

## ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 621.791.75

© Размышляев А.Д.<sup>1</sup>, Серенко А.Н.<sup>2</sup>, Выдмыш П.А.<sup>3</sup>, Агеева М.В.<sup>4</sup>

### РАСЧЕТ ИНДУКЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ УДАЛЕНИЕ КАПЛИ С ТОРЦА ЭЛЕКТРОДА ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

Показано, что при наплавке с воздействием поперечного магнитного поля (ПОМП) образуется скос торца электрода, и при увеличении индукции ПОМП угол скоса по отношению к горизонту увеличивается. В расчетной методике использован метод баланса следующих интегральных сил, действующих на каплю при наплавке с воздействием ПОМП: электромагнитная сила от взаимодействия тока наплавки в капле с поперечной компонентой индукции ПОМП; сила поверхностного натяжения капли и сила веса капли. Каплю на торце электрода аппроксимировали полуэллипсоидом. Установлено, что при токе наплавки  $I_n=500$  А индукция ПОМП, при которой происходит отрыв капли от торцов электродов, составляет примерно 20 мТл. При увеличении тока наплавки уровень такой индукции ПОМП уменьшается.

**Ключевые слова:** дуговая наплавка под флюсом, поперечное магнитное поле, коэффициент расплавления электрода, индукция.

*Размышляев О.Д., Серенко О.М., Выдмыш П.О., Агеева М.В. Розрахунок індукції поперечного магнітного поля, що забезпечує видалення краплі з торця електроду при дуговому наплавленні. Показано, що при наплавленні з дією поперечного магнітного поля (ПОМП) утворюється скос торця електроду, і при збільшенні індукції ПОМП кут скосу по відношенню до горизонту збільшується. У розрахунковій методиці використаний метод балансу наступних інтегральних сил, що діють на краплю при наплавленні з дією ПОМП: електромагнітна сила від взаємодії струму наплавлення в краплі з поперечною компонентою індукції ПОМП; сила поверхневого натягнення краплі і сила ваги краплі. Краплю на торці електроду апроксимували напівеліпсоїдом. Встановлено, що при струмі наплавлення  $I_n=500$  А індукція ПОМП, при якій відбувається відрив краплі від торців електродів, складає приблизно 20 мТл. При збільшенні струму наплавлення рівень такої індукції ПОМП зменшується.*

**Ключові слова:** дугове наплавлення під флюсом, поперечне магнітне поле, коефіцієнт розплавлення електроду, індукція.

**O.D. Razmyshlyayev, O.M. Serenko, P.O. Vydyмыш, M.V. Ageeva. Calculation induction of transversal magnetic paul, providing removing of drop from butt end of electrode at surfacing arc. A computation method to determine the induction minimum level of the stationary transverse magnetic field (TMF) has been offered; given the field removing drops from the butt ends of electrodes 3, 4, 5mm in diameter that results in an increase of the electrodes melting productivity. Research has shown that building up under transverse magnetic field (TMF) results in the slant of the butt ends of the electrode, and TMF**

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [razmyshlyayev@rambler.ru](mailto:razmyshlyayev@rambler.ru)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь,

<sup>3</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [byohuk@mail.ru](mailto:byohuk@mail.ru)

<sup>4</sup> канд. техн. наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

*induction increasing the slant angle in relation to the horizon increases. The computation method takes account of the slant on the butt end of the electrode. The method of balance of the followings integral forces, acting on a drop at building up under TMF is used in the computation method: electromagnetic force resulting from building-up current in the drop and TMF induction transverse constituent interaction; the force and the drop weight force. The drop on the electrode butt end was approximated as a semiellipsoid. It has been stated that at the building-up current is equal to 500A, TMF induction of TMF, at which the drop tears away from the butt ends of the electrodes, does not much depend on the diameter of the electrodes and is approximately 20 mTl. Current increasing, induction of TMF diminishes. It is true for the height of the drop equal the electrode radius. The height of the drop reducing by one half, the induction is doubled. The calculated information was checked experimentally. THF induction is taken to be minimum if the electrode melting coefficient is increased by 5% as compared to that at hidden arc building-up at no-TMF conditions. The experimental and the calculated data agree very closely for 3 and 4mm diameter electrodes. For 5mm diameter electrodes the experimental data are less than the calculated data. Can it be explained that at melting 5mm diameter electrode the drops are bigger than at melting 3mm diameter electrode, that resulting in more effective induction. The data can be recommended for being used for hidden arc building-up with TMF.*

**Keywords:** *hidden arc building-up, transverse magnetic field, electrode melting coefficient, induction.*

**Постановка проблеми.** Воздействие поперечного магнитного поля (ПОМП) при дуговой сварке и наплавке проволокой под флюсом позволяет увеличить коэффициент расплавления электродного металла, управлять глубиной проплавления основного металла, измельчать структуру металла шва, а также прочностными характеристиками шва (наплавленного металла).

