



РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УДАЛЕНИЕ КАПЛИ С ТОРЦА ЭЛЕКТРОДА, ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ, д-р техн. наук, М. В. МИРОНОВА, инж. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Разработана математическая модель процесса удаления капли с торца электрода при дуговой наплавке в продольном магнитном поле. Показано, что для ее удаления торца электрода при определенном значении радиальной компоненты индукции в зоне капли необходим импульс поля соответствующей длительности.

Ключевые слова: дуговая наплавка, продольное магнитное поле, оптимальные параметры, расчетная модель, коэффициент расплавления проволоки

Как следует из работ [1–3], при дуговой наплавке с воздействием продольного магнитного поля (ПРМП) значительно повышается коэффициент расплавления электрода, а вследствие этого, производительность процесса наплавки. Это связано с уменьшением размеров электродных капель в осевом направлении при вращении их под воздействием ПРМП и улучшением условий передачи тепла дуги торцу плавящегося электрода [3, 4]. В работе [5] расчетным путем определено значение только одной интегральной электромагнитной силы (силы Лоренца), обуславливающей вращение капли вокруг продольной оси электрода. На наш взгляд, необходим расчетный метод, учитывающий действие на каплю и других сил, которые возникают в капле либо воздействуют на нее при дуговой наплавке в ПРМП, что позволит обоснованно выбрать параметры ПРМП, обеспечивающие удаление капель с торца электрода, и повысить производительность процесса наплавки. Настоящая работа посвящена решению этой задачи.

Из работы [6] следует, что вращение капли на торце электрода из ферромагнитных материалов при дуговой наплавке (сварке) с воздействием ПРМП обусловлено электромагнитными силами в металле капли, возникающими от взаимодействия радиальной компоненты индукции ПРМП с осевой компонентой плотности тока в капле. Исходя из работы [7], радиальной компонентой плотности тока в капле можно пренебречь. Поэтому в расчетах учитываем указанные компоненты индукции ПРМП и плотность тока в капле.

При решении задачи учитываем, что для режимов, используемых при наплавке [8–10], максимальный диаметр капли не превышает диаметра

электрода и капля к моменту отрыва имеет вид полусферы.

Для решения указанной задачи воспользуемся методом баланса интегральных сил, целесообразность использования которого для решения таких задач обоснована в работе [11].

Исходим из того, что при дуговой наплавке с воздействием ПРМП капля удаляется с торца электрода, если при вращении ее вокруг оси (вертикальной, совпадающей с осью электрода) нарушается равновесие сил. Учитываем действие четырех сил — поверхностного натяжения $F_{\text{п.н.}}$, центробежных $F_{\text{цб}}$, электромагнитных сил (объемных) от воздействия ПРМП $F_{\text{эм}}$ и электромагнитных F_r (объемных, сжимающих каплю в радиальном направлении), которые возникают в капле при протекании в ней тока наплавки.

Примем, что на плоском торце цилиндрического электрода жидкая капля имеет форму полусферы, у которой в горизонтальной плоскости (ортогональной к оси электрода) главный радиус кривизны равен радиусу электрода ($r_1 = d_3/2$), а в любой плоскости, проходящей через вертикальную ось z , главный радиус кривизны $r_2 = r_1$ (рис. 1, а). Выделим элемент слоя жидкой капли высотой h , примыкающей к твердому плоскому торцу электрода радиусом $r_1 = d_3/2$ в виде сектора с углом φ (рис. 1, б).

Как показали предварительные расчеты (оценки), максимальные значения сил трения между жидкой вращающейся каплей и твердой поверхностью торца электрода S_1 , а также сил трения между участками жидкости (в случае отрыва этого участка) по поверхностям S_2 , препятствующие движению (вращению) капли или отрыву выделенного участка капли с углом φ (рис. 1, б) пренебрежимо малы по сравнению с другими силами, действующими на каплю. В связи с этим учитываем действие сил $F_{\text{п.н.}}$, $F_{\text{цб}}$, $F_{\text{эм}}$ и F_r (рис. 1,

