

УДК 621.791.75

Размышляев А. Д., Миронова М. В.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ
В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Эффективность применения дуговой наплавки под флюсом повышается интенсифицированием процесса расплавления электродной проволоки и уменьшением глубины и площади проплавления основного металла, уменьшением доли участия основного металла в наплавленном. Для этих целей перспективным является использование внешних продольных магнитных полей (ПРМП).

При дуговой наплавке под флюсом электрод (сварочная проволока) и изделие зачастую выполнены из ферромагнитных материалов. Ферромагнитные электрод и изделие в значительной степени влияют на конфигурацию магнитного поля в зоне дугового промежутка, а, следовательно, на процессы расплавления проволоки и проплавления основного металла при наплавке.

Исследования, проведенные рядом авторов, показали, что применение ПРМП при сварке позволяет управлять геометрическими размерами шва [1], измельчать структуру сварного шва и повышать его служебные характеристики [2]. Анализ литературных данных показал, что воздействием ПРМП возможно повышение эффективности дуговой наплавки под флюсом за счет увеличения коэффициента расплавления проволоки [3, 4] и уменьшения размеров зоны проплавления основного металла [1, 5]. Однако причины, определяющие повышение производительности плавления проволоки и снижения проплавления основного металла при дуговой наплавке в ПРМП, не установлены. Установление механизма влияния ПРМП на процессы плавления электродного и основного металлов при дуговой наплавке под флюсом даст возможность разработать рекомендации для выбора оптимальных параметров ПРМП с целью повышения эффективности процесса наплавки, улучшения формирования наплавленного валика, измельчения структуры наплавленного металла и повышения его служебных характеристик.

Целью работы является разработка математической модели поведения капли применительно к наплавке с воздействием ПРМП.

В математической модели на основе метода баланса интегральных сил установлены особенности процесса удаления капли с торца электрода при наплавке с применением ПРМП. Учитывались четыре силы, под действием которых находится выделенный участок жидкой капли: сила поверхностного натяжения $F_{н.н.}$, центробежная сила $F_{ц.б.}$, электромагнитная сила (объемная) от воздействия ПРМП $F_{э.м.}$ и электромагнитная сила (объемная сила, сжимающая каплю в радиальном направлении), возникающая в капле при протекании в ней тока наплавки F_r (рис. 1).

Предварительными расчетами установлено, что 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 , и препятствующие отрыву выделенного участка капли с углом φ (рис. 1, б), пренебрежимо малы по сравнению с другими силами, действующими на каплю.