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [1, 2] показано, что воздействие постоянного ПОМП увеличивает коэффициент расплавления электродной проволоки ( $\alpha_p$ ) при дуговой наплавке под флюсом на 20...25%. Показано, что ПОМП повышает ( $\alpha_p$ ) электродов как из немагнитных материалов (12X18H10T), так из ферромагнитных материалов (например, Св-08ГА). Однако, нет исследований по определению минимального уровня поперечной компоненты индукции ПОМП в зоне электродной капли, при которой обеспечивается удаление капли с торца электрода и тем самым – повышение производительности расплавления электрода (коэффициента  $\alpha_p$ ). Нет расчетной методики, позволяющей определить этот минимальный уровень индукции ПОМП для повышения  $\alpha_p$  проволок при дуговой наплавке (сварке) под флюсом.

**Цель статьи** – определение минимального уровня индукции ПОМП, обеспечивающего удаление капли с торца электрода при дуговой наплавке и сварке.

**Изложение основного материала.** Для создания ПОМП использовали устройство ввода (УВ) в виде П-образного электромагнита. Стержни электромагнита в виде набора из листов электротехнической стали имели сечение 3x3 см. На наклонных стержнях электромагнита размещены катушки с числом витков  $W=100$  в одной катушке. Схема устройства ввода (УВ) ПОМП и подробное его описание приведены в работе [2]. Выполняли наплавки проволоками Св-08А и Св-12Х18Н10Т диаметрами 3, 4 и 5 мм под флюсом АН-26П на пластины из стали 12Х18Н10Т автоматом АДС-1002 от выпрямителя ВДУ-1202 (при падающей внешней характеристике) на обратной полярности. Катушки УВ ПОМП питали от сварочного выпрямителя ВСЖ-303.

При выполнении наплавки с воздействием постоянного ПОМП быстро выключали дугу и поднимали вверх электрод. На каждом режиме выполняли не менее трех экспериментов. Анализировали виды оплавленных дугой торцов электродов. Характерной особенностью является то, что все торцы имели скосы под углом  $\alpha$  к горизонту при наплавке с воздействием постоянного ПОМП для всех диаметров электродов. Типичные виды торцов электродов получены при сварке без воздействия ПОМП и с воздействием постоянного ПОМП, приведены на рис. 1. Величина угла  $\alpha$  возрастает при увеличении индукции постоянного ПОМП (рис. 2).



Рис. 1 – Види оплавлених торців електродів при дуговій наплавці под флюсом ( $d_3 = 4$  мм;  $I_n = 470 \dots 500$  А,  $U_d = 30 \dots 32$  В): а – без поля; б, в – постійне ПОМП с індукцією відповідно 10 і 17 мТл

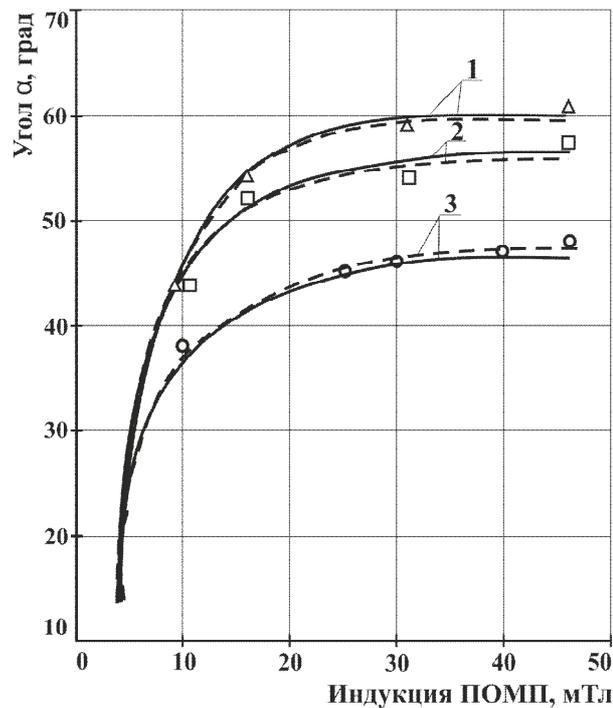


Рис. 2 – Зависимість угла  $\alpha$  від індукції ПОМП ( $I_n=500$  А) для електродів діаметрами: 1 –  $\Delta$  – 3 мм, 2 –  $\square$  – 4мм, 3 –  $\circ$  – 5мм. (прямі лінії – експериментальні дані, пунктирні лінії – розрахункові дані)