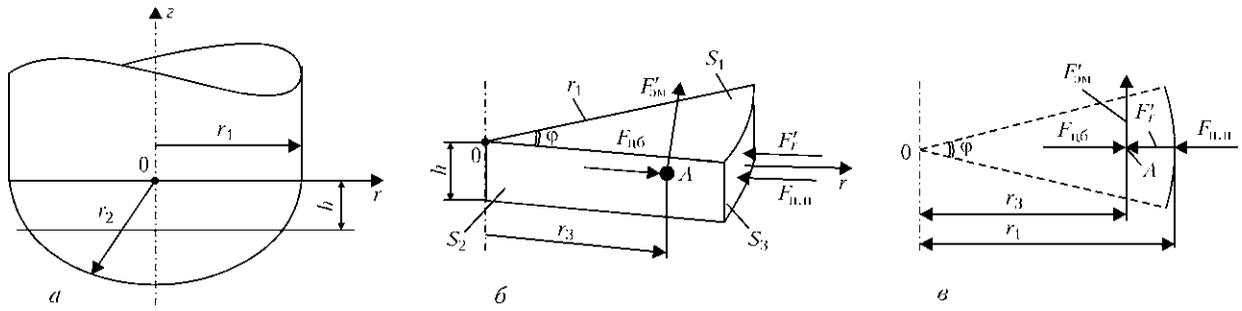


Рис. 1. Расчетная схема для вращения жидкой капли при наплавке с воздействием ПРМП (объяснения см. в тексте)

б), под действием которых находится выделенный участок (элемент) жидкой капли.

Целью расчета является определение такого уровня индукции B_r в зоне выделенного участка капли, при котором произойдет отрыв участка в направлении радиуса r , т. е. удаление капли. При этом считаем, что рассматривается процесс вращения капли от начала действия полуволны ПРМП прямоугольной формы с неизменными значениями индукций B_z и B_r . Полагаем также, что на предыдущей полуволне ПРМП капля была удалена и не нужно затрачивать усилия на ее торможение. Она разбивается на одинаковые по размеру элементы, на каждый выделенный элемент жидкой капли с углом φ действуют четыре указанные силы.

Капля, как и каждый ее элемент с малым значением угла φ , начинает вращаться равноускоренно (с постоянным угловым ускорением). Если уровень индукции B_r , а также связанный с этим уровень индукции B_z будет больше некоторого предельного, то равновесие сил, спроектированных на ось r , нарушится и капля удаляется центробежной силой с торца электрода.

При расчетах необходимые значения величин определяются по следующим формулам:

площадь поверхности капли

$$S_1 = \frac{\varphi\pi}{360} r_1^2 [\text{м}^2] \quad (1)$$

(в этой и во всех других формулах угол измеряется в градусах);

$$S_2 = r_1 h [\text{м}^2], \quad (2)$$

$$S_3 = \frac{2\pi r_1 \varphi}{360} h [\text{м}^2]; \quad (3)$$

объем рассматриваемого элемента капли с углом φ

$$V = S_1 h [\text{м}^3]; \quad (4)$$

сила поверхностного натяжения по закону Лапласа

$$F_{\text{п.н}} = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) S_3 [\text{Н}], \quad (5)$$

где σ — поверхностное натяжение жидкой капли, Н/м.

Плотность электромагнитных сил от воздействия индукции B_r ПРМП при протекании в капле тока наплавки I_H составляет

$$F_{\text{эм}} = \frac{4I_H B_r}{\pi d^2} [\text{Н/м}^3]. \quad (6)$$

Азимутальная электромагнитная сила, действующая на элемент капли, равна

$$F'_{\text{эм}} = F_{\text{эм}} V [\text{Н}]. \quad (7)$$

Под действием $F'_{\text{эм}}$ в элементе капли возникает центробежная сила

$$F_{\text{цб}} = \rho V \frac{v^2}{r_3} [\text{Н}], \quad (8)$$

где ρ — плотность жидкой капли, кг/м³; v — скорость вращения элемента капли (в центре элемента, на расстоянии $r^3 = 2/3r_1$), м/с.

Плотность электромагнитной силы, сжимающей каплю, составляет [11]

$$F_r = \frac{\mu_0 I_H^2 r}{2\pi^2 r_1^4} [\text{Н/м}^3], \quad (9)$$

где r — текущий радиус, м.

