

УДК 621.791.01; 621.791.03

## СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КАПЛИ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИХ ПЕРЕХОДОМ В СВАРОЧНУЮ ВАННУ ПРИ СВАРКЕ ОЦИНКОВАННЫХ СТАЛЕЙ

д-р техн. наук, проф. С.К. ПАВЛЮК, А.В. ЛУПАЧЁВ  
(Белорусско-Российский университет, Могилев)

*Разработана математическая модель влияния равнодействующих сил на каплю электродного металла при ее переходе с торца электрода в сварочную ванну. На основе модели выявлены основные силы, воздействующие на капли электродного металла для управления их переходом в сварочную ванну при сварке оцинкованных сталей. Управление частотой переноса капель расплавленного металла в сварочную ванну может быть осуществлено электродинамическими силами путем воздействия импульсами сварочного тока и инерционными силами, возникающими при изменении скорости подачи электродной проволоки вплоть до ее останова или реверса. Определены величины сил, действующих на каплю электродного металла, обеспечивающие отрыв капли с торца электрода и переход в сварочную ванну. Установлены количественные значения величин основных параметров процесса сварки. Механизированная импульсно-дуговая сварка в защитных газах на современном сварочном оборудовании, обеспечивающем устойчивое горение дуги малой мощности с управляемым переносом капель электродного металла инерционными силами, а также оптимизация параметров процесса сварки, позволяют получить качественное соединение оцинкованной стали малой толщины и сохранить защитное цинковое покрытие рядом со швом на основе алюминиевого сплава.*

**Введение.** Управление переходом электродного металла с плавящегося электрода в сварочную ванну при дуговой сварке в защитных газах необходимо для устойчивого протекания процесса сварки на малых токах, снижения разбрызгивания, улучшения качества формирования поверхности шва, повышения производительности [1, 2]. Управление переходом электродного металла позволяет оптимизировать технологии сварки сталей с покрытиями, в частности, оцинкованных. Низкая температура плавления цинка обуславливает высокую чувствительность оцинкованных сталей к термическому циклу сварки. Нагрев приводит к повреждению защитного покрытия и, как следствие, к потере защитных антикоррозионных свойств. При сварке оцинкованных сталей необходимо обеспечить минимальное тепловложение, что, однако, снижает устойчивость горения дуги и требует регулирования перехода капель в сварочную ванну. При дуговой сварке сталей с цинковым покрытием электродной проволокой на основе медного или алюминиевого сплава регулированием частоты перехода капель можно снизить их теплосодержание и обеспечить управление тепловложением в свариваемый металл [3]. При отрыве капли металла с торца электрода на нее действует комплекс сил разной природы. Их соотношение определяет характер переноса металла: крупнокапельный с короткими замыканиями дугового промежутка и без них, мелкокапельный и струйный. Основным параметром, характеризующим перенос электродного металла в сварочную ванну, является частота перехода капель, определяющая их размер и массу [4]. При сварке в защитных газах увеличение частоты перехода капель положительно сказывается на стабильности процесса и его результате. Управление частотой перехода капель можно осуществлять регулированием параметров режима сварки, изменением состава защитной атмосферы, воздействием на каплю инерционных, электромагнитных и других сил [5].

**Анализ сил, действующих на каплю электродного металла.** С целью определения параметров силового воздействия на каплю рассмотрим действующие на нее основные силы – это силы поверхностного натяжения, электродинамические силы, сила тяжести, реактивные силы давления паров, сила инерции и другие. Одни силы удерживают каплю на электроде, другие – способствуют ее отрыву и переходу в сварочную ванну. Есть силы, способные действовать по-разному в зависимости от условий (формы и размеров капли, соотношения диаметра столба дуги и размера капли, величины силы сварочного тока и напряжения, полярности тока и других факторов). Основной силой, удерживающей каплю металла на торце электрода, является равнодействующая сил поверхностного натяжения. Максимальное значение равнодействующей

$$P_{н.н.} = \pi d_s \sigma, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения Н/м;  $d_s$  – диаметр электрода, м.

Осевая составляющая электродинамических сил направлена от меньшего сечения проводника к большему. При малых плотностях тока ( $i \leq 30$  А/мм<sup>2</sup>) она поддерживает каплю на торце электрода [6, 7], а при больших – способствует ее отрыву. Осевая равнодействующая электродинамических сил  $P_{эо}$  [8]:

$$P_{эо} = \frac{\mu \mu_0}{4\pi} I^2 \ln \frac{R_s}{R_k}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м;  $I$  – сила сварочного тока, А;  $R_k$  – радиус капли, м;  $R_s$  – радиус электродной проволоки, м.