Характерно, що при смені полярності підключення катушок УВ ПОМП напрямлення угла  $\alpha$  змінювалось на протилежне, але величина угла  $\alpha$  не змінювалась. Наявність цього угла при наплавці дротом з впливом ПОМП є важливим фактором, який ухвалювали при побудові розрахункових схем.

Для розрахунку мінімального рівня індукції ПОМП використовували метод балансу інтегральних сил, викладений в роботі [3].

В розрахунковій схемі прийнято, що індукція ПОМП рівномірно розподілена в зоні електродної краплі на торці електрода (рис. 3). Краплю на торці електрода апроксимували напівеліпсоїдом (рис. 3).

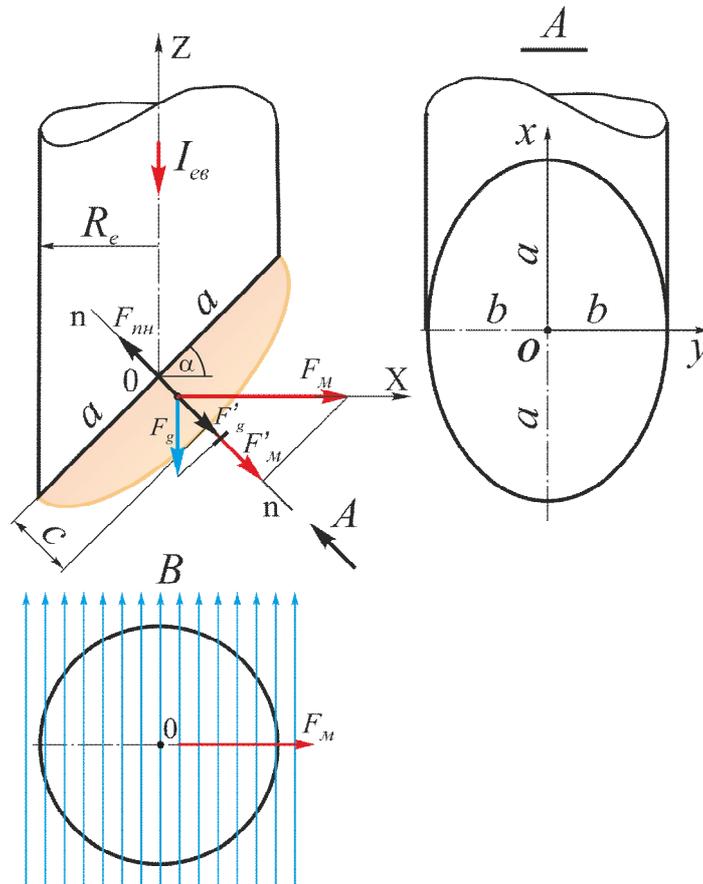


Рис. 3 – Схема к расчету действия основных сил на каплю эллипсоидной формы (обозначения сил в тексте)

В расчетах принято, что на жидкую каплю действуют следующие силы:

$F'_M$  – сила от взаимодействия тока наплавки в электроде (капле) с вектором индукции  $B_y$  ПОМП, отрывающая каплю от торца электрода со скосом (вдоль нормали n-n);

$F_{nn}$  – сила поверхностного натяжения капли, удерживающая каплю на торце электрода со скосом (вдоль нормали n-n);

$F_g$  – сила тяжести, направленная вниз вдоль от OZ.

Определяли проекции всех сил на нормаль n-n (рис. 3)

$$\left. \begin{aligned} F'_M &= F_M \cdot \sin \alpha; \\ F_M &= j_k \cdot B_y \cdot V_k; \\ j_k &= j_\vartheta = \frac{I_n}{\pi R_\vartheta^2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $j_k$  – плотность тока в капле, А/м<sup>2</sup>;

$R_\vartheta$  – радиус электрода, м;

$V_k$  – объем капли, м<sup>3</sup>;

$I_n$  – ток наплавки, А.