Электромагнитная сила, сжимающая каплю в радиальном направлении, возникает в элементе капли при протекании в ней тока наплавки:

$$F'_r = F_r V [\text{Н}]. \quad (10)$$

Скорость вращения капли v (точка A , рис. 1, в) определим из условия равноускоренного движения

$$v = \sqrt{2La} [\text{м/с}]. \quad (11)$$

Путь «разгона» центра выделенного объема капли (точка A , рис. 1, в) составляет



$$L = \frac{2\phi\pi}{360}r_3 = \frac{4\phi\pi}{3 \cdot 360}r_1; \quad r_3 = \frac{2r_1}{3}. \quad (12)$$

Ускорение под действием азимутальной электромагнитной силы $F'_{эм}$ определим из соотношений

$$F'_{эм} = F_{эм}V; \quad F_{эм} = \frac{4I_H B_r}{\pi d_3^2}; \quad F'_{эм} = \rho Va; \quad a = \frac{4I_H B_r}{\pi d_3^2 \rho}. \quad (13)$$

Тогда

$$v = \sqrt{2La} = \sqrt{\frac{16\phi I_H B_r}{3 \cdot 360 d_3 \rho}}. \quad (14)$$

Капля будет удалена с торца электрода, если проекция всех радиальных сил, действующих на ее элемент (рис. 1, б) и на ось r , больше нуля (рис. 1, в)

$$F_{цб} - F_{пн} - F'_r > 0 \quad (15)$$

или

$$V\rho \frac{v^2}{r_3} - \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) S_3 - F'_r > 0. \quad (16)$$

Из выражения (16) находим

$$v = \sqrt{\frac{[\sigma(1/r_1 + 1/r_2)S_3 + F'_r]r_3}{V\rho}}. \quad (17)$$

Приравняв правые части выражений (14) и (17), получим

$$\frac{16\phi I_H B_r}{3 \cdot 360 d_3} = \frac{[\sigma(1/r_1 + 1/r_2)S_3 + F'_r]r_3}{V}. \quad (18)$$

С учетом того, что $r_3 = d_3/3$, $r_1 = d_3/2$, и приняв в формуле (9) значение $r = r_1 = d_3/2$, определяем

$$F_r = \frac{4\mu_0 I_H^2}{\pi^2 d_3^3}, \quad F'_r = F_r \frac{V}{r_2} = \frac{\mu_0 I_H^2 \phi h}{2\pi d_3 \cdot 360}.$$

Правую часть в уравнении (18) можно упростить с учетом, что

$$S_3 = \pi d_3 \phi h / 360, \quad V = \pi d_3 \phi h / 4 \cdot 360,$$

$$\frac{[\sigma(1/r_1 + 1/r_2)S_3 + F'_r]r_3}{V} = \frac{4[\sigma(1/r_1 + 1/r_2)\pi d_3^2 + \frac{\mu_0 I_H^2}{2\pi}]}{3\pi d_3}.$$

Приравняв это выражение к левой части уравнения (18), получим формулу для вычисления минимального значения B_r , необходимого для удаления капли с торца электрода

$$B_r = \frac{360[\sigma(1/r_1 + 1/r_2)\pi d_3^2 + \frac{\mu_0 I_H^2}{2\pi}]}{4\phi I_H \pi d_3}, \quad (19)$$

и угла поворота капли при ее удалении

$$\phi = \frac{360[\sigma(1/r_1 + 1/r_2)\pi d_3^2 + \frac{\mu_0 I_H^2}{2\pi}]}{4I_H B_r \pi d_3}. \quad (20)$$

Время, необходимое для «разгона» капли при вращении ее со скоростью v и удаления ее импульсом ПРМП (длительность импульса) при $t = 2L/v$ с учетом значений L и v из формул (12) и (14), составляет

$$t_{\min} = \sqrt{\frac{\phi}{360} \frac{d_3^3 \rho}{3I_H B_r}}. \quad (21)$$

Подставив значение угла ϕ , вычисленное по (20), в выражение (21), получим оценку минимальной длительности импульса ПРМП, необходимой для удаления капли с торца электрода

$$t_{\min} = \frac{d_3 \sqrt{\rho}}{2 \sqrt{3\pi} I_H B_r} \sqrt{\sigma(1/r_1 + 1/r_2)\pi d_3^2 + \frac{\mu_0 I_H^2}{2\pi}}. \quad (22)$$

Из (22) следует, что длительность импульса t ПРМП зависит от значений d_3 , I_H , B_r , r (а также от σ , r_1 , r_2). В качестве положительного момента следует отметить, что в формулы (20)–(22) не входит параметр h .

