

УДК 621.791.754:51-74

И.В. Пентегов, д-р техн. наук

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

С.В. Рымар, д-р техн. наук

В.Н. Сидорец, д-р техн. наук

О.И. Петриенко, канд. техн. наук

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

РАСПЛАВЛЕНИЕ ПОКРЫТОГО СВАРОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ С КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ

Рассмотрено влияние пространственного расположения и коротких замыканий на расплавление покрытого сварочного электрода при дуговой сварке переменным и постоянным (выпрямленным) током. Учен теплообмен между электродом и окружающей средой. Исследованы зависимости коэффициента расплавления покрытого сварочного электрода от параметров процесса дуговой сварки сталей.

Ключевые слова: дуговая сварка сталей, расплавление покрытого сварочного электрода.

Розглянуто вплив просторового розташування та коротких замикань на розплавлення покритого зварювального електрода при дуговому зварюванні змінним і постійним (випрямленим) струмом. Врахований теплообмін між електродом і навколишнім середовищем. Досліджені залежності коефіцієнта розплавлення покритого зварювального електрода від параметрів процесу дугового зварювання сталей.

Ключові слова: дугове зварювання сталей, розплавлення покритого зварювального електрода.

Effect of the space arrangement and short circuits on melting-down of the coated welding electrode is considered at an arc alternating-current welding and by the direct-current (rectified) welding. Heat interchange between an electrode and a circumambient is considered. Dependences of factor of melting-down of the coated welding electrode on parameters of process of an arc welding of steels are investigated.

Key words: an arc welding of steels, melting-down of the coated welding electrode.

Постановка проблемы. Актуальность исследований продиктована приоритетными направлениями повышения технологической, энергетической и экономической эффективности сварочных процессов, в частности проблемам плавления покрытого сварочного электрода при дуговой сварке сталей. Статья продолжает исследования, начатые авторами в работах [1; 2], касающиеся определения факторов, оказывающих влияние на скорость плавления покрытого сварочного электрода при сварке металлов, а так же учет этих факторов в методиках расчета коэффициента расплавления электрода.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблемам плавления электрода при сварке металлов посвящено большое количество публикаций, наиболее значимые из которых работы [3-5]. В основу многих методик расчета параметров, оказывающих влияние на процесс сварки и плавление электрода, положены экспериментальные зависимости, или аналитические формулы, использующие параметры, которые так же базируются на экспериментальных данных, что затрудняет процесс исследования.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В проделанных ранее авторами исследованиях не рассматривался сварочный процесс при наличии коротких замыканий.

Целью статьи является дальнейшее развитие созданной авторами аналитической методики расчета коэффициента расплавления покрытого сварочного электрода, опубликованной в работах [1; 2]. Необходимо учесть такие характеристики, как вид сварочного тока (переменный, постоянный), наличие коротких замыканий в процессе сварки, величину тока короткого замыкания, а так же расположение электрода в пространстве, теплообмен между электродом и окружающей средой, полярность постоянного сварочного тока. Методика должна упростить анализ процессов, происходящих при ручной дуговой сварке сталей покрытыми сварочными электродами и уменьшить применение эмпирических зависимостей, по сравнению с известными методиками.

Изложение основного материала. Плавление электрода при дуговой сварке происходит за счет нагрева металла электрода дугой от температуры окружающей среды T_{oc}

до температуры капли $T_{кап}$. Основной характеристикой плавления электрода является массовая скорость плавления (производительность) G_p , измеряемая массой расплавленного металла электрода в единицу времени (кг/с) [1-5]. Коэффициент расплавления электрода α_p , имеющий размерность кг/(с·А), в первом приближении прямо пропорционален массовой скорости плавления G_p и обратно пропорционален току сварки I_{sv} :

$$\alpha_p = G_p / I_{sv}, \quad (1)$$

причем по показанию амперметра сварочный ток I_{sv} имеет среднее значение I_{sr} при сварке постоянным (выпрямленным) током и эффективное (действующее) значение I_{eff} – при сварке переменным током. Это различие связано с измерением переменного и постоянного тока приборами разных систем, которые, обычно, при переменном токе показывают эффективное значение, а при постоянном токе – среднее значение, что приводит также к различиям в значениях α_p . Эта двойственность определения коэффициента расплавления электрода сложилась исторически, и мы не будем вносить изменения в данное определение.

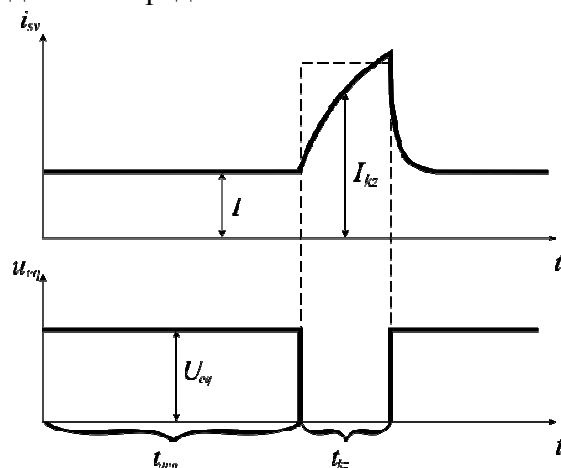


Рис. 1. Зависимости тока в электроде i_{sv} и эквивалентного напряжения дуги u_{eq} от времени t при сварке постоянным током с короткими замыканиями