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

$$F_{ц.б.} - F_{н.н.} - F_r' > 0. \quad (1)$$

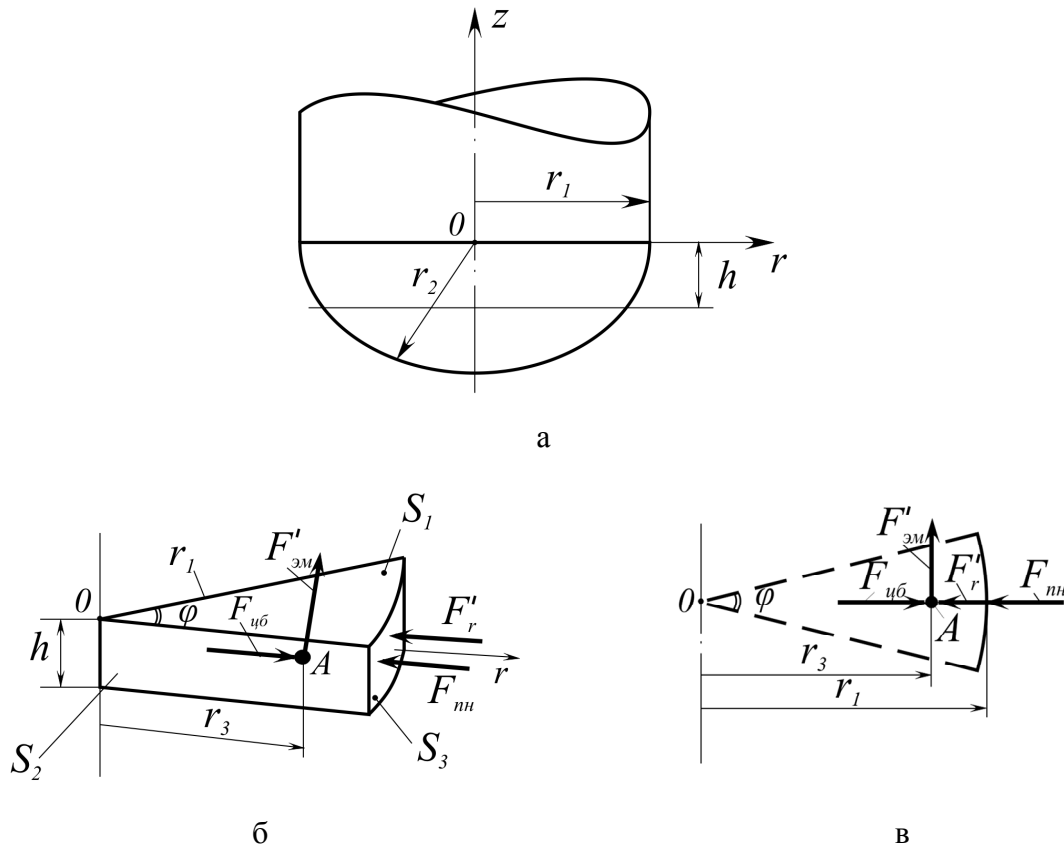


Рис. 1. Схема к расчету вращения жидкой капли при наплавке с воздействием ПРМП

После подстановки формул для определения сил F_r , $F_{эм}$, $F_{нн}$, $F_{уб}$ в (1) и преобразований получены выражения для определения минимальной длительности t_{min} , а при заданной длительности импульса t (и заданных параметрах $d_э$, I_H) – для минимального уровня индукции B_{rmin} , Тл, необходимые для удаления капли:

$$t_{min} = \frac{d_э \cdot \sqrt{r}}{2\sqrt{3p} \cdot I_H \cdot B_r} \cdot \sqrt{s \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cdot p d_э^2 + \frac{m_0 \cdot I_H^2}{2p}}; \quad (2)$$

$$B_{rmin} = \frac{d_э \cdot \sqrt{r}}{2\sqrt{3p} \cdot I_H \cdot t} \cdot \sqrt{s \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cdot p d_э^2 + \frac{m_0 \cdot I_H^2}{2p}}, \quad (3)$$

где $d_э$ – диаметр электрода, м; I_H – ток наплавки, А; σ – поверхностное натяжение жидкой капли, Н/м; B_r – радиальная компонента индукции ПРМП, Тл; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; r_1 – максимальный радиус, равный радиусу электрода ($r_1 = d_э/2$), м; r_2 – радиус в любой вертикальной плоскости, проходящей через ось z , м; ρ – плотность жидкого металла капли, кг/м³.

Из (3) следует, что минимальный уровень индукции B_{rmin} ПРМП зависит от $d_э$, I_H , t , ρ (а также σ , r_1 , r_2). Следует отметить в качестве положительного момента то, что в формулы (2)–(3) не входит параметр « h » – толщина рассматриваемого слоя.

В работе установлено, что в зазоре между торцом электрода и изделием из ферромагнитных материалов магнитное поле представляет собой поле рассеяния, которое имеет сложную конфигурацию. Экспериментально установлено, что при наплавке в ПРМП

электродными проволоками из магнитных материалов (например, проволокой Св-08А) на пластины из магнитных материалов в дуговом промежутке (в зоне у торца электрода) радиальная компонента индукции (B_r) достигает значительных величин, например, при $z = 4,5$ мм, $r = 2,5$ мм, $B_r \approx 100$ мТл.

Если электрод изготовлен из ферромагнитного материала, то капля вращается в направлении, которое соответствует действию силы, образованной взаимодействием радиальной компоненты индукции B_r с осевой компонентой плотности тока в капле j_z . При увеличении тока через каплю, но неизменной величине индукции B_z , скорость вращения металла возрастает. При увеличении индукции B_z ПРМП и не изменяющемся токе через каплю скорость вращения металла в ней также возрастает.

