

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ВЛИЯЮЩЕГО НА ПЕРЕНОС КАПЕЛЬ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ

А.Д. Размышляев¹, М.В. Агеева²

¹ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»,
87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7. E-mail: razмышljajev@gmail.com

²Донбасская государственная машиностроительная академия,
84313, г. Краматорск, ул. Академическая, 72. E-mail: maryna_ah@ukr.net

Показано, что при дуговой наплавке проволокой под флюсом с воздействием постоянного поперечного магнитного поля коэффициент расплавления электродных проволок диаметром 3...5 мм повышается на 25...30 %. Экспериментально установлено, что при воздействии знакопеременного поля при неизменном уровне поперечной компоненты индукции эффект повышения коэффициента расплавления зависит от частоты этого поля. При увеличении частоты поля до 10...20 Гц приращение коэффициента расплавления снижается до нулевых значений. Разработана методика для определения минимального уровня поперечной компоненты индукции поля в зоне электродной капли, при котором капля удаляется с плавящегося торца электрода. Показано, что эффект снижения коэффициента расплавления при увеличении частоты поля обусловлен уменьшением длительности импульсов. Приведены расчетные данные, позволяющие определить оптимальные значения индукции и частоты знакопеременного поля, при которых повышается коэффициент расплавления проволок при дуговой наплавке (сварке) под флюсом. Библиогр. 8, рис. 4.

Ключевые слова: дуговая наплавка (сварка), поперечное магнитное поле, индукция, коэффициент расплавления электрода, частота, расчетная методика

Использование поперечного магнитного поля (ПОМП) при дуговой наплавке и сварке позволяет управлять геометрией валиков и швов [1], измельчать структуру металла шва (валика) [2–4] и повышать прочность сварных соединений [5].

Важной проблемой является повышение производительности процесса расплавления электродной проволоки при электродуговой сварке и наплавке под флюсом. В настоящее время основное внимание исследователей посвящено разработке устройств ввода (УВ) ПОМП, но нет исследований, посвященных выяснению причин повышения коэффициента расплавления электродных проволок при дуговой наплавке и сварке с воздействием ПОМП.

В работах [5, 6] экспериментально определены значения коэффициента расплавления электродной проволоки α_p при электродуговой наплавке под флюсом с воздействием управляющего ПОМП. Показано, что его применение позволяет повысить коэффициент расплавления проволок. Максимальное повышение коэффициента α_p (до 30 %) наблюдается при использовании постоянного ПОМП, с ростом частоты этого поля эффект повышения α_p снижается до нулевых значений при частоте 20...50 Гц. В этих работах приведена расчетная методика, позволяющая объяснить физическую сущность (причины) повышения коэффициента α_p от воздействия постоянного

ПОМП при дуговой наплавке. Однако приведенную в работах [5, 6] расчетную методику можно использовать только при применении при наплавке постоянного ПОМП, когда на торце электрода образуется скол. Применить к знакопеременному ПОМП эту методику невозможно, что сдерживает их рациональное использование при дуговой наплавке и сварке.

Целью работы является разработка расчетной методики, позволяющей определить минимальный уровень поперечной компоненты индукции ПОМП различной частоты, удаляющей каплю с торца электродной проволоки и повысить за счет этого коэффициент расплавления электродных проволок при дуговой наплавке и сварке под флюсом.

Как и в работах [5, 6], в настоящем исследовании экспериментально определяли коэффициент расплавления α_p электродных проволок Св-08А диаметрами 3...5 мм при дуговой наплавке под флюсом АН-348 на постоянном токе обратной полярности.

Значения α_p проволок определяли по общеизвестной методике (методом взвешивания). При этом выполняли наплавки с воздействием как постоянного, так и знакопеременного ПОМП частотой 2; 5; 12; 24; 33 и 50 Гц. Использовали такое же УВ ПОМП, как и в работах [5, 6], а также устройство, питающее катушки УВ ПОМП. Выполняли наплавки и без воздействия ПОМП. Чтобы