По формуле (22) определяем минимальное время действия импульса с индукцией B_r ПРМП, необходимое для удаления капли при дуговой наплавке электродом заданного диаметра d_3 и определенного тока наплавки I_H с целью повышения коэффициента расплавления α_p электродной проволоки.

Из формулы (22) сделана оценка минимального уровня индукции, необходимого для удаления капли:

$$B_{r \min} = \frac{d_3 \sqrt{\rho}}{2 \sqrt{3\pi} I_H t} \sqrt{\sigma(1/r_1 + 1/r_2)\pi d_3^2 + \frac{\mu_0 I_H^2}{2\pi}}. \quad (23)$$

Из выражений (22) и (23) следует, что произведение параметров $B_r t$, обеспечивающих удаление капли с торца электрода, является величиной постоянной для принятых в расчетах значений d_3 , I_H , ρ , σ .

При вычислении параметров $B_{r \min}$ и t_{\min} наибольшей неопределенностью отличается поверхностное натяжение металла капли. Известно, что при температуре кипения $T_{\text{кип}}$ оно практически равно нулю. Чтобы оценить влияние σ на указанные параметры ПРМП выполняли расчеты при



$\sigma = 1 \text{ Н/м}$ и $\sigma = 0$. В расчетах принимали угол $\varphi = 36^\circ$, высоту слоя $h = 2 \text{ мм}$, плотность металла жидкой капли $\rho = 7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; $r_1 = r_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Следует отметить, что в зоне капли на торце электрода из ферромагнитного материала B_r составляет 20...30% осевой компоненты индукции B_z ПРМП [6]; в расчетах $B_r = 0,2B_z$.

Определена длительность импульса ПРМП, удаляющего электродную каплю t_{\min} при минимальной, но достаточной для повышения α_p электрода индукции $B_r = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ [6], при изменении значений тока наплавки I_H ($d_3 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$). Результаты расчетов показали (рис. 2, а), что t_{\min} при увеличении I_H уменьшается. В диапазоне значений тока наплавки $I_H = 300 \dots 1000 \text{ А}$, наиболее широко применяемом при наплавке проволокой

под флюсом, длительность импульса t_{\min} изменяется в довольно узких пределах — $t_{\min} \approx (2,0 \dots 3,5) \cdot 10^{-3} \text{ с}$. При неизменном значении тока наплавки I_H увеличение индукции B_r способствует уменьшению значений t_{\min} (рис. 2, б). При постоянном значении B_r и I_H увеличение диаметра электрода приводит к возрастанию длительности импульса t_{\min} (рис. 2, в). Из этого рисунка также следует, что для электродных проволок диаметром $d_3 = 3 \dots 5 \text{ мм}$, широко применяемых при дуговой наплавке, минимальная длительность импульса ПРМП, необходимая для удаления капли с торца электрода при наплавке, изменяется в указанных ранее узких пределах — $t_{\min} \approx (2,0 \dots 3,8) \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Расчеты показали, что влияние σ на $B_{r \min}$ и t_{\min} уменьшается с увеличением I_H и уменьшением d_3 (при заданном I_H). Если не учитывать влияние σ (принять $\sigma = 0$), то расчетные значения t_{\min} уменьшаются не более чем на 33% (кривые 2, рис. 2). Если принять $r_2 = \infty$ (плоская нижняя поверхность капли), то все расчетные данные на рис. 2 будут расположены между кривыми 1 и 2. Таким образом, предложенные формулы (22) и (23) для расчета $B_{r \min}$ и t_{\min} можно применять для оценочных расчетов.

Интерес представляет решение вопроса о том, сможет ли ПРМП промышленной частоты обеспечить удаление капли с торца электрода каждым импульсом индукции длительностью 0,01 с и тем самым повысить значения коэффициента α_p при наплавке.