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены зависимости тока в электроде i_{sv} и эквивалентного напряжения дуги u_{eq} [1; 2] от времени t при сварке постоянным током с короткими замыканиями. На рис. 1 даны обозначения: I – значение тока в электроде, когда нет короткого замыкания (его можно считать постоянной величиной); I_{kz} – ток в электроде во время короткого замыкания; t_{dug} – усредненная длительность непрерывного горения дуги; t_{kz} – усредненная длительность короткого замыкания; U_{eq} – эквивалентное напряжение дуги на интервале времени t_{dug} , при представлении дуги как противо-ЭДС. На интервале времени короткого замыкания t_{kz} дуга отсутствует и напряжение $U_{eq} = 0$. Напряжение U_{eq} является расчетной величиной и вычисляется по формулам (3) работы [1] при сварке постоянным (выпрямленным) током на обратной полярности (наиболее распространенное подключение, когда положительный полюс – анод подключается к электроду) и на прямой полярности (когда к электроду подключается отрицательный полюс – катод), и по формуле (10) работы [1] в случае сварки переменным током. Как правило, при обратной полярности $U_{eq} = 7,4 \dots 9,2$ В, при сварке на прямой полярности $U_{eq} = 7,1 \dots 8,6$ В.

За период сварки интервалы времени горения дуги и времени коротких замыканий постоянно изменяются. Характер их изменений – стохастический. Показаний амперметра при этом недостаточно. Нужно использовать измерительные приборы, позволяющие сохранять в цифровом виде мгновенные значения тока за весь период сварки для их последующей компьютерной обработки и вычисления усредненных значений тока I и I_{kz} , и усредненных или суммарных длительностей интервалов времени t_{dug} и t_{kz} . Усредненная частота коротких замыканий в этом случае будет равна: $f_{kz} = 1 / (t_{dug} + t_{kz})$.

Определим ряд коэффициентов. Коэффициент кратности тока короткого замыкания: $k_{kz} = I_{kz} / I$. Обычно значения коэффициента k_{kz} в источниках питания для ручной дуговой сварки покрытыми электродами лежат в диапазоне $1,2 \dots 2,0$. Коэффициент, учитывающий долю времени короткого замыкания: $k_{t,kz} = f_{kz} t_{kz} = t_{kz} / (t_{dug} + t_{kz}) = 1 / (1 + t_{dug} / t_{kz})$. При рассматриваемом виде сварки интервал времени короткого замыкания, как правило, не превосхо-

дит 20 %, а інтервал времени горения дуги составляет не менее 80 % (при отсутствии коротких замыканий эти интервалы будут соответственно равны 0 и 100 %). Значения соотношения этих временных интервалов будет лежать в диапазоне $t_{dug}/t_{kz} = 4 \dots \infty$, а диапазон изменения значений коэффициента $k_{t,kz} = 0 \dots 0,2$.

Среднее значение тока при сварке постоянным (выпрямленным) током при наличии коротких замыканий равно:

$$I_{sv} = I_{sr} = I \cdot (1 - f_{kz} t_{kz}) + I_{kz} f_{kz} t_{kz} = I \cdot [1 + (k_{kz} - 1) f_{kz} t_{kz}] = I \cdot [1 + (k_{kz} - 1) k_{t,kz}]. \quad (2)$$

Разделим левую и правую часть уравнения (2) на площадь поперечного сечения электрода $\pi d_e^2/4$. Получим выражение для определения среднего значения плотности тока в электроде при сварке постоянным (выпрямленным) током при наличии коротких замыканий, в виде функции, зависящей от переменных j , k_{kz} и $k_{t,kz}$:

$$j_{sr}(j, k_{kz}, k_{t,kz}) = j \cdot [1 + (k_{kz} - 1) k_{t,kz}], \quad (3)$$

где j – среднее значение плотности тока в электроде при отсутствии коротких замыканий, равное $j = 4I/(\pi d_e)^2$.

Так же как и для постоянного тока обозначим для переменного тока через I – эффективное значение тока в электроде, когда нет короткого замыкания, а через I_{kz} – эффективное значение тока в электроде во время короткого замыкания.

При сварке переменным током, а также в случае расчета нагрева электрода (тепло-выделения в электроде) при сварке постоянным (выпрямленным) током эффективное значение тока сварки с короткими замыканиями будет равно:

$$I_{sv} = I_{eff} = \sqrt{I^2(1 - f_{kz} t_{kz}) + I_{kz}^2 f_{kz} t_{kz}} = I \sqrt{1 + (k_{kz}^2 - 1) f_{kz} t_{kz}} = I \sqrt{1 + (k_{kz}^2 - 1) k_{t,kz}}. \quad (4)$$

В этом случае, по аналогии с формулой (3), запишем выражение по определению эффективного значения плотности тока в виде:

$$j_{eff}(j, k_{kz}, k_{t,kz}) = j \sqrt{1 + (k_{kz}^2 - 1) k_{t,kz}}. \quad (5)$$

Здесь j – эффективное значение плотности тока в электроде при отсутствии коротких замыканий, равное $j = 4I/(\pi d_e)^2$, где I значение тока на интервале времени горения дуги.

При более детальном рассмотрении можно показать, что величина коэффициента расплавления α_p сложным образом зависит от времени сварки, характера сварочного тока I_{sv} , его величины и полярности, а также от температуры капли T_{kap} .