При сварке в нижнем положении силы тяжести способствуют отрыву капли от торца электрода. Предположим, что капля имеет форму, близкую к шаровидной, тогда величина силы тяжести  $P_m$  равна

$$P_m = \frac{4}{3} \pi R_k^3 \rho g, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность расплавленного металла, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Сила тяжести имеет существенное значение при крупнокапельном переходе металла, ее роль снижается по мере измельчения капель.

Металл капли в приэлектродных областях нагрет до температур, близких к температуре кипения, что приводит к образованию потока паров металла из приэлектродных областей в столб дуги. Этот поток создает реактивное давление на каплю. При внезапном отключении сварочного тока реактивное давление паров металла способно преодолеть силы тяжести и переместить каплю вверх по электродной проволоке. Равнодействующая реактивных сил давления паров может быть существенной:

$$P_n = kI^2, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $k = 3 \cdot 10^{-8}$  Н/А для сварки на обратной полярности.

В катодную область из столба дуги переходят ускоренные ионы, которые, ударяясь о поверхность катода и присоединив электрон, перемещаются в столб дуги.

Суммарное давление ионов на металл капли проявляется при сварке на прямой полярности. В связи с электрической природой этой силы она пропорциональна величине электрического тока. В рассматриваемом нами случае сварки в защитных газах на обратной полярности давление ионов направлено на сварочную ванну и не влияет на характеристики перехода капель.

Аэродинамические силы возникают вследствие «парусности» капли в потоке защитного газа. В работе [9] показано, что при сварке сталей с оцинкованным покрытием для снижения скорости его испарения необходимо обеспечить ламинарное истечение защитного газа с малыми скоростями. Однако для данного случая роль аэродинамических сил в переходе капли в сварочную ванну незначительна.

При высоких температурах капли термодинамическое равновесие сдвигается и возможны реакции с образованием внутрикапельных пузырьков газа. Например, при сварке стали газовые пузырьки способны делить каплю на более мелкие капли, что приводит к увеличению частоты переноса капель. При сварке в аргоне, особенно при добавлении к аргону 8...10 % водорода, реакция образования СО подавляется. Силы внутреннего давления пузырьков, разрывающие каплю, в построении модели не учитываются.

При коротких замыканиях дугового промежутка через жидкую переемычку проходит весь ток. Его нарастание в результате повышения проводимости приводит к быстрому выделению значительного количества энергии и действию электродинамических сил. Происходит электрический взрыв жидкой переемычки, при этом капли жидкого металла перемещаются не только в сварочную ванну, но и за ее пределы, вызывая разбрызгивание металла. Далее рассматривается процесс сварки без электрических взрывов.

Электростатические силы возникают вследствие градиента потенциала в катодной и анодной областях дуги. Эти силы создают давление на свариваемый металл.

Величина силы  $P_s$ , действующая на единицу поверхности тела при взаимодействии между собой избыточных зарядов:

$$P_s = \frac{\sigma_Q^2}{4\xi},$$

где  $\sigma_Q$  – поверхностная плотность заряда  $Q$ , Кл/м<sup>2</sup>;  $\xi$  – диэлектрическая постоянная среды.

У поверхности катода давление электростатических сил достигает  $(0,89...16,4) \cdot 10^3$  Па. При сварке на обратной полярности его можно не учитывать [10].

Сила, обусловленная втеканием жидкого металла в каплю, соизмерима с другими силами, действующими на каплю при сварке и способствует отрыву капли. По мере стекания жидкого металла в каплю и увеличения ее размеров образуется шейка, диаметр которой меньше диаметра проволоки и уменьшается по мере роста капли. Величина силы определяется формулой:

$$F = mV_{n.n.} \frac{d_n^2}{d_{ш}}, \quad (5)$$

где  $m$  – масса одного метра проволоки, кг;  $V_{n.n.}$  – скорость подачи проволоки, м/с;  $d_n$  – диаметр электродной проволоки, м;  $d_{ш}$  – диаметр шейки капли, м.

В переносе металла могут участвовать инерционные силы  $P_u$ , возникающие при придании капле ускорений от вибрации, неравномерности подачи проволоки и других причин. Их величина зависит от массы капли и ускорения:

$$P_u = \frac{4}{3} \pi R_k^3 \rho a, \quad (6)$$

где  $a$  – ускорение капли от переменной скорости подачи электродной проволоки,  $m/c^2$ .