Экспериментально показано, что коэффициент расплавления электрода из ферромагнитного материала увеличивается при воздействии постоянного ПРМП на 30 %, а при воздействии ПРМП частотой 50 Гц на 22 %. При увеличении частоты до 4...6 Гц эффект повышения (a_p) снижается и несколько возрастает при дальнейшем увеличении частоты поля до 50 Гц (рис. 2). Коэффициент расплавления электрода в ПРМП зависит от магнитных свойств проволок сплошного сечения и порошковых проволок, имеющих оболочки из ферромагнитных материалов. Радиальная компонента индукции B_r ПРМП в зоне электродной капли пропорциональна значению магнитной проницаемости μ электродных проволок. Эффект повышения a_p электрода при воздействии ПРМП пропорционален величине магнитной проницаемости μ материала электрода и связанным с этим возрастающим уровнем радиальной компоненты индукции B_r ПРМП в зоне капли. Для парамагнитной (немагнитной) проволоки повышение производительности процесса расплавления проволоки (a_p) при наплавке в ПРМП не наблюдается.

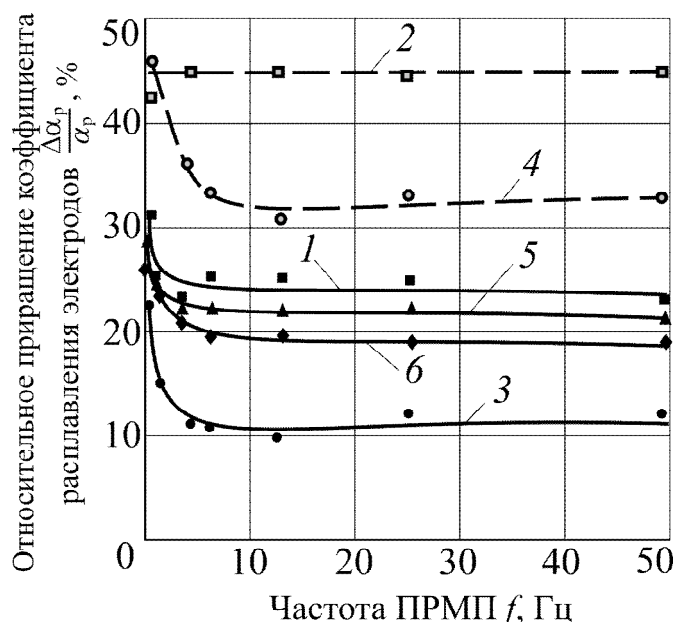


Рис. 2. Влияние частоты ПРМП на относительное приращение ($\Delta a_p/a_p$) коэффициента расплавления электродов:

1, 3, 5, 6 – обратная полярность; 2, 4 – прямая полярность; 1, 2 – Св-08А; 3, 4 – ПП-12Х13; 5 – Св-08Г2С; 6 – Нп-30ХГСА

Одним из факторов, определяющим глубину и форму проплавления швов при сварке, является газодинамическое давление дуги, которое значительно больше, чем магнитостатическое.

Выполняли наплавки на постоянном токе обратной полярности проволокой Св-08ГА (ферромагнетик) диаметром 4 мм на пластины из стали 09Г2С (ферромагнетик) толщиной 20 мм под флюсом АН-348А с воздействием ПРМП на режиме: $I_n = 500 \dots 550$ А, $U_d = 30 \dots 32$ В, $V_n = 27$ м/ч. Наплавку осуществляли с воздействием постоянного и знакопеременного ПРМП частотой 50 Гц. Во всех экспериментах до наплавки выполняли измерения продольной компоненты индукции B_z у поверхности этой пластины при расстоянии от плоского торца электрода до пластины 5 мм.