Запишем формулу для определения времени t нагрева электрода проходящим током I_{eff} , от температуры окружающей среды T_{oc} , до температуры предварительного нагрева электрода T_0 , полученную из дифференциального уравнения теплового баланса (см. формулу (2) работы [2]), в виде функции от температуры T_0 и эффективного значения плотности тока j_{eff} :

$$t(T_0, j_{eff}) = \frac{\gamma}{j_{eff}^2} \int_{T_{oc}}^{T_0} \frac{C_p(T)}{\rho(T)} dT + \Delta t(T_0, j_{eff}), \quad (6)$$

где γ – плотность стали; C_p – удельная теплоемкость стали, являющаяся функцией температуры электрода T [6; 7]; ρ – удельное электрическое сопротивление металла электрода, так же являющееся функцией температуры T [6-8]; Δt – дополнительное время, затрачиваемое на фазовые превращения железа:

$$\Delta t(T_0, j_{eff}) = \frac{\gamma}{j_{eff}^2} \sum_{i=2}^k \frac{\lambda_{Ai}}{\rho(T_i)}, \quad (7)$$

где λ_{Ai} – удельные теплоты фазовых превращений железа, см. рис. 1 работы [1] и формулу (23) работы [2]; i – порядковый номер, $i = 2 \dots k$, где $k = 2$ при $T_2 \leq T_0 < T_3$, $k = 3$ при $T_3 \leq T_0 < T_4$, $k = 4$ при $T_4 \leq T_0 < T_5$, $k = 5$ при $T_5 \leq T_0$; T_i – температуры фазовых превращений.

В работе [2] были получены формулы (14) и (17), учитывающие критерии подобия Грасгофа, Прандтля и Нуссельта для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи с поверхности α_k соответственно для горизонтально и вертикально расположенного электрода при естественном охлаждении. Аппроксимационная зависимость, которая позволяет определять значения этого коэффициента для произвольного расположения электрода в зависимости от температуры поверхности покрытия электрода T_2 , диаметра электрода d_e и угла φ , имеет вид:

$$\alpha_k(T_2, d_e, \varphi) = \alpha_{k,v}(T_2) \sin^2 \varphi + \alpha_{k,g}(T_2, d_e) \cos^2 \varphi, \quad (8)$$

где $\alpha_{k,v}$, $\alpha_{k,g}$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхности электрода при его горизонтальном и вертикальном расположении; φ – угол наклона электрода, $\varphi = 0 \dots 90^\circ$. При $\varphi = 0^\circ$ электрод расположен горизонтально, при $\varphi = 90^\circ$ электрод расположен вертикально. С увеличением угла φ коэффициент α_k будет плавно уменьшаться от наибольшего значения, когда электрод расположен горизонтально, при $\varphi = 0^\circ$, до наименьшего значения, когда электрод расположен вертикально, при $\varphi = 90^\circ$. Далее все процессы рассмотрены при естественном охлаждении электрода.

При этом формула (6) приобретает вид:

$$t(T_0, j_{eff}, d_e, \varphi) = \gamma \int_{T_{oc}}^{T_0} \frac{C_p(T_1)}{j_{eff}^2 \rho(T_1) - \frac{4}{d_e} \left(1 + \frac{2\Delta}{d_e}\right) p_{e2}[T_2(T_1, d_e, \varphi), d_e, \varphi]} dT_1 + \Delta t(T_0, j_{eff}). \quad (9)$$

Здесь p_{e2} – удельная мощность, Вт/м², рассеиваемая с поверхности электрода в окружающую среду конвекцией и излучением:

$$p_{e2}(T_2, d_e, \varphi) = \alpha_k(T_2, d_e, \varphi) \cdot (T_2 - T_{oc}) + k_\sigma \sigma \cdot (T_2^4 - T_{oc}^4), \quad (10)$$

где k_σ – безразмерный коэффициент степени черноты поверхности (покрытия) электрода; σ – постоянная Стефана-Больцмана для излучения с поверхности электрода [2].

Формула (9) позволяет определить время t нагрева электрода проходящим током от температуры окружающей среды T_{oc} до температуры предварительного нагрева электрода T_0 , при учете конвекции и теплоизлучения (см. формулы (4) и (18) работы [2]).

Для определения температуры T_2 в пакете MathCAD [9] запишем уравнение (см. уравнение (21) работы [2]):

$$T_2(T_1, d_e, \varphi) = \text{root} \left[T_1 - \theta - \frac{d_e + 2\Delta}{2\lambda} \ln \left(1 + \frac{2\Delta}{d_e} \right) p_{e2}(\theta, d_e, \varphi), \theta \right], \quad (11)$$

где root – функция пакета MathCAD, позволяющая решить уравнение

$$T_1 - \theta - \frac{d_e + 2\Delta}{2\lambda} \ln \left(1 + \frac{2\Delta}{d_e} \right) p_{e2}(\theta, d_e, \varphi) = 0$$

относительно температуры θ ; λ – коэффициент теплопроводности покрытия электрода, $\lambda = 2,04$ Вт/(м·К).

Подставляя значения функции $T_2(T_1, d_e, \varphi)$ в выражение (9), можно определить время нагрева электрода сварочным током от температуры T_{oc} до T_0 при непрерывном процессе сварки.

Отметим, что нагрев электрода проходящим током отражается на величине температуры предварительного нагрева электрода T_0 , а это в свою очередь приводит к изменению коэффициентов расплавления и испарения.

Характер изменения зависимостей времени нагрева электрода t от температуры T_0 , вычисляемый по формуле (9), аналогичен характеру изменения зависимостей, представленных на рис. 2 работы [2].