С этой целью выполнен расчет, в котором предполагается, что после прекращения действия импульса ПРМП и воздействия без паузы импульса ПРМП в противоположном направлении необходимо определить время, затрачиваемое на полное торможение движения капли. При этом, очевидно, что капля при разгоне прошла определенный путь длиной L (угол φ), а при обратном импульсе ПРМП она должна пройти такой же путь (либо угол φ) в обратном направлении.

Расчет выполняли применительно к наплавке проволокой Св-08А (ферромагнетик) диаметром 4 мм при $I_H = 500 \text{ А}$, $B_r = 12 \text{ мТл}$.

Если представить (как крайний случай), что необходимо осуществить торможение капли обратным импульсом и разгон ее в обратном направлении, то продолжительность ее торможения при частоте ПРМП $f = 50 \text{ Гц}$ составляет $t = 2,87 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ (рис. 3).

Таким образом, при дуговой наплавке, если частота 50 Гц, то коэффициент расплавления электродных проволок из ферромагнитных материалов повышается.

При киносъемке процесса плавления электродной проволоки открытой дугой обратной поляр-

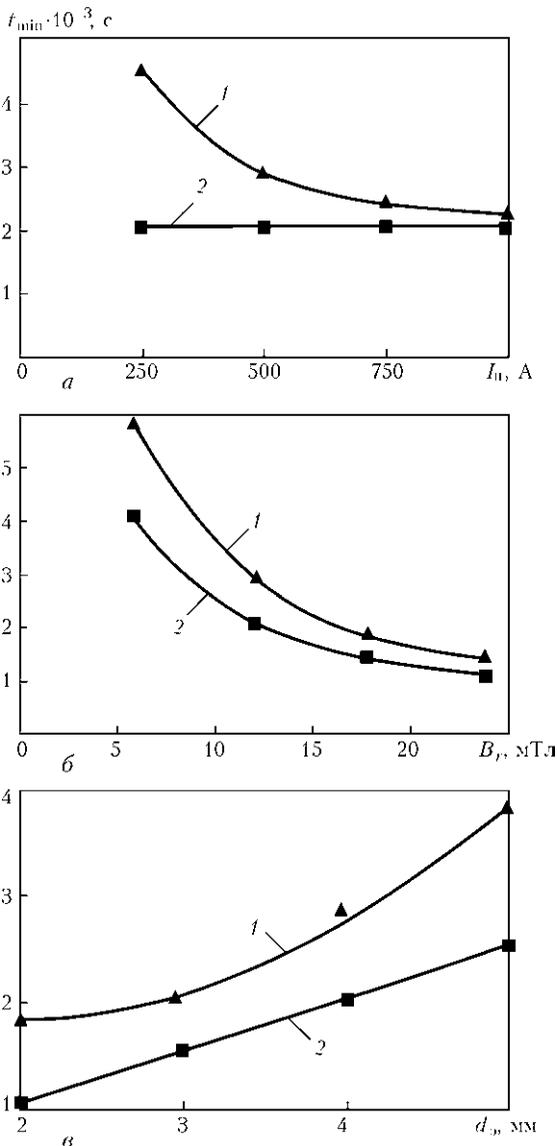


Рис. 2. Зависимость длительности импульса t_{\min} ПРМП от тока наплавки (при $d_3 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$, $B_r = 12 \cdot 10^{-3} \text{ мТл}$) (а), индукции ПРМП B_r (при $d_3 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$, $I_H = 500 \text{ А}$) (б) и диаметра электрода (при $I_H = 500 \text{ А}$; $B_r = 12 \cdot 10^{-3} \text{ мТл}$) (в): 1 — $\sigma = 1 \text{ Н/м}$; 2 — $\sigma = 0$

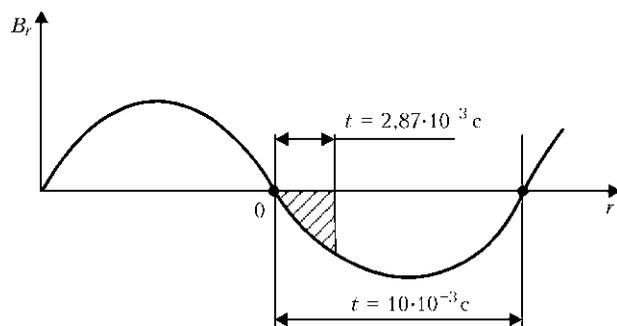


Рис. 3. Схема для учета времени торможения капли при воздействии ПРМП с частотой 50 Гц

