



## 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  $\varphi$  (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  $\varphi$  (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,





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

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  $\phi$ , 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  $\sigma$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ). 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  $\alpha_p$  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  $d_3$ ,  $I_H$ ,  $\rho$ ,  $\sigma$ .

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  $\sigma$  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  $\alpha_p$  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  $\sigma$  на  $B_{r \min}$  и  $t_{\min}$  уменьшается с увеличением  $I_H$  и уменьшением  $d_3$  (при заданном  $I_H$ ). Если не учитывать влияние  $\sigma$  (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  $\alpha_p$  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  $\varphi$ ), а при обратном импульсе ПРМП она должна пройти такой же путь (либо угол  $\varphi$ ) 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-

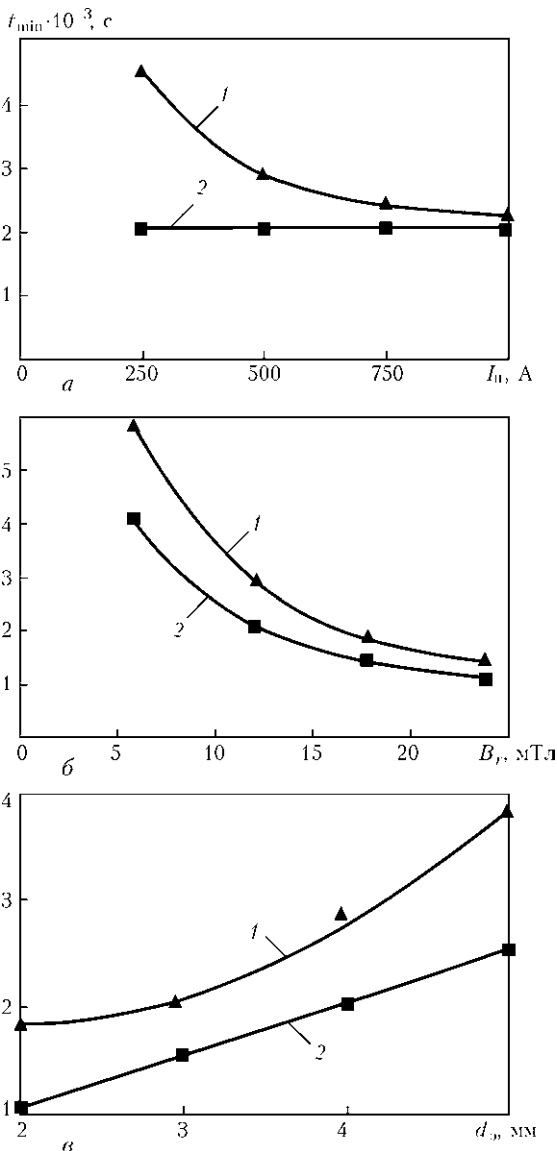


Рис. 2. Зависимость длительности импульса  $t_{\min}$  ПРМП от тока наплавки (при  $d_3 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ ,  $B_r = 12 \cdot 10^{-3} \text{ мТл}$ ) (а), индукции ПРМП  $B_r$  (при  $d_3 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ ,  $I_H = 500 \text{ А}$ ) (б) и диаметра электрода (при  $I_H = 500 \text{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

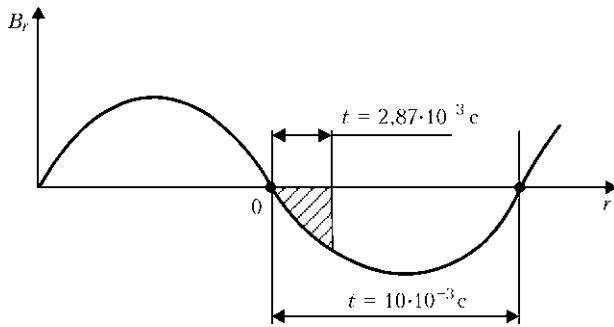


Рис. 3. Схема для учета времени торможения капли при воздействии ПРМП с частотой 50 Гц

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