Уравнение (9) дает возможность решить обратную задачу – найти температуру нагрева электрода T_0 за время сварки t_{sv} . Для этого запишем обратную функцию, которая в пакете MathCAD имеет вид (см. формулу (24) работы [2]):

$$T_0(t_{sv}, j_{eff}, d_e, \varphi) = \text{root}[t_{sv} - t(\theta, j_{eff}, d_e, \varphi), \theta], \quad (12)$$

что позволяет выразить долю испаряемого металла ξ по уравнению (9) работы [1] как функцию от t_{sv} , j_{eff} , d_e и φ (см. формулу (25) работы [2], которая использует представление В.И. Дятлова [10] о том, что величина ξ обратно пропорциональна всей энергии, которую необходимо вложить в электрод для его испарения, включая и скрытую теплоту парообразования, и прямо пропорциональна энергии, требуемой для плавления электрода):

$$\xi(t_{sv}, j_{eff}, d_e, \varphi) = \frac{\int_{T_0(t_{sv}, j_{eff}, d_e, \varphi)}^{T_{pl}} C_p(\theta) d\theta + \sum_{i=k}^5 \lambda_{Ai}}{\int_{T_0(t_{sv}, j_{eff}, d_e, \varphi)}^{T_{dug}} C_p(\theta) d\theta + \sum_{i=k}^5 \lambda_{Ai} + r}, \quad (13)$$

где T_{pl} – температура плавления металла; i – порядковый номер, $i = k \dots 5$, где $k = 2$ при $T_0 \leq T_2$, $k = 3$ при $T_2 < T_0 \leq T_3$, $k = 4$ при $T_3 < T_0 \leq T_4$, $k = 5$ при $T_4 < T_0 \leq T_5$; T_{dug} – температура дуги. Величина ξ при дуговой сварке, согласно исследованиям А.В. Петрова [11], составляет около 9...10 % и не зависит от величины сварочного тока.

Запишем в упрощенном виде формулу (13) для нахождения значений коэффициента ξ , учитывающего долю испаряемого электродного металла в процессе сварки в зависимости от температуры предварительного нагрева электрода T_0 :

$$\xi(T_0) = \frac{\int_{T_0}^{T_{pl}} C_p(\theta) d\theta + \sum_{i=k}^5 \lambda_{Ai}}{\int_{T_0}^{T_{dug}} C_p(\theta) d\theta + \sum_{i=k}^5 \lambda_{Ai} + r}. \quad (14)$$

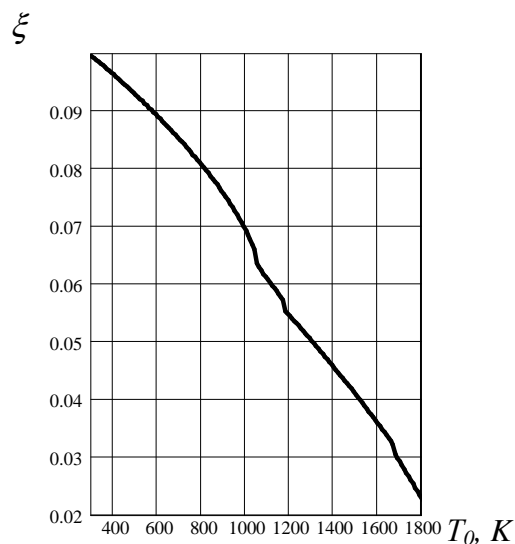


Рис. 2. Зависимости значений коэффициента ξ учитывающего долю испаряемого электродного металла в процессе сварки, в зависимости от температуры предварительного нагрева электрода T_0

По формуле (14) на рис. 2 построена зависимость значений коэффициента ξ от температуры T_0 , изменяющейся в диапазоне 300...1800 К. Из рисунка видно, что с ростом температуры нагрева электрода T_0 доля испаряемого металла ξ уменьшается с 10 % до 2,7 %. При ручной дуговой сварке в диапазоне температур нагрева электрода $T_0 = 300 \dots 700$ К, величина ξ уменьшается от 10 % до 8 %, что очень близко к данным, полученным А.В. Петровым. При наличии коротких замыканий или интенсивных и мощных импульсов тока при импульсно-дуговой сварке температура электрода может возрастать выше $T_0 = 700$ К и значения коэффициента ξ будут снижаться ниже 8 %. Если предположить, что время коротких замыканий настолько велико или импульсы тока столь интенсивны, что электрод нагреется до температуры, близкой к температуре плавления, величина ξ приблизится к значению 2,7 %. Для стального

электрода значения будут несколько отличаться от полученных данных. Отметим, что для точного нахождения значений удельных теплот λ_{Ai} необходимо использовать диаграмму фазовых превращений металла, применяемого в качестве материала электрода. Здесь и далее изломы на графиках связаны с дискретностью изменения значений суммы λ_{Ai} для чистого железа в формуле (13). Для стали при использовании диаграммы фазовых превращений, резких изломов наблюдаться не будет.

Рассмотрим теперь процессы, происходящие при ручной дуговой сварке переменным током, когда длительность коротких замыканий не превышает 20 % от цикла сварки (наблюдающееся для большинства технологических сварочных режимов) и значении коэффициента $k_{kz} = 1,6$ (когда это не оговорено отдельно). Эти значения близки к значениям большей части сварочных источников питания для ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

Мощность, поступающая от электрической дуги в каплю электродного металла P_1 (см. формулу (22) работы [2]) при представлении дуги как противо-ЭДС, равна:

$$P_1 = \frac{1}{t_{dug} + t_{kz}} \int_0^{t_{dug} + t_{kz}} U_{eq} i(t) dt = U_{eq} \frac{1}{t_{dug} + t_{kz}} \int_0^{t_{dug}} i(t) dt =$$

$$= U_{eq} I \frac{t_{dug}}{t_{dug} + t_{kz}} = U_{eq} I \frac{1}{1 + t_{kz}/t_{dug}} = U_{eq} I (1 - k_{t,kz}). \quad (15)$$

Здесь величина $1 - k_{t,kz}$ представляет собой долю времени горения дуги $1 - k_{t,kz} = 0,8 \dots 1,0$. На интервале времени горения дуги t_{dug} , при представлении дуги как противо-ЭДС, напряжение $U_{eq} = \text{const}$, поэтому оно выносится за знак интеграла. На интервале времени короткого замыкания t_{kz} напряжение $U_{eq} = 0$, поскольку дуга отсутствует.