Результаты экспериментов при наплавке с неизменной скоростью подачи электродной проволоки представлены на рис. 3, а. Поскольку при включении ПРМП наблюдается снижение I_n , то выполняли также наплавки, когда при воздействии ПРМП увеличивали скорость подачи проволоки, чтобы ток наплавки был таким же, как и в предыдущей серии экспериментов. Результаты представлены на рис. 3, б. Данные о глубине H_{np} и площади F_{np} проплавления в зависимости от индукции ПРМП в этом случае практически совпали с данными, приведенными на рис. 3, а. Установлено, что при дуговой наплавке проволокой под флюсом H_{np} и F_{np} основного металла существенно уменьшаются, если величина продольной компоненты индукции постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП превышает уровень порядка 50...60 мТл. Это наблюдается при использовании проволок и изделий как из ферромагнитных материалов, так и парамагнитных (немагнитных) материалов.

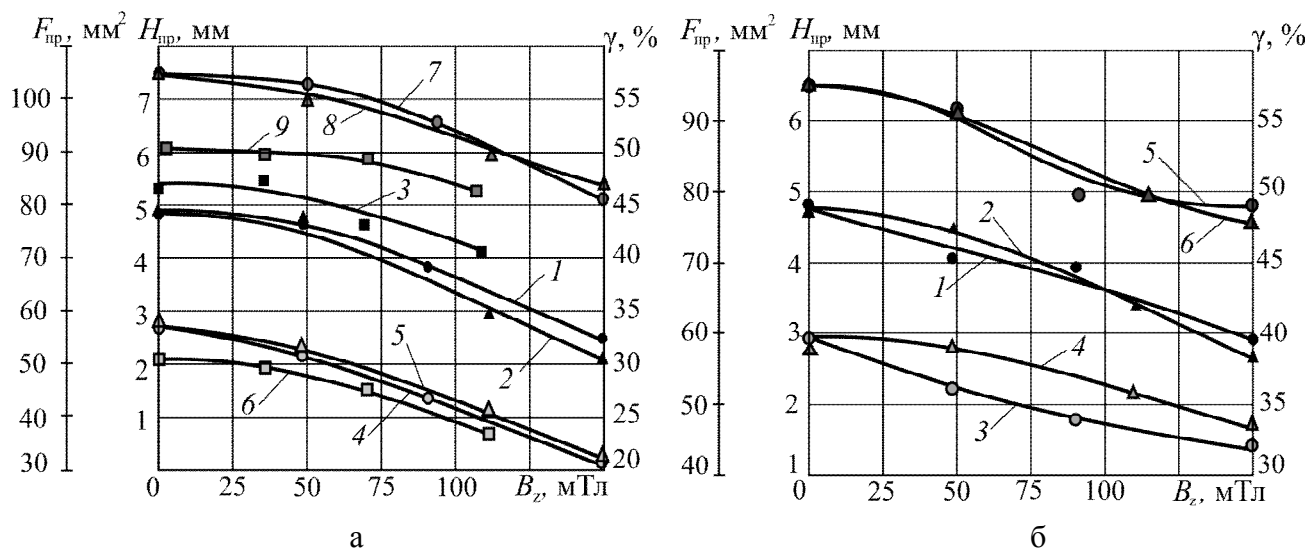


Рис. 3. Влияние индукции B_z ПРМП на параметры H_{np} , F_{np} , γ :

а – $V_{под} = const$, 1, 4, 7 – H_{np} , F_{np} , γ : Св-08ГА Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; 2, 5, 8 – H_{np} , F_{np} , γ : Св-08ГА Ø 4 мм, постоянное ПРМП; 3, 6, 9 – H_{np} , F_{np} , γ : Св-12Х18Н10Т Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; б – $I_n = const$, 1, 3, 5 – H_{np} , F_{np} , γ : Св-08ГА Ø 4 мм, ПРМП частотой 50 Гц; 2, 4, 6 – H_{np} , F_{np} : Св-08ГА Ø 4 мм, постоянное ПРМП

Однако, результаты измерений показали, что наблюдаемые уменьшения H_{np} и F_{np} при увеличении индукции ПРМП свыше 60...70 мТл (рис. 3) не могли быть объяснены изменением среднего давления дуги, либо интегральной силы дуги, поскольку они не снижались в указанном диапазоне индукций ПРМП.