**Построение физической модели и исследование взаимодействия сил.** Схема равнодействующих сил на каплю электродного металла при ее переходе через дуговой промежуток в сварочную ванну представлена на рисунке 1, где показаны основные силы и не учтены силы, которые меньше основных на порядок. Тогда условие отрыва капли с торца электрода записывается следующим образом:

$$P_{п.н.} + P_n \leq P_m + P_u + P_{э\delta}. \quad (7)$$

С учетом значений, входящих в неравенство (7), получим:

$$2\pi R_s \sigma + kI^2 \leq mg + ma + \frac{\mu\mu_0}{4\pi} I^2 \ln \frac{R_k}{R_s}. \quad (8)$$

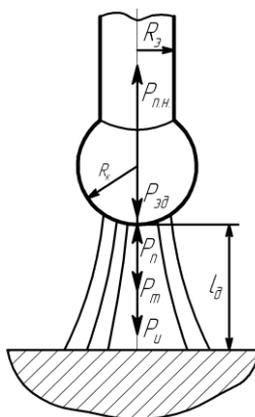


Рис. 1. Геометрическая интерпретация физической модели действия равнодействующих сил на каплю электродного металла при ее переходе с торца электрода в сварочную ванну без коротких замыканий дугового промежутка

Представленная на рисунке 1 модель отличается от моделей других авторов [10] учетом инерционных сил, поскольку управление переходом капель под действием этих сил является новым направлением совершенствования дуговой сварки.

Масса капли  $m$  в выражении (8) составит

$$m = \frac{4}{3} \pi R_k^3 \rho, \quad (9)$$

откуда радиус капли

$$R_k = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}}. \quad (10)$$

Массу капли можно также определить, зная частоту перехода капель металла и скорость подачи электродной проволоки. Принимаем для исследований частоту перехода электродного металла в интервале  $30 \dots 160 \text{ c}^{-1}$ , поскольку значение нижнего предела соответствует переходу при сварке в среде аргона на малой силе сварочного тока, а верхнее значение близко к частоте перехода металла при силе тока, превышающей его критическое значение перехода к струйному переносу. Масса капли по частоте перехода:

$$m = \frac{\pi R_s^2 V_n \rho}{n}, \quad (11)$$

где  $n$  – частота переноса капель,  $c^{-1}$ .

С учетом выражений (10) и (11)

$$R_k = \sqrt[3]{\frac{3R_s^2 V_n}{4n}}. \quad (12)$$

Принудительный отрыв капли может быть осуществлен воздействием импульсами тока, что используется при импульсно-дуговой сварке. Для принудительного отрыва капли необходимо определить величину импульса сварочного тока  $I_u$ , время  $t_u$  действия импульса, или скважность импульса:

$$C_u = \frac{t_u}{t_u}, \quad (13)$$

где  $t_u$  – время действия импульса, с;  $t_u$  – время цикла, с.

Для определения величины импульса тока трансформируем модель, представленную на рисунке 1, учитывая, что на каплю электродного металла инерционные силы не действуют:

$$2\pi R_s \sigma + k_2 (I_{св} + I_u)^2 \leq mg + k_1 (I_{св} + I_u)^2 \ln \frac{R_k}{R_s}. \quad (14)$$

Откуда

$$I_{св} + I_u = \sqrt{\frac{2\pi R_s \sigma + k_2 I_{св}^2 - mg}{k_1 \ln \frac{R_k}{R_s}}}. \quad (15)$$

На графиках (рис. 2) показаны значения импульсов тока при использовании электродных проволок  $d_s = 1$  мм из различных материалов в зависимости от режима сварки ( $I_{св} = 50 \dots 200$  А;  $U_d = 22 \dots 30$  В; частота импульсов 50 (100) с<sup>-1</sup>; защитный газ – аргон).