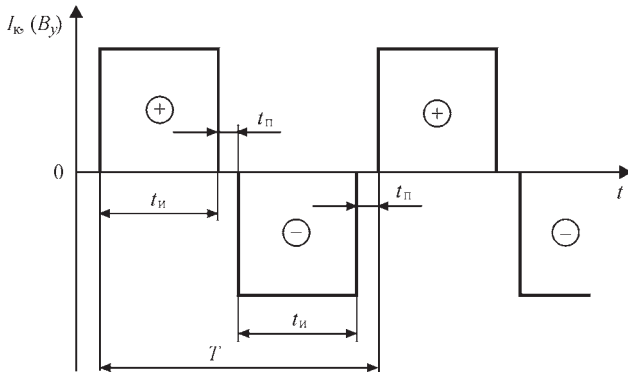


Рис. 1. Схема импульсов тока I_k , питающего катушки УВ ПОМП

изделие (наплавляемые пластины) не искажали структуру магнитного поля в зоне электродной капли и сварочной ванны, использовали пластины из стали 12Х18Н10Т (немагнитной) толщиной 12...20 мм. Схема прямоугольных импульсов (тока I_k в катушках УВ ПОМП и индукции B_y) приведена на рис. 1. При этом индукцию B_y измеряли универсальным тесламетром типа 43205 с датчиком Холла, имевшим измерительную базу 0,9×0,9 мм у поверхности основного металла (в зоне будущей сварочной ванны) под электродной проволокой при расстоянии от ее торца до пластины $\Delta = 5$ мм. Измеряли индукцию B_y при протекании в катушках УВ ПОМП постоянного тока, поэтому приведенные на рис. 1 максимальные значения B_y в импульсах соответствуют значениям при протекании в катушках постоянного тока.

Во всех экспериментах выдерживали одинаковые значения индукции $B_y = 30$ мТл. Имелась возможность изменять длительность импульсов (I_k , B_y) – $t_{и}$, и паузы $t_{п}$. Устанавливали длительность пауз $t = 0,01$ с (рис. 1). При этом длительность периода $T = 2(t_{и} + t_{п})$; частота $f = 1/T$.

Экспериментально установлено, что при воздействии постоянного ПОМП и индукции $B_y = 30$ мТл наблюдается максимальное приращение коэффициента α_p (рис. 2), что соответствует данным, установленным в работах [5, 6]. Определяли

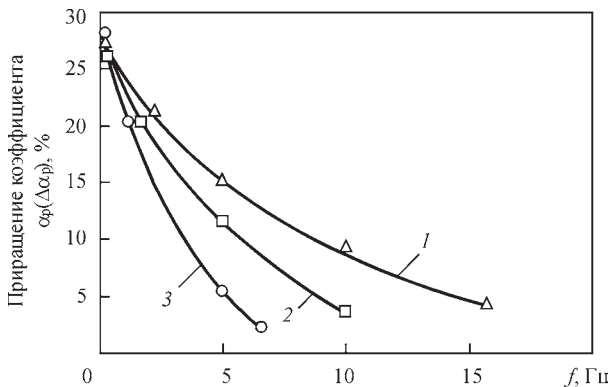


Рис. 2. Влияние частоты f ПОМП на приращение коэффициента α_p ($\Delta\alpha_p$) ($I_n = 480...520$ А; $U_d = 30...32$ В, $B_y = 30$ мТл): 1, 2, 3 — диаметры электродов соответственно 3, 4, 5 мм

также значения α_p проволок при наплавке без воздействия ПОМП. Данные показали (не приводим), что значения α_p проволок диаметром 3...5 мм при наплавке со значениями $I_n = 300...500$ А находятся в пределах 12,5...14,5 г/(А·ч), что соответствует общеизвестным положениям [8].

С увеличением частоты ПОМП эффект повышения α_p электродных проволок уменьшается, однако более резко, чем это ранее установлено в работах [5, 6] (рис. 2). Снижение эффекта увеличения α_p проволок связано с особенностями принудительного удаления капли с плавящегося их торца при воздействии различной частоты ПОМП.

Ниже приведена расчетная методика, позволяющая объяснить эффекты влияния ПОМП на коэффициент расплавления электродных проволок α_p при дуговой наплавке (сварке).

В настоящем исследовании, как отмечалось, использовали значения длительности пауз $t_{п} = 0,01$ с. Это связано с тем, чтобы в период паузы действия ПОМП (короткой паузы, $t_{п} = 0,01$ с) на торце электрода не скапливался значительный слой жидкого металла. Анализ показывает, что при наплавке (сварке) проволоками диаметрами 3; 4 и 5 мм и силе тока $I_n = 500$ А скорость подачи электродов составляет примерно $v_{п.э} = 2 \cdot 10^{-2}$ м/с (2 см/с). Тогда, если $t_{п} = 0,01$ с, то на торце электрода образуется слой жидкого металла толщиной $h = v_{п.э} \cdot t_{п} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-4}$ м = 0,2 мм, которым можно пренебречь.