Удельные затраты тепла, Дж/кг, на расплавление электродного металла с учетом его испарения будут равны (см. знаменатель формулы (26) из работы [2]):

$$q(t_{sv}, T_{kap}, j_{eff}, d_e, \varphi) = (1 - \xi(t_{sv}, j_{eff}, d_e, \varphi_e)) \cdot \left(\int_{T_0(t_{sv}, j_{eff}, d_e, \varphi)}^{T_{kap}} C_p(\theta) d\theta + \sum_{i=k}^5 \lambda_{Ai} \right) +$$

$$+ \xi(t_{sv}, j_{eff}, d_e, \varphi) \cdot \left(\int_{T_0(t_{sv}, j_{eff}, d_e, \varphi)}^{T_{dug}} C_p(\theta) d\theta + \sum_{i=k}^5 \lambda_{Ai} + r \right). \quad (16)$$

Заметим, что величины q и T_0 зависят от эффективного значения плотности тока j_{eff} .

Запишем уравнение для коэффициента расплавления электрода α_p при учете испарения, излучения и конвекции тепла с поверхности капли (см. формулы (22), (23) и (26) из работы [2]), с учетом выражений (1), (13) и (15):

$$\alpha_p = \frac{U_{eq} I (1 - k_{t,kz}) - k_{kap} \frac{\pi d_e^2}{4 I_{sv}} p_2(T_{kap}, d_{kap}, \varphi)}{q(t_{sv}, T_{kap}, j_{eff}, d_e, \varphi)}. \quad (17)$$

Здесь k_{kap} – усредненное значение отношения площади поверхности капли к поперечному сечению электрода; p_2 – удельная мощность, Вт/м², рассеиваемая с поверхности капли в окружающую среду конвекцией и излучением:

$$p_2(T_{kap}, d_{kap}, \varphi) = \alpha_{k,kap}(T_{kap}, d_{kap}, \varphi) \cdot (T_{kap} - T_{oc}) + k_{\sigma,kap} \sigma \cdot (T_{kap}^4 - T_{oc}^4); \quad (18)$$

$k_{\sigma,kap}$ – безразмерный коэффициент степени черноты поверхности капли; d_{kap} – диаметр капли; $\alpha_{k,kap}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности капли, при

расчете которого можно использовать формулу (8), подставляя в нее вместо значений T_2 и d_e соответственно значения T_{kap} и d_{kap} : $\alpha_{k,kap}(T_{kap}, d_{kap}, \varphi) = \alpha_k(T_{kap}, d_{kap}, \varphi)$.

Подставляя в уравнение (17) выражения (2) или (4) с учетом соответственно выражений (3) или (5), преобразовав, получим формулу для определения коэффициента α_p :

– при сварке постоянным (выпрямленным) током:

$$\alpha_p(t_{sv}, U_{eqv}, T_{kap}, j_{sr}, j_{eff}, d_e, \varphi) = \frac{U_{eqv} - \frac{k_{kap}}{j_{sr}} p_2(T_{kap}, d_{kap}, \varphi)}{q(t_{sv}, T_{kap}, j_{eff}, d_e, \varphi)}; \quad (19)$$

– при сварке переменным током:

$$\alpha_p(t_{sv}, U_{eqv}, T_{kap}, j_{eff}, d_e, \varphi) = \frac{U_{eqv} - \frac{k_{kap}}{j_{eff}} p_2(T_{kap}, d_{kap}, \varphi)}{q(t_{sv}, T_{kap}, j_{eff}, d_e, \varphi)}, \quad (20)$$

где U_{eqv} – эквивалентное напряжение дуги, представленное в виде функции, зависящей от коэффициентов k_{kz} и $k_{t,kz}$;

– при сварке постоянным (выпрямленным) током:

$$U_{eqv}(k_{kz}, k_{t,kz}) = U_{eq} \frac{1 - k_{t,kz}}{1 + (k_{kz} - 1)k_{t,kz}}; \quad (21)$$

– при сварке переменным током:

$$U_{eqv}(k_{kz}, k_{t,kz}) = U_{eq} \frac{1 - k_{t,kz}}{\sqrt{1 + (k_{kz}^2 - 1)k_{t,kz}}}. \quad (22)$$

Плавление электрода наступает при больших плотностях тока, когда числитель в выражениях (19) или (20) становится больше нуля (см. выражение (27) работы [2]).

Анализируя формулы (19)-(22), можно заключить, что при отсутствии коротких замыканий, когда $k_{t,kz} = 0$, выражения (21) и (22) принимают свои наибольшие значения, равные напряжению U_{eq} при любых значениях k_{kz} . Значения коэффициента α_p наименьшие в начале процесса сварки, когда температура T_0 невелика и значение q большое, см. формулу (16). По мере нагрева электрода увеличивается T_0 и уменьшается величина q , что приводит к возрастанию коэффициента α_p , выше его начального уровня. При наличии коротких замыканий, выражения (21) и (22) зависят уже от величины числителя $U_{eq}(1 - k_{t,kz})$. При этом значения коэффициента α_p тем больше, чем меньше значения $k_{t,kz}$. При значениях $k_{t,kz} > 0$ и $k_{kz} > 1$, величина α_p с ростом k_{kz} уменьшается в области малых k_{kz} , а затем начинает возрастать, проходя минимум.