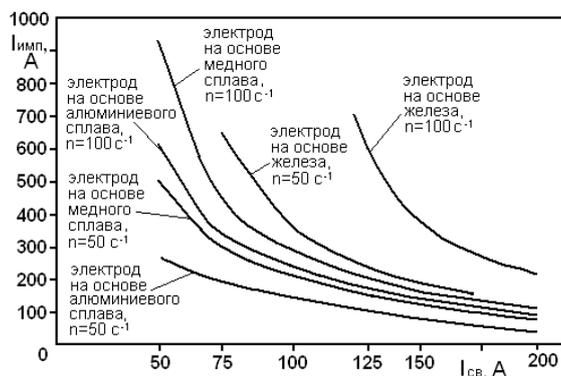


Рис. 2. Значение импульсов тока при сварке электродными проволоками разного состава на различных режимах сварки в зависимости от частоты импульсов

Сопоставим энергию, необходимую для отрыва капли, с энергией импульса. Энергию, необходимую для отрыва капли, определим как произведение равнодействующей сил поверхностного натяжения на перемещение центра тяжести капли, равное ее радиусу:

$$E = 2\pi R_k^2 \sigma. \quad (16)$$

Энергия импульса  $E_u$ , расходуемая на отрыв капли, определяется по формуле:

$$E_u = (I_{св} + I_u) U t, \quad (17)$$

где  $t$  – время действия импульса прямоугольной формы, с;  $I_{св}$  – сила сварочного тока, А;  $I_u$  – ток импульса, А;  $U$  – напряжение на дуге, В.

Тогда

$$(I_{св} + I_u) U t = 2\pi R_k^2 \sigma. \quad (18)$$

Откуда время импульса

$$t = \frac{2\pi R_k^2 \sigma}{U (I_{св} + I_u)}. \quad (19)$$

Необходимое время действия импульса сварочного тока величиной 100...900 А мало и составляет миллионные доли секунды. Источники питания обеспечивают более длительное, чем необходимо для принудительного отрыва капли, время действия импульса, поскольку длительные импульсы обеспечить технически проще. Необходимую величину тока импульса нужно выбирать больше минимально необходимой, с учетом обеспечения регулируемого переноса во всем диапазоне режимов сварки, включая режимы сварки в вертикальном и потолочном положениях. Для сварки оцинкованных сталей толщиной 0,55...5 мм следует выбирать оборудование, обеспечивающее минимальные сварочные токи и умеренные значения тока импульса, с учетом того, что необходимая длительность импульса может обеспечиваться любыми импульсными источниками питания. Однако использование импульсов тока не является универсальным способом воздействия на каплю электродного металла для ее принудительного отрыва.

В последнее время широко используется воздействие инерционных сил для управления переходом капли в сварочную ванну путем обеспечения реверса электродной проволоки [11].

При исследовании модели рассчитаны значения реверсивных ускорений электродной проволоки, необходимые для принудительного отрыва капли с торца электрода (рис. 3).

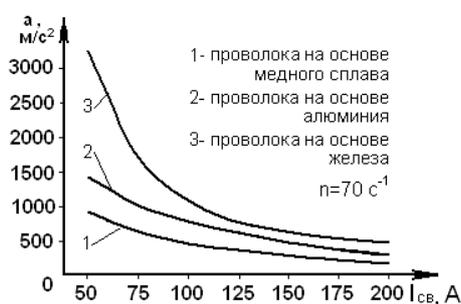


Рис. 3. Зависимость реверсивного ускорения электродной проволоки, необходимого для отрыва капли с торца электрода, от силы сварочного тока при частоте реверса  $70 \text{ с}^{-1}$  без замыканий дугового промежутка

Приведенные на рисунке 3 результаты исследований показывают, что управлять переносом металла без коротких замыканий дугового промежутка созданием дополнительных инерционных сил затруднительно в связи с большими ускорениями, требуемыми для принудительного отрыва капли малой массы с торца электрода. Инерционность механизмов подачи препятствует реверсу проволоки с требуемыми параметрами ускорения. Для этих целей возможно использование вибрирующих механизмов, обеспечивающих перемещение сварочной горелки в установках автоматического типа.

Более просто воздействовать на перенос капли в сварочную ванну при использовании процесса сварки с короткими замыканиями дугового промежутка. При коротком замыкании цифровое управление процессом сварки понижает силу тока и электродная проволока отводится в обратном направлении до 70 раз в секунду, что понижает теплосодержание капель. Такой процесс иногда называют «холодный перенос металла». Реверс проволоки позволяет получить отрыв только одной капли жидкого металла от плавящейся электродной проволоки.

Возможность снижения тепловложения за счет уменьшения сварочного тока ограничена низкой устойчивостью горения дуги на малых токах и падением производительности процесса. Увеличение скорости плавления электродного металла может быть достигнуто ускорением отрыва капель с торца электрода. Тогда теплота дуги нагревает и плавит сварочную проволоку, непосредственно воздействуя на твердый металл или тонкую жидкую прослойку, а не через каплю жидкого металла. При более частом переносе капель с торца электрода на свариваемый металл снижается температура капель, а также температура сварочной ванны.