Тогда упрощенно можно принять $t_{п} = 0$ и частоту ПОМП

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2(t_{и} + t_{п})}, \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2t_{и}}, \quad (2)$$

а длительность импульса

$$t_{и} = \frac{1}{2f}, \quad (3)$$

где f — частота ПОМП, Гц.

В работах [5, 6] установлено, что скос торца электрода при плавлении дугой проволоки не образуется, если частота ПОМП больше 1...2 Гц. Это положение принято в настоящем исследовании.

Примем, что на торце плавящегося электрода до воздействия импульсов ПОМП (B_y) имелась капля в виде полушара с радиусом шара $r = d/2$ (d — диаметр электродной проволоки, м).

В этом случае объем капли

$$V_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3; V_k = \frac{1}{12} \pi d^3, \text{ м}^3. \quad (4)$$

Масса капли

$$m = \rho V_k, \text{ кг}, \quad (5)$$

где ρ — плотность жидкого металла капли, кг/м^3 ,
 $\rho = 7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

На каплю действует (горизонтально) электромагнитная сила (в направлении оси X):

$$F'_{\text{эм}} = F_{\text{эм}} V_k, \text{ Н}, \quad (6)$$

где $F_{\text{эм}}$ — плотность электромагнитной силы в капле, Н/м^3 .

При данном токе наплавки I_H и действии индукции B_y :

$$F'_{\text{эм}} = \frac{4I_H}{\pi d^2} B_y \rho V_k, \text{ Н}. \quad (7)$$

Под действием силы $F'_{\text{эм}}$ капля объемом V_k получит ускорение

$$a = \frac{F'_{\text{эм}}}{m}, \text{ м/с}^2. \quad (8)$$

Тогда

$$F'_{\text{эм}} V_k = \rho V_k a; \quad F'_{\text{эм}} = \rho a. \quad (9)$$

С учетом (7) и (9) получим:

$$a = \frac{F'_{\text{эм}}}{\rho} = \frac{4I_H B_y}{\pi d^2}, \text{ м/с}^2. \quad (10)$$

Капля под действием силы $F'_{\text{эм}}$ удаляется (горизонтально вдоль оси X) со скоростью

$$V = \sqrt{2La}, \text{ м/с}. \quad (11)$$

где L — длина «разгона» капли на торце электрода, м.

Очевидно, что $L = d$, тогда

$$V = \sqrt{2da}, \text{ м/с}. \quad (12)$$

Время удаления капли с торца электрода (перемещения на пути $L = d$):

$$t = \sqrt{\frac{2d}{a}}, \text{ с}. \quad (13)$$

Минимальный уровень индукции B_y , удаляющий каплю при данной частоте:

$$B_y = \frac{2\rho\pi d^3 f^2}{I_H}, \text{ Тл}. \quad (14)$$

По формуле (14) вычисляли значение индукции B_y (как минимальный уровень), удаляющее каплю с торца электрода применительно к дуговой наплавке проволокой Св-08А диаметрами 3...5 мм, токе $I_H = 300...1000$ А и различной частоте f ПОМП. Данные показывают (рис. 3), что с ростом тока I_H (как это и следует ожидать по формуле (14)) и данной частоте ПОМП уровень индукции B_y , при которой капля удаляется с торца