ности без воздействия ПРМП и статической обработке кадров подтверждено положение, принятое в расчетной методике о том, что размеры капли в основном не превышают диаметр электрода. При воздействии постоянного и переменного ПРМП частотой 50 Гц торец электрода являлся плоским и на нем имела тонкая прослойка жидкого металла. Это подтверждает данные, полученные расчетным путем о том, что при воздействии ПРМП как постоянного, так и переменного, в том числе и с частотой 50 Гц, импульсы магнитного поля эффективно удаляют жидкий металл с торца электрода, уменьшают тем самым толщину жидкой прослойки и способствуют повышению коэффициента расплавления электродной проволоки [6].

Выводы

1. Разработана математическая модель процесса удаления капли с торца электрода с воздействием ПРМП, которая позволяет расчетным методом определять оптимальные параметры ($B_{r\min}$, t_{\min}) ПРМП, обеспечивающие повышение производительности расплавления электродных проволок при дуговой наплавке.

2. При значении радиальной компоненты индукции $B_{r\min} = 10 \dots 12$ мТл в зоне капли для уда-

ления капли с торца электрода необходим импульс ПРМП с минимальной длительностью $t_{\min} = (2 \dots 4) \cdot 10^{-3}$ с.

3. При частоте 50 Гц ПРМП возможно удаление капли с торца электрода и соответственно повышение коэффициента его расплавления.

1. Erdman-Jesnitzer F., Feustel E. Grundlagen des Magnetimpulsschweißens // Schweissen and Schneiden. — 1967. — № 1. — С. 2–8.
2. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Повышение производительности расплавления электродной проволоки при сварке в продольном магнитном поле // Свароч. пр-во. — 1989. — № 4. — С. 18–19.
3. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Особенности плавления электродного металла при сварке во внешнем магнитном поле // Там же. — 1991. — № 5. — С. 28–30.
4. Поведение дуги и перенос электродного металла при сварке в продольном магнитном поле / В. Д. Кузнецов, И. В. Малинкин, В. В. Сыроватка и др. // Там же. — 1972. — № 4. — С. 3–4.
5. Пацкевич И. Р., Зернов А. В., Серафимов В. С. Влияние продольного магнитного поля на плавление и перенос электродного металла // Там же. — 1973. — № 7. — С. 8–10.
6. Размышляев А. Д., Дели А. А., Миронова М. В. Влияние продольного магнитного поля на производительность расплавления проволоки при электродуговой наплавке под флюсом // Автомат. сварка. — 2007. — № 6. — С. 31–35.
7. Вороний Н. М., Колесниченко А. Ф., Лунькова О. Н. Электромагнитные силы в каплях при оплавлении цилиндрического электрода дугой // Техн. электродинамика. — 1982. — № 6. — С. 11–15.
8. Походня И. К., Костенко Б. А. Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1965. — № 10. — С. 16–22.
9. Вороний Н. М., Колесниченко А. Ф. Моделирование формы капель электродного металла при сварке в защитных газах // Там же. — 1979. — № 9. — С. 27–32.
10. Численный метод определения свободной поверхности капель электродного металла при его переносе в магнитном поле сварочных дуг / А. Ф. Колесниченко, Н. М. Вороний, О. Н. Лунькова и др. // Магн. гидродинамика. — 1977. — № 3. — С. 121–126.
11. Березовский Б. М. Математические модели дуговой сварки: В 3 т. — Т. 3: Давление дуги, дефекты сварных швов, перенос электродного металла. — Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2003. — 485 с.

A mathematical model of the process of drop separation from the electrode tip in arc surfacing in a longitudinal magnetic field was developed. It is shown that a field pulse of the respective duration is required for drop removal from the electrode tip at a certain value of the radial component of induction in the drop zone.

Поступила в редакцию 25.11.2008