Для выявления возможностей воздействия на капли расплавленного металла в момент замыкания с целью ускорения их отрыва с торца электрода путем трансформации модели (см. рис. 1) с учетом выражения (13) получена модель перехода капли в сварочную ванну (рис. 4). При переходе капли в сварочную ванну с короткими замыканиями дугового промежутка равнодействующая сил поверхностного натяжения  $F_{п.н.}$  определяется по формуле:

$$F_{п.н.} = 2\pi\sigma(R_э - R_{зам}), \quad (20)$$

где  $R_{зам}$  – радиус пятна контакта капли со сварочной ванной.

Для оценки величины ускорения, необходимого для создания дополнительных инерционных сил, трансформируем модель, представленную на рисунке 1, с учетом выражения (20).

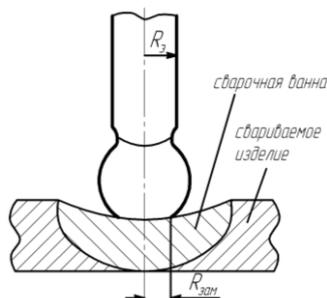


Рис. 4. Переход капли в сварочную ванну с замыканием дугового промежутка ( $R_э$  – радиус электрода;  $R_{зам}$  – радиус пятна контакта капли со сварочной ванной)

Сила  $F_{п.н.}$ , удерживающая каплю на торце электрода, уменьшается по мере роста  $R_э$ , а после достижения условия  $R_э = R_{зам}$  сила  $F_{п.н.}$  меняет знак и при  $R_э < R_э$  способствует переходу капли в ванну. С учетом выражения (13) выражение (8) примет вид:

$$g + a = \frac{2\pi(R_э - R_{зам}) + I^2 \left( k_2 - k_1 \ln \frac{R_к}{R_э} \right)}{m}. \quad (21)$$

Выражение (21) учитывает дополнительное ускорение, которое необходимо придать каплям для их отрыва от торца электрода с заданной частотой. Это ускорение зависит от режима сварки (скорости подачи электрода), диаметра электрода и его плотности.

При  $m = \text{const}$  увеличение диаметра электрода снижает ускорение, необходимое для отрыва капли от торца электрода. Увеличение плотности материала влияет аналогично. Увеличение силы сварочного тока приводит к возрастанию значения ускорения, необходимого для принудительного отрыва капли.

Для облегчения перехода капли в ванну можно временно приостановить подачу электродной проволоки или реверсировать ее подачу. Реализация такой схемы потребует современного оборудования, имеющего механизм подачи с возможностью реверса сварочной проволоки с достаточно высокой частотой, а также цифрового источника питания с обратными связями. При питании от обычного источника постоянного тока с жесткой внешней характеристикой рост тока короткого замыкания приводит к электрическим взрывам отдельных перемычек между электродом и изделием. Это вызывает разбрызгивание металла до 10...20 % от массы плавящейся электродной проволоки и приводит к другим отрицательным последствиям для формирования качественного сварного шва. Поэтому цифровой источник питания должен обеспечивать снижение сварочного тока в период переноса капли вплоть до нуля, определяя момент начала его снижения по изменению сопротивления дугового промежутка.

В процессе сварки без реверсирования сварочной проволоки происходит неполный переход жидкого металла с образовавшейся капли в сварочную ванну. Небольшая часть жидкого металла остается и удерживается на торце электродной проволоки за счет действия сил поверхностного натяжения. При реверсивном воздействии на электродную проволоку действие удерживающих сил преодолевается и весь объем жидкого металла, образовавшийся на торце электродной проволоки, переходит в сварочную ванну, а на торце остается лишь тонкая прослойка жидкого металла.

На рисунке 5 показана зависимость реверсивного ускорения сварочной проволоки, необходимого для отрыва капли с торца электрода, от силы сварочного тока при частоте реверса  $70 \text{ с}^{-1}$  с замыканием дугового промежутка. Для отрыва образующейся капли электродного металла в начальный момент её перехода в сварочную ванну при сварке проволокой на основе меди или алюминия требуются меньшие реверсивные ускорения, чем при сварке проволокой на основе стали. Такие отличия обусловлены различными значениями температур плавления металлов, поверхностного натяжения и отличиями в физических и теплофизических коэффициентах.

На рисунке 6 представлена зависимость реверсивного ускорения сварочной проволоки на основе меди от радиуса пятна замыкания капли при переходе в сварочную ванну при частоте реверса  $70 \text{ с}^{-1}$ , оптимальной для диаметра электродной проволоки  $d_э = 0,8...1,2 \text{ мм}$ .