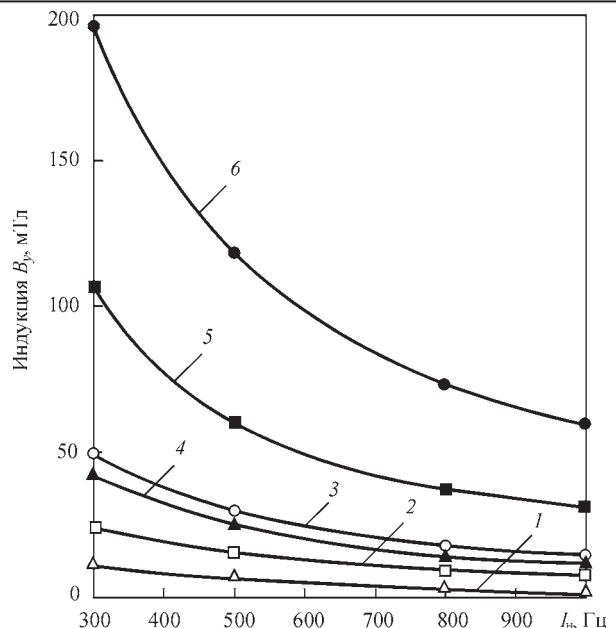


Рис. 3. Зависимость индукции B_y от тока наплавки I_H : 1, 4 — $d = 3$ мм; 2, 5 — $d = 4$ мм; 3, 6 — $d = 5$ мм; 1, 2, 3 — $f = 5$ Гц; 4, 5, 6 — $f = 10$ Гц

электрода, уменьшается. При увеличении частоты f ПОМП от 5 до 10 Гц уровень индукции B_y существенно возрастает. Это и понятно, ведь с ростом частоты f ПОМП уменьшается длительность действия импульса ($t_{\text{и}}$) ПОМП.

При заданном токе ($I_H = 500$ А на рис. 4) увеличение частоты f ПОМП приводит к резкому увеличению (по квадратичной зависимости в соответствии с формулой (14)) индукции B_y ПОМП. Это также обусловлено резким уменьшением длительности импульсов ($t_{\text{и}}$) ПОМП при увеличении частоты f ПОМП. Из рис. 4 следует, что при уровне индукции $B_y = 30$ мТл (и токе $I_H = 500$ А), при

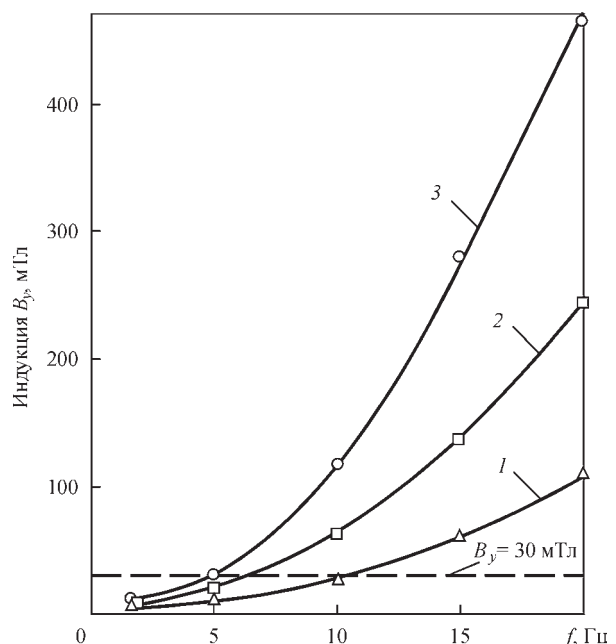


Рис. 4. Зависимость индукции B_y от частоты f ($I_H = 500$ А): 1, 2, 3 — диаметры проволок соответственно 3, 4, 5 мм

которой выполнены наплавки (рис. 2), уменьшение роста α_p связано с недостаточным уровнем индукции B_y .

Таким образом, эффект повышения коэффициента α_p в условиях воздействия при дуговой наплавке и сварке знакопеременного ПОМП заключается в достаточном уровне индукции B_y в импульсе ПОМП и длительности импульса t_i (и соответственно величины частоты) ПОМП.

Разработанная расчетная методика определения минимального уровня индукции B_y ПОМП при заданной частоте ПОМП позволяет не только объяснить наблюдаемые эффекты влияния знакопеременного ПОМП на производительность расплавления электродных проволок при дуговой наплавке под флюсом, но и рекомендовать оптимальные параметры такого ПОМП для дуговой наплавки (и сварки).

Следует отметить, что наблюдаемые эффекты повышения α_p при дуговой наплавке проволокой под флюсом имеют место при использовании и других проволок (как ферромагнитных, так и неферромагнитных, например, 06X18H10T). Вероятно, что, если увеличить длительность пауз (t_n) прямоугольных импульсов при заданной (или близкой частоте f ПОМП), то эффект влияния ПОМП на α_p проволок при дуговой наплавке (при данной частоте и уровне индукции B_y) будет снижаться. Следует принять как оптимальное значение $t_n = 0,01...0,02$ с.