Определение значений коэффициента расплавления α_p из выражения (20) позволяет построить его зависимости от времени нагрева электрода t_{sv} переменным током при различных параметрах, приведенные на рис. 3. На рис. 3, а видно, что коэффициент α_p с течением времени нагрева электрода интенсивно возрастает с увеличением диаметра электрода d_e при одной и той же плотности тока j (чем больше d_e , тем больше значение T_0 в знаменателе в выражении (20), и сам знаменатель уменьшается, увеличивая правую часть этого выражения) и α_p так же больше для вертикально расположенного электрода (утолщенные линии), по сравнению с горизонтально расположенным электродом (тонкие линии). При сварке с короткими замыканиями (пунктирные линии), с увеличением времени сварки t_{sv} , значения коэффициента α_p при диаметре электрода $d_e = 5$ мм начинают возрастать и превосходить значения этого коэффициента при сварке без коротких замыканий (сплошные линии).

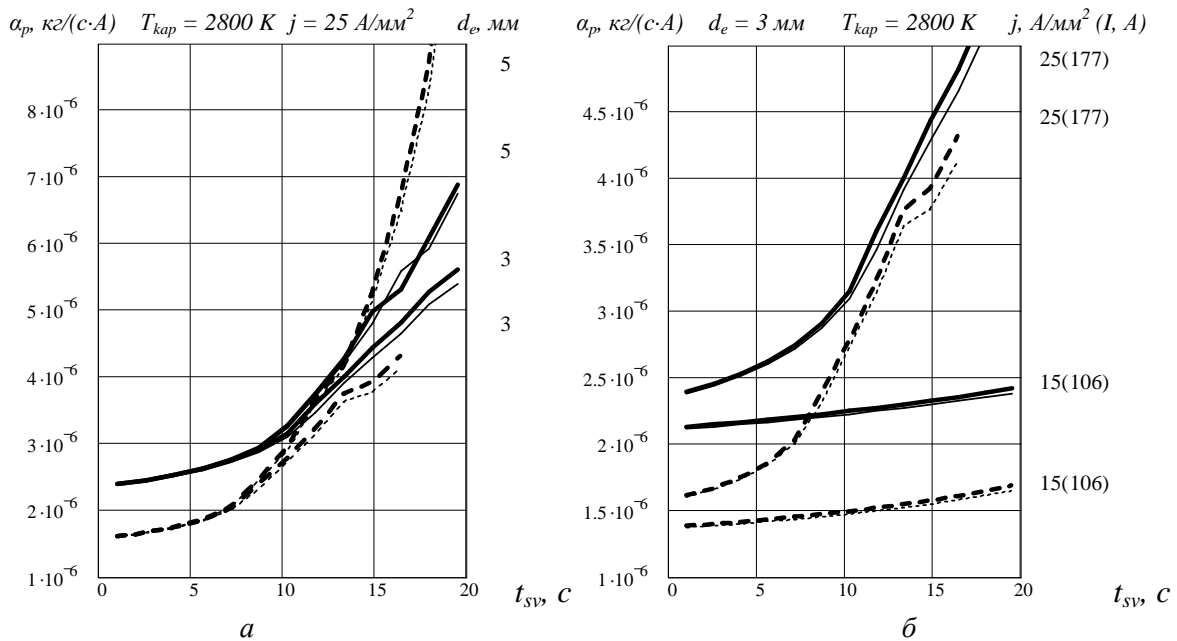


Рис. 3. Зависимости коэффициента расплавления α_p от времени сварки t_{sv} переменным током без коротких замыканий, $k_{t,kz} = 0$, (сплошные линии) и с короткими замыканиями, $k_{t,kz} = 0,2$, (пунктирные линии) при: а – диаметрах электрода $d_e = 3$ и 5 мм при плотности тока в электроде $j = 25$ А/мм², температуре капли $T_{kap} = 2800$ К; б – плотностях тока в электроде j (токах I) = 15 (106) и 25 (177) А/мм² (A) при диаметре электрода $d_e = 3$ мм, температуре капли $T_{kap} = 2800$ К для вертикально (утолщенные линии) и горизонтально (тонкие линии) расположенного электрода, при $k_{kz} = 1,6$

На рис. 3, б показано, что коэффициент α_p с течением времени нагрева электрода увеличивается, причем тем сильнее, чем выше плотность тока j (ток I) в электроде (чем выше j (I), тем меньше значение правой части числителя в выражении (20), и сам числитель увеличивается, увеличивая правую часть этого выражения), и опять же α_p больше для вертикально расположенного электрода (утолщенные линии), по сравнению с горизонтально расположенным электродом (тонкие линии). При сварке с короткими замыканиями (пунктирные линии), с увеличением времени сварки значения коэффициента α_p начинают резко возрастать и при плотности тока в электроде $j = 25$ А/мм² и приближаться к значениям этого коэффициента при сварке без коротких замыканий (сплошные линии).

Запишем выражения для определения длины оплавленной части электрода l за время сварки t_{sv} с использованием формул (19) и (20) и учетом формулы (29) из работы [2]:

– при сварке постоянным (выпрямленным) током:

$$l(t_{sv}, U_{eqv}, T_{kap}, j_{sr}, j_{eff}, d_e, \varphi) = \frac{j_{sr}}{\gamma} \int_0^{t_{sv}} \alpha_p(t, U_{eqv}, T_{kap}, j_{sr}, j_{eff}, d_e, \varphi) dt; \quad (23)$$

– при сварке переменным током:

$$l(t_{sv}, U_{eqv}, T_{kap}, j_{eff}, d_e, \varphi) = \frac{j_{eff}}{\gamma} \int_0^{t_{sv}} \alpha_p(t, U_{eqv}, T_{kap}, j_{eff}, d_e, \varphi) dt. \quad (24)$$

Зависимости (23) и (24) имеют тот же характер, что и зависимости, построенные на рис. 5 работы [2].