Зависимости реверсивного ускорения сварочной проволоки на основе железа и алюминия от радиуса пятна замыкания капли при переходе в сварочную ванну имеют аналогичный вид. Отличие состоит в абсолютных значениях ускорений для проволок разного состава.

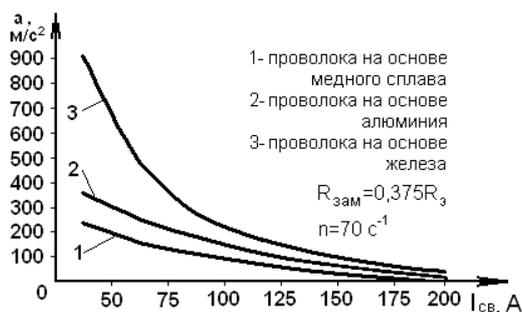


Рис. 5. Реверсивное ускорение сварочной проволоки, необходимое для отрыва капли с торца электрода от силы сварочного тока при частоте реверса 70 с<sup>-1</sup> и переносе с замыканием дугового промежутка

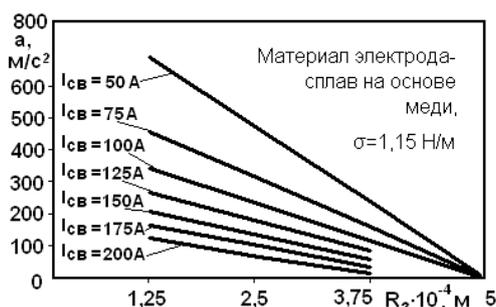


Рис. 6. Зависимость реверсивного ускорения сварочной проволоки на основе меди от радиуса пятна замыкания капли при переходе в сварочную ванну с частотой реверса 70 с<sup>-1</sup>

Для достижения эффекта уменьшения тепловложения в свариваемое изделие желательно осуществление реверса сварочной проволоки в момент замыкания дугового промежутка, когда радиус пятна контакта капли электродного металла со сварочной ванной существенно меньше радиуса электродной проволоки.

Из-за невозможности обеспечения необходимого высокого ускорения в начальный момент перехода капли в сварочную ванну желательно реверсировать проволоку в тот момент перехода капли в сварочную ванну, когда радиус пятна контакта капли электродного металла со сварочной ванной  $R_{зам} = (0,75 \dots 0,95)R_з$ . Этот момент определяется по сопротивлению дугового промежутка. Необходимое ускорение реверса проволоки составляет 10...17g для различных сварочных проволок в зависимости от величины силы сварочного тока и скорости подачи электродной проволоки. Применение реверса сварочной проволоки на основе железа, начиная с  $I_{св} > 150$  А, при сварке проволокой диаметром менее 1 мм не рекомендуется, поскольку собственного веса капли достаточно для перехода в сварочную ванну. Момент реверсирования проволоки определяется по сопротивлению вылета электрода  $R_е$  и сопротивлению зоны контактирования  $R_з$ . Сопротивление вычисляется по формуле:

$$R = R_е + R_з, \tag{22}$$

где  $R_е$  – сопротивление вылета электрода, Ом;  $R_з$  – сопротивление зоны контактирования.

Тогда с учетом

$$R = \frac{l \cdot \rho_{уд}}{F},$$

где  $l$  – длина проводника, м;  $\rho_{уд}$  – удельное электросопротивление проводника, Ом·м;  $F$  – площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>, уравнение (22) запишется в виде:

$$R = \frac{4l_е \rho_{мс}}{\pi d_з^2} + \frac{4l_д \rho_{жс}}{\pi \left( \frac{d_к + d_з}{2} \right)^2}, \tag{23}$$

где  $l_е$  – вылет электрода, м;  $l_д$  – длина дуги, м;  $\rho_{мс}$  – удельное электросопротивление металла проводника в твердом состоянии, Ом·м;  $\rho_{жс}$  – удельное электросопротивление металла проводника в жидком состоянии, Ом·м;  $d_з$  – диаметр электрода, м;  $d_к$  – диаметр капли, м;  $d_з$  – диаметр пятна контакта капли со сварочной ванной, м.