Следует отметить, что при сварке и наплавке только знакопеременное ПОМП улучшает формирование швов и наплавленных валиков. Знакопеременное ПОМП индуцирует потоки жидкого металла в сварочной ванне из головной ее части в хвостовую и обратно. Это приводит к измельчению структурных составляющих металла шва (наплавленного валика), что повышает механические свойства швов и наплавленного металла [3, 5]. Эффективным при этом является использование знакопеременного ПОМП частотой до 20 Гц [3, 5, 7].

В настоящей работе, как и в работах [5, 6] использовали УВ ПОМП, на стержнях которого размещали обмотки (катушки) из изолированного медного провода с числом витков $W = 100...150$. Чтобы обмотки не перегревались, в них ток не должен превышать 20 А. При этом в зоне электродной капли и головной части ванны обеспечивается поперечная компонента индукции ПОМП (B_y) порядка 30 мТл, достаточная для управления переносом электродных капель и индуцирования потоков в жидком металле ванны (при $f = 10...20$ Гц). Увеличение числа витков в обмотках или диаметра их провода увеличивает гро-

мозкость конструкции УВ ПОМП (при стремлении достичь уровня $B_y = 60$ мТл и выше, см. рис. 4). Поэтому следует рекомендовать к применению ПРМП частотой не выше 15...20 Гц (лучше — 5...10 Гц). При этом повышение α_p достигает значений до 15 г/(А·ч), что повышает производительность процессов дуговой наплавки и сварки. Следует отметить, что для удобства выполнения этих процессов желательно использовать поперечное относительно оси шва (валика) расположение стержней УВ ПОМП.

Выводы

1. При дуговой наплавке проволокой под флюсом с ростом частоты знакопеременного поперечного магнитного поля снижается эффект повышения коэффициента расплавления электродов до нулевых значений при частотах порядка 10...20 Гц ПОМП.

2. Разработана расчетная методика, позволяющая определить минимальное значение поперечной компоненты индукции ПОМП, удаляющей каплю с плавящегося торца электродной проволоки при заданной частоте этого поля. Приведены расчетные значения минимального уровня индукции знакопеременного ПОМП, которые позволили объяснить эффекты влияния такого ПОМП на коэффициент расплавления электродных проволок при дуговой наплавке (сварке).

3. При дуговой наплавке и сварке проволокой под флюсом для обеспечения не только удаления электродных капель с торца электродов и повышения производительности их расплавления, но и для эффективного перемешивания жидкого металла в ванне целесообразно применять знакопеременное ПОМП частотой до 10 Гц.

Список литературы

1. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2018) Влияние поперечного магнитного поля на геометрию валиков при восстановлении изделий. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць*, 44, сс. 77–79.
2. Razmyshlyayev A. D., Ahieieva M.V. (2018) TMF Influence on Weld Structure at the Welding of 12X18H9T. *Materials Science Forum*, 927, 1–5, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.927.1>
3. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2018) О механизме измельчения структуры металла шва при дуговой сварке с воздействием магнитных полей (Обзор). *Автоматическая сварка*, 3, 29–33.
4. Морозов В.П. (2006) Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений. *Известия вузов. Машиностроение*, 8, 41–54.
5. Размышляев А.Д., Выдмыш П.А., Агеева М.В. (2017) *Автоматическая электродуговая сварка под флюсом с воздействием внешнего магнитного поля*. Мариуполь, ПГТУ.
6. Размышляев А.Д., Серенко А.Н., Выдмыш П.А., Агеева М.В. (2015) Расчет индукции поперечного магнитного поля, обеспечивающей удаление капли с торца электрода