Установлено, что уменьшение эффективности проплавления основного металла при наплавке с воздействием постоянного и переменного ПРМП частотой 50 Гц определяется не только происходящим при этом, как показано измерениями, увеличением радиуса дуги и изменением распределения давления по радиусу дуги, но и тормозящим действием этого магнитного поля на потоки жидкого металла из головной части ванны в хвостовую ее часть.

При наплавке под флюсом на прямой полярности с воздействием ПРМП глубина и площадь проплавления основного металла уменьшаются в 3 раза, а доля участия основного металла в наплавленном – в 2...2,5 раза.

С помощью физического моделирования установлено, что при наплавке с воздействием постоянного ПРМП в сварочной ванне максимальную скорость имеет поток металла, направленный в хвостовую часть вдоль ее боковой стенки, и величина этой скорости достигает значений порядка 35 см/с при токе в модельной ванне 400...500 А и индукции ПРМП $B_z \geq 60$ мТл. Расчетom установлено, что применительно к наплавке проволокой под флюсом для перемешивания металла в ванне оптимальной является частота ПРМП 2...5 Гц при токах наплавки $I_n = 500...1000$ А и индукцией поля $(60...70) \leq B_z \leq (100...150)$ мТл.

Следует отметить, что процесс дуговой наплавки проволокой под флюсом является энергосберегающим процессом. При этом экономия электрической энергии на наплавку составляет 30...50 %, а производительность процесса наплавки повышается приблизительно на 25...40 %.

Таким образом, применение ПРМП целесообразно при наплавке как восстановительной, так и упрочнительной.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что вращение и отрыв капли с торца электрода происходит под действием электромагнитной силы, обусловленной взаимодействием радиальной компоненты индукции ПРМП с осевой составляющей плотности тока в капле, что улучшает условия передачи тепла дуги капле и повышает коэффициент расплавления электродной проволоки.

2. На основании разработанной математической модели поведения капли на торце электрода при дуговой наплавке с воздействием ПРМП показано, что при минимальном уровне радиальной компоненты индукции $B_{r\min}$ 10...12 мТл, соответствующей величине продольной компоненты индукции B_z ПРМП 60 мТл, произойдет удаление капли и повышение коэффициента расплавления проволоки. Установлено, что удаление капли с торца электрода происходит и при воздействии знакопеременного ПРМП частотой 50 Гц.

3. Снижение глубины и площади проплавления основного металла в 2...2,5 раза, а доли участия основного металла в наплавленном в 1,3 раза при наплавке с воздействием ПРМП при величине индукции $B_z > 60...70$ мТл объясняется не только снижением давления дуги при действии постоянного и переменного ПРМП частотой 50 Гц, но и торможением осевого потока жидкого металла в ванне и ухудшением условий передачи тепла дуги основному металлу.

4. Установлено, что для режимов, применяемых при наплавке проволокой под флюсом, полное перемешивание металла ванны, измельчение структуры наплавленного металла и повышение его служебных характеристик достигается при частоте реверсирования ПРМП 2...5 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Размышляев А. Д. *Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке* / А. Д. Размышляев. – Мариуполь : ПГТУ, 2000. – 245 с.
2. *Сварка с электромагнитным перемешиванием* / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман, Г. М. Шеленков. – Киев : Техника, 1983. – 127 с.
3. Болдырев А. М. *Повышение производительности расплавления электродной проволоки при сварке в продольном магнитном поле* / А. М. Болдырев, В. А. Биржсев, А. В. Черных // *Сварочное производство*. – 1989. – № 4. – С. 18–19.
4. Болдырев А. М. *Особенности плавления электродного металла при сварке во внешнем магнитном поле* / А. М. Болдырев, В. А. Биржсев, А. В. Черных // *Сварочное производство*. – 1991. – № 5. – С. 28–30.
5. Болдырев А. М. *Управление глубиной проплавления при дуговой сварке и наплавке с помощью продольного переменного магнитного поля* / А. М. Болдырев, В. А. Биржсев, А. В. Черных // *Сварочное производство*. – 1993. – № 6. – С. 30–31.