На рисунке 7 показана зависимость сопротивления дугового промежутка от диаметра замыкания капли для различных режимов сварки при частоте реверса  $n = 70 \text{ с}^{-1}$  для проволоки на основе алюминия:  $l_6 = 0,011 \text{ м}$ ;  $l_0 = 0,003 \text{ м}$ ;  $d_3 = 0,001 \text{ м}$ ;  $d_3 = (0,25 \dots 1)d_3$ ;  $d_k$  для рассматриваемых видов проволок рассчитывали ранее, для проволоки на основе стали  $\rho_{Fe}^{мс} = 11 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\rho_{Fe}^{жс} = 135 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; для проволоки на основе меди  $\rho_{Cu}^{мс} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\rho_{Cu}^{жс} = 9,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; для проволоки на основе алюминия  $\rho_{Al}^{мс} = 2,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\rho_{Al}^{жс} = 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

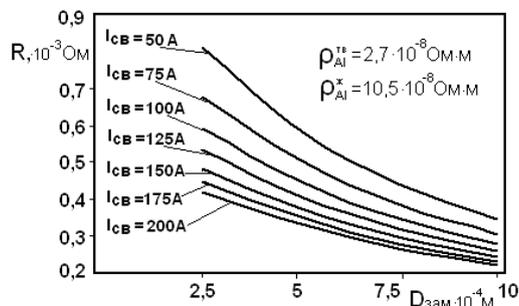


Рис. 7. Зависимость сопротивления дугового промежутка от диаметра замыкания капли для различных режимов сварки при частоте реверса  $n = 70 \text{ с}^{-1}$  для проволоки на основе алюминия

Значения сопротивления дугового промежутка при сварке проволоками на основе железа на порядок отличаются от значений сопротивления дугового промежутка при сварке проволоками на основе меди или алюминия. Это обусловлено высоким по отношению к меди и алюминию значением удельного электрического сопротивления, а также высокой температурой плавления железа.

Важным параметром сварки с обратным перемещением электродной проволоки является величина реверса проволоки и время его воздействия на каплю:

$$S = \frac{at^2}{2}, \quad (24)$$

где  $a$  – ускорение капли от переменной скорости подачи электродной проволоки,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $t$  – время действия реверсивного ускорения,  $\text{с}$ .

Амплитуда перемещений электродной проволоки не имеет фиксированного заданного значения и устанавливается цифровым управлением. Значение реверса находится в интервале  $0,1 \dots 1 \text{ мм}$  и изменяется в зависимости от режима сварки, а также от физико-механических свойств материала применяемой проволоки и значения коэффициента поверхностного натяжения. Тогда время воздействия ускорения

$$t = \sqrt{\frac{2S}{a}}. \quad (25)$$

Метод реверсирования реализован в сварочном оборудовании австрийской фирмы «Fronius», рекомендуемом для сварки тонколистовой стали, оцинкованной стали, металла с покрытиями, а также алюминиевых и хромоникелевых сплавов.

**Выводы.** Определены основные параметры силового воздействия электромагнитными силами на каплю жидкого металла для управления его переносом: величина тока в импульсе и длительность импульса. Полученные значения параметров коррелируют с экспериментально определенными режимами сварки. Параметры инерционного и электромагнитного воздействия на капли электродного металла использованы для рационального выбора сварочного оборудования при различных условиях сварки сталей, в том числе сталей с защитными покрытиями, а также и алюминиевых сплавов.

Управление частотой переноса капель расплавленного металла в сварочную ванну может быть осуществлено за счет воздействия инерционных сил, возникающих при изменении скорости подачи электродной проволоки вплоть до реверса. Для обеспечения частоты переноса капель  $60 \dots 80 \text{ }^1/\text{с}$  при дуговой сварке стали с цинковым покрытием плавящимся электродом из медного сплава величина ускорения капли должна составлять  $10 \dots 12g$ , а при сварке электродом из алюминиевого сплава –  $15 \dots 17g$ .

Величина реверса и амплитуда вибраций не оказывают влияния на устойчивость горения дуги и являются допустимыми колебаниями ее длины. При частоте переноса капель  $60 \dots 80 \text{ }^1/\text{с}$  необходимая для отрыва капель величина реверса  $S$  составляет  $0,1 \dots 1 \text{ мм}$ , что является допустимой величиной для дуги длиной  $2 \dots 4 \text{ мм}$  при диаметре электрода  $0,8 \dots 1,2 \text{ мм}$ .