- при дуговой наплавке. *Вісник Призовського державного технічного університету. Зб. наук. праць*, 30, сс. 7–14.
7. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2018) К расчету численных значений индукции управляющего поперечного магнитного поля в головной части сварочной ванны. *Наука та виробництво. Міжвуз. тематичний зб. наук. праць*, 19, сс. 51–59.
 8. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. (1977) *Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов ВУЗов*. Москва, Машиностроение
 3. Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, 3, 25-28.
 4. Morozov, V.P. (2006) Analysis of conditions of refined structure formation in crystallization of weld pool metal under superposition of external periodic perturbations. *Izv. Vuzov. Mashinostroenie*, 8, 41-54 [in Russian].
 5. Razmyshlyayev, A.D., Vydmysh, P.A., Ahieieva, M.V. (2018) *Automatic submerged-arc welding under action of external magnetic field*. Mariupol, PGU [in Russian].
 6. Razmyshlyayev, A.D., Serenko, A.N., Vydmysh, P.A., Ahieieva, M.V. (2015) Calculation of transverse magnetic field providing drop detachment from electrode tip in arc surfacing. *Visnyk Pryazov. DTU*, 9, 7-14 [in Russian].
 7. Razmyshlyayev, A.D., Ahieieva, M.V. (2018) To calculation of numerical values of induction of transverse control magnetic field in head part of welding pool. *Nauka ta Vyrobnystvo: Transact.*, 9, 51-59 [in Russian].
 8. Akulov, A.I., Belchuk, G.A., Demyantsevich, V.P. (1977) *Technology and equipment of fusion welding: Manual for students of higher education institutes*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

References

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ЗНАКОЗМІННОГО ПОПЕРЕЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ, ВПЛИВАЮЧОГО НА ПЕРЕНЕСЕННЯ КРАПЕЛЬ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕННІ

О. Д. Размышляев¹, М.В. Агеева²

¹ДВНЗ «Призовський державний технічний університет».

87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7. E-mail: razmyshlyayev@gmail.com

²Донбаська державна машинобудівна академія.

84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72. E-mail: maryna_ah@ukr.net

Показано, що при дуговому наплавленні дротом під флюсом з впливом постійного поперечного магнітного поля коефіцієнт розплавлення електродних дрітків діаметром 3...5 мм підвищується на 25...30%. Експериментально встановлено, що при дії знакозмінного поля при незмінному рівні поперечної компоненти індукції ефект підвищення коефіцієнта розплавлення дрітків залежить від частоти цього поля. При збільшенні частоти поля до 10...20 Гц приріст коефіцієнта розплавлення знижується до нульових значень. Розроблено методику для визначення мінімального рівня поперечної компоненти індукції поля в зоні електродної краплі, при якій крапля видаляється з торця електрода, що плавиться. Показано, що ефект зниження коефіцієнта розплавлення при збільшенні частоти поля зумовлений зменшенням тривалості імпульсів. Наведено розрахункові дані, що дозволяють визначити оптимальні значення індукції і частоти знакозмінного поля, при яких підвищується коефіцієнт розплавлення дрітків при дуговому наплавленні (зварюванні) під флюсом. Бібліогр. 8, рис. 4.

Ключові слова: дугове наплавлення (зварювання), поперечне магнітне поле, індукція, коефіцієнт розплавлення електрода, частота, розрахункова методика

CALCULATION OF THE CHARACTERISTICS OF ALTERNATING TRANSVERSE MAGNETIC FIELD AFFECTING DROP TRANSITION IN ARC WELDING AND SURFACING

A.D. Razmyshlyayev¹, M.V. Ahieieva²

¹SHEI «Priazov State Technical University», 7 Universitetskaya Str., 87500, Mariupol, E-mail: razmyshlyayev@gmail.com

²Dobass State Mechanical Academy, 72 Akademicheskaya Str., 84413, Kramatorsk. E-mail: maryna_ah@ukr.net

It is shown that in submerged-arc surfacing with the impact of constant transverse magnetic field the coefficient of melting of electrode wires of 3-5 mm diameter increases by 25 – 30%. It is experimentally established that at the impact of an alternating field at unchanged level of the transverse component of induction, the effect of increase of the coefficient of melting depends on the frequency of this field. At increase of the field frequency up to 10 – 20 Hz, the increment of the coefficient of melting decreases to zero values. A procedure was developed for determination of the minimum level of transverse component of field induction in the electrode drop zone, at which the drop is detached from the melting electrode tip. It is shown that the effect of lowering of the coefficient of melting at increase of the field frequency is due to reduction of pulse duration. The paper gives the calculated data, allowing determination of optimum values of induction and frequency of the alternating field, at which the coefficient of wire melting at submerged-arc surfacing (welding) is increased. 8 Ref., 4 Fig.

Keywords: arc surfacing (welding), transverse magnetic field, induction, electrode melting coefficient, calculation procedure

Поступила в редакцію 06.03.2019