-3 mm. A mathematical model was proposed and an analysis of the thermodynamic processes in the welding zone was carried out. The requirements imposed on the electronic current converter are determined from the results of modeling. It was shown that the butt welding with a consumable electrode is expedient to produce with current up to 80 A while maintaining the effective power of a thermal source of 700 W. It was also shown that the conservation of the effective power of the heat source when the length of the arc is varied in the range of 1-3 mm can be achieved by the dynamically correcting the current at a speed of linear displacement of the electrode relative to the edges of the welded surfaces from 0,005 to 0,03 m/s.

Keywords: mathematical model; manual arc welding; power supply; thermal process; compensatory management; arc length