Определенные значения ускорений для обеспечения управляемого переноса могут быть реализованы различными техническими средствами: приводами на основе шаговых двигателей; приводами с

тонкими печатными роторами; волновыми, высокодинамичными двигателями переменного тока с приводами безроликового типа и др. Полученным расчетным параметрам силового воздействия на каплю электродного металла для ее принудительного отрыва в большей степени соответствует сварочная установка Trans Puls Synergic 2700 фирмы Fronius (Австрия). Оборудование позволяет обеспечить возможность воздействия реверсивным ускорением электродной проволоки, наложением токов импульсов по отдельности или в сочетании с реверсом проволоки. Определенные параметры импульсно-дуговой сварки реализуются на оборудовании фирм Lincoln Electric, ESAB, Kemppi, Merkle и др.

Методы воздействия электромагнитными или инерционными силами достаточно эффективны и обеспечивают устойчивое протекание процесса при минимальной мощности дуги 500...600 Вт. Сварка на малой мощности с управляемым переносом инерционными силами обеспечивает качественное соединение оцинкованной стали малой толщины (0,5...1,0 мм) и сохранение цинкового покрытия рядом со швом на основе алюминия. Электромагнитное управление переходом электродного металла эффективно при сварке оцинкованных сталей и алюминия в широком диапазоне режимов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Потапьевский, А.Г. Особенности сварки плавящимся электродом коротких швов в защитных газах / А.Г. Потапьевский // Сварщик. – 2008. – № 2(60). – С. 20 – 25.
2. Пономарев, В.А. Процессы в дуге и перенос электродного металла при сварке Mig/Mag / В.А. Пономарев. – Киев: КПИ, Межотраслевой учебно-аттестационный центр ИЭС им. Е.О. Патона, 2002. – 76 с.
3. Matusiak, J. Сварка и пайко-сварка материалов и элементов, чувствительных к теплоте, низкоэнергетичными методами Mig/Mag / J. Matusiak, B. Czworong, T. Pfeifer // Сварщик. – 2008. – № 4(62). – С. 29 – 31.
4. Дятлов, В.М. Элементы переноса электродного металла при дуговой сварке / В.М. Дятлов // Новые проблемы сварочной техники. – Киев: Техніка, 1964. – С. 183 – 193.
5. Лебедев, В.А. Математическая модель формирования капель электродного металла при механизированной дуговой сварке с импульсной подачей электродной проволоки / В.А. Лебедев // Сварочное производство. – 2008. – № 7. – С. 10 – 14.
6. Теория сварочных процессов / под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1988. – 559 с.
7. Теория сварочных процессов: учеб. для вузов / под ред. В.М. Неровного. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.
8. Черный, О.М. Электродуговая сварка: практика и теория / О.М. Черный. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 202 с.
9. Павлюк, С.К. Закономерности процесса повреждения и разрушения цинкового покрытия на стали при сварке плавлением и дуговой пайке / С.К. Павлюк, А.В. Лупачёв, Ю.А. Цумарев // Вестн. Белорусско-Российского ун-та. – 2008. – № 2(19). – С. 76 – 84.
10. Потапьевский, А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Сварка в активных газах / А.Г. Потапьевский. – 2-е изд., перераб. – Киев: Екотехнология, 2007. – Ч. 1. – 192 с.
11. Крампит, Н.Ю. Способы управления плавлением и переносом электродного металла (обзор) / Н.Ю. Крампит // Сварочное производство. – 2009. – № 3. – С. 31 – 36.

Поступила 15.09.2009

#### POWER INFLUENCE ON DROPS OF ELECTRODE METAL FOR MANAGEMENT OF THEIR TRANSITION IN WELDING THE BATH AT WELDING OF THE ZINCED STEELS

S. PAVLUK, A. LUPACHEV

*The mathematical model of influence of equally effective forces on a drop of electrode metal is developed at its transition from an electrode end face in welding bath. On the basis of model the basic forces influencing drops of electrode metal for management by their transition in welding a bath at welding of zincated steels are revealed. Management of frequency of carrying over of drops of the fused metal in welding bath can be carried out electrodynamic forces by influence by impulses welding current and the inertial forces arising at change of speed of giving of an electrode wire up to its stop or a backspacing. Sizes of the forces operating on a drop of electrode metal, drops providing a separation from an end face of an electrode and transition in welding bath are defined. Quantitative values of sizes of key parameters of process of welding are established. The mechanised puls-arc welding in protective gases on modern welding equipment providing steady burning of an arch of low power with operated carrying over of drops of electrode metal by inertial forces, and also optimisation of parameters of process of welding, allow to receive qualitative connection of the zincated steel of a small thickness and to keep a protective zinc covering near to a seam on the basis of an aluminium alloy.*