На расплавление электрода влияют два основных фактора. Первый фактор – это нагрев капли электрической дугой, увеличивающийся при отсутствии коротких замыканий и уменьшающийся при их наличии, второй фактор – нагрев электрода проходящим током, увеличивающийся при наличии коротких замыканий, и уменьшающийся при их отсутствии. В рассмотренных на рис. 3 случаях значения коэффициента расплавления

электрода α_p больше при отсутствии коротких замыканий (за исключением кривой на рис. 3, а для диаметра электрода $d_e = 5$ мм после $t_{sv} = 14$ с) по сравнению со случаем, когда короткие замыкания характеризуются небольшой кратностью тока короткого замыкания, $k_{kz} \leq 1,6$, поскольку при отсутствии коротких замыканий сварочный процесс непрерывен и происходит постоянный нагрев капли электрической дугой, несмотря на то, что при наличии коротких замыканий возникает более интенсивный нагрев самого электрода. Здесь нагрев капли дугой, то есть первый фактор, является определяющим для коэффициента расплавления электрода α_p . Хотя есть случаи, когда определяющим будет второй фактор, как на рис. 3, а. Рассмотрим это более подробно.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента расплавления электрода α_p от времени сварки t_{sv} при значениях коэффициента, учитывающего долю времени короткого замыкания $k_{t,kz} = 0,2$ и $0,3$, при значениях коэффициента кратности тока короткого замыкания $k_{kz} = 1,0$ (сплошные линии), $k_{kz} = 1,6$ (пунктирные линии), $k_{kz} = 3,5$ (штрихпунктирные линии). Здесь для наглядности приведены более широкие диапазоны значений $k_{t,kz}$ и k_{kz} . При значениях коэффициента $k_{kz} = 1,0$ и $1,6$, коэффициент α_p больше в случае $k_{t,kz} = 0,2$, по сравнению со значениями при $k_{t,kz} = 0,3$, когда кривые в виде пунктирных линий, с течением времени, начинают сближаться. Характерно, что после 20 с сварки пунктирные и сплошные линии пересекаются и коэффициент α_p становится больше для большего значения k_{kz} . Здесь уже вступает в силу второй фактор. При $k_{kz} = 3,5$ сначала коэффициент α_p больше при коэффициенте $k_{t,kz} = 0,2$, по сравнению со значениями при коэффициенте $k_{t,kz} = 0,3$ (штрихпунктирные линии) и определяющим является первый фактор. Однако, в последствие, значения коэффициента α_p становятся больше при коэффициенте $k_{t,kz} = 0,3$, по сравнению со значениями при коэффициенте $k_{t,kz} = 0,2$, и здесь уже так же определяющим становится второй фактор.

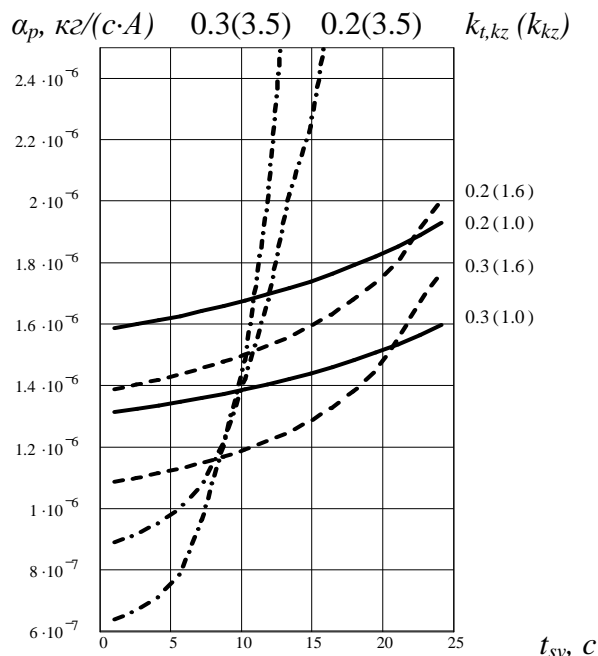


Рис. 4. Зависимости коэффициента расплавления α_p от времени сварки t_{sv} переменным током с короткими замыканиями – $k_{t,kz} = 0,2$ и $0,3$ при: $k_{kz} = 1,0$ (сплошные линии), $k_{kz} = 1,6$ (пунктирные линии), $k_{kz} = 3,5$ (штрихпунктирные линии) для вертикально расположенного электрода диаметром $d_e = 5$ мм, при плотности тока в электроде $j = 15$ А/мм² и температуре капли $T_{кап} = 2800$ К

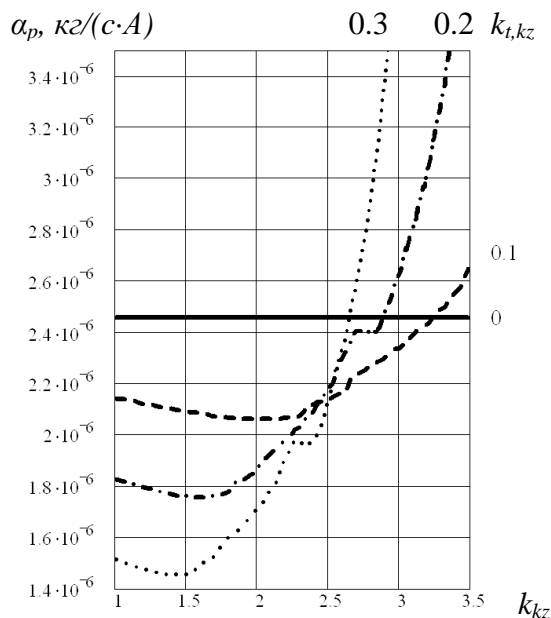


Рис. 5. Зависимости коэффициента расплавления α_p от коэффициента $k_{kz} = 1,0 \dots 3,5$ при сварке переменным током без коротких замыканий $k_{t,kz} = 0$ (сплошная линия) и с короткими замыканиями $k_{t,kz} = 0,1$ (пунктирная линия), $k_{t,kz} = 0,2$ (штрихпунктирная линия), $k_{t,kz} = 0,3$ (точечная линия) в момент времени сварки $t_{sv} = 20$ секунд для вертикально расположенного электрода диаметром $d_e = 5$ мм, при плотности тока в электроде $j = 15$ А/мм² и температуре капли $T_{кап} = 2800$ К

Смена влияния двух факторов хорошо иллюстрируется на рис. 5, на котором приведены зависимости коэффициента расплавления α_p от значений коэффициента кратности тока короткого замыкания $k_{kz} = 1, 0 \dots 3, 5$ при сварке без коротких замыканий $k_{t,kz} = 0$ (сплошная линия) и с короткими замыканиями при $k_{t,kz} = 0, 1$ (пунктирная линия), $k_{t,kz} = 0, 2$ (штрихпунктирная линия), $k_{t,kz} = 0, 3$ (точечная линия) в момент, когда время сварки $t_{sv} = 20$ с. При сварке без коротких замыканий значения коэффициента α_p не зависят от величины k_{kz} . При сварке с короткими замыканиями значение коэффициента α_p с ростом k_{kz} уменьшается в области малых k_{kz} , а затем начинает возрастать, проходя минимум. Этот минимум при $k_{t,kz} = 0, 1$ (пунктирная линия) наступает при $k_{kz} \approx 2, 25$, при $k_{t,kz} = 0, 2$ (штрихпунктирная линия) наступает при $k_{kz} \approx 1, 6$, а при $k_{t,kz} = 0, 3$ (точечная линия) минимум наступает при $k_{kz} \approx 1, 5$. До минимумов определяющим является первый фактор, после минимумов определяющим становится второй фактор.

При сварке постоянным (выпрямленным) током графики будут незначительно отличаться от графиков, приведенных на рис. 3-5.

Дальнейшие исследования процессов нагрева электрода должны быть посвящены подводной сварке.

Выводы. Разработанная методика расчета коэффициента расплавления покрытого электрода при ручной дуговой сварке позволяет получать зависимости этого коэффициента от тока и температуры капли электродного металла с учетом испарения с поверхности капли, подогрева электрода и теплообмена между электродом и окружающей средой посредством теплопроводности через покрытие электрода, конвекции и теплоизлучения с поверхности электрода при наличии или отсутствии коротких замыканий.

Показано, что коэффициент расплавления электрода зависит от режима сварки, вида сварочного тока, длительности непрерывного интервала сварки, окружающей среды, от положения электрода в пространстве, наличия или отсутствия коротких замыканий, от кратности тока короткого замыкания, что может приводить к появлению различий в характеристиках сварного шва.

На расплавление электрода влияют два основных фактора. Первый фактор – это нагрев капли электрической дугой, увеличивающийся при отсутствии коротких замыканий и уменьшающийся при их наличии, второй фактор – нагрев электрода проходящим током, увеличивающийся при наличии коротких замыканий и уменьшающийся при их отсутствии.

При наличии коротких замыканий тепловое воздействия дуги на каплю расплавленного металла электрода уменьшается, ввиду периодических замыканий дугового промежутка, при этом уменьшается испарение металла с капли электрода. При больших кратностях тока короткого замыкания сварочного источника питания и значительным суммарным временем коротких замыканий может наблюдаться недопустимый уровень нагрева электрода проходящим током.

Список использованных источников

1. Пентегов И. В. К аналитическому определению коэффициента расплавления при дуговой сварке сталей / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, О. И. Петриенко, А. М. Жерносеков // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки” : науковий збірник / Черніг. держ. технол. ун-т. – 2012. – № 2 (57). – С. 89-96.
2. Пентегов И. В. Изменение коэффициента расплавления покрытого сварочного электрода в процессе его нагрева и плавления при дуговой сварке сталей без коротких замыканий / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, С. В. Рымар, О. И. Петриенко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки” : науковий збірник / Черніг. держ. технол. ун-т. – 2012. – № 3 (59). – С. 110-120.
3. Фролов В. В. Теоретические основы сварки / В. В. Фролов, В. А. Винокуров, В. Н. Волченко [и др.]. – М. : Высш. школа, 1970. – 592 с.
4. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.

5. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
6. *Гудремон Э.* Специальные стали / Э. Гудремон. – М. : Metallurgia, 1966. – Т. 1. – 736 с.
7. *Пентегов И. В.* Метод расчета падения напряжения по длине вылета электрода с учетом нелинейности теплофизических параметров / И. В. Пентегов, О. И. Петриенко // Автоматическая сварка. – 2002. – № 4. – С. 30-33.
8. *Петров Г. Л.* Теория сварочных процессов (с основами физической химии) : учебник для ВУЗов / Г. Л. Петров, А. С. Тумарев. – М. : Высш. школа, 1977. – 392 с.
9. *Кирьянов Д. В.* MathCAD 14 / Д. В. Кирьянов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.
10. *Дятлов В. И.* Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке / В. И. Дятлов // Новые проблемы сварочной техники : сб. статей. – К. : Техника, 1964. – С. 167-182.
11. *Петров А. В.* Перенос металла в дуге при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов / А. В. Петров // Автоматическая сварка. – 1955. – № 2. – С. 26-33.