Плотность тока в капле ( $j_k$ ) принята равной плотности тока в электроде из следующих соображений. Удельное сопротивление твердого металла у торца (скоса) электрода по литературным данным незначительно (на 5...10%) меньше, чем удельное сопротивление жидкого металла капли. Вследствие этого линии тока в капле имеют то же самое направление, что и линии тока в электроде, то есть вдоль оси OZ (рис. 3). При этом весь ток наплавки ( $I_n$ ) протекает через каплю. Столб дуги имеет наклон под действием ПОМП таким образом, что его ось нормальна к поверхности скоса торца электрода.

Объем капли [4]:

$$V_k = \frac{2}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c, \quad (2)$$

где  $a, b, c$  – длины полуосей полуэллипсоида (рис. 3), м.

Сила  $F_{nn}$  определялась по формуле:

$$F_{nn} = \sigma \cdot L, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкого металла капли, Н/м;

$L$  – длина периметра эллипса, м.

Проекция сил тяжести капли на нормаль n-n:

$$F_g' = \gamma \cdot V_k \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – плотность металла капли, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \frac{м}{с^2}$ .

Капля отрывается с торца электрода со скосом вдоль оси n-n при условии:

$$F' \geq F_{nn}' - F_g'. \quad (5)$$

Длину периметра эллипса определяли по формуле [4]:

$$L = \pi \left[ (a+b) \frac{64-3\xi^4}{64-16\xi^2} \right], \text{ м}, \quad (6)$$

где  $\xi = \frac{a-b}{a+b}$ .

С учетом всех составляющих из уравнения (5) величина индукции  $B_y$ :

$$B_y = \frac{\pi R_e^2}{I_n} \left( \frac{\sigma \cdot L}{V_k \cdot \sin \alpha} - \gamma \cdot g \cdot \text{ctg} \alpha \right). \quad (7)$$

Экспериментальные данные зависимости угла  $\alpha$  от диаметра электрода и индукции  $B_y$  ПОМП в диапазоне значений  $B_y=10\dots 50$  мТл достаточно точно аппроксимируются формулой (рис. 2):

$$\alpha(B_y) = \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(200 \cdot B_y)} \right] \cdot (70 - d_e^{1.9}), \text{ град}, \quad (8)$$

где  $B_y$  – индукция, Т;  $d_e$  – диаметр электрода, мм.

Выполняли расчет минимальных значений индукции  $B_y$  ПОМП, отрывающих каплю от торца электрода при  $I_n=500$  А,  $\gamma=7 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma=1$  Н/м для электродов диаметрами 3, 4, 5 мм и различных углах  $\alpha$ . Данные (рис. 4) показали, что величина индукции  $B_y$  значительно зависит от угла  $\alpha$  в диапазоне его значений  $5^\circ \dots 20^\circ$ , а при дальнейшем увеличении угла  $\alpha$   $B_y$  мало изменяется (рис. 4). При этом индукция  $B_y$  практически одинакова для диаметров электродов 3, 4 и 5 мм.

Определили минимальный уровень индукции  $B_y$  ПОМП, удаляющей капли с торцов электродов диаметрами 3, 4 и 5 мм, с учетом зависимости угла  $\alpha$  от индукции  $B_y$  (8) в диапазоне токов  $I_n=300\dots 1000$  А. Данные показывают, что с увеличением тока  $I_n$  уровень индукции  $B_y$  уменьшается (рис. 5).

Эти данные получены при значениях высоты капли  $c=R_e$  (см. рис. 3). Если уменьшить высоту капли (параметр  $c$ ) в 2 раза, то значения  $B_y$  увеличиваются в 2 раза.

Расчетные данные проверяли экспериментально. При этом принимали, что минимальный уровень индукции  $B_y$  ПОМП такой, при котором коэффициент расплавления электрода ( $\alpha_p$ ) увеличивается на 5% по сравнению с его значением при наплавке под флюсом без воздействия ПОМП. Экспериментальные данные об уровне  $B_y$  хорошо совпали для электродов диаметрами 3 и 4 мм. Для электродов диаметрами 5 мм экспериментальные данные меньше расчетных (рис. 5). Это можно объяснить тем, что при плавлении электрода диаметром 5 мм образуются более крупные капли, чем при плавлении электрода, например, диаметром 3 мм, и из-за этого реализуется более эффективное воздействие индукции  $B_y$  ПОМП на каплю и повышение  $\alpha_p$ .

електрода діаметром 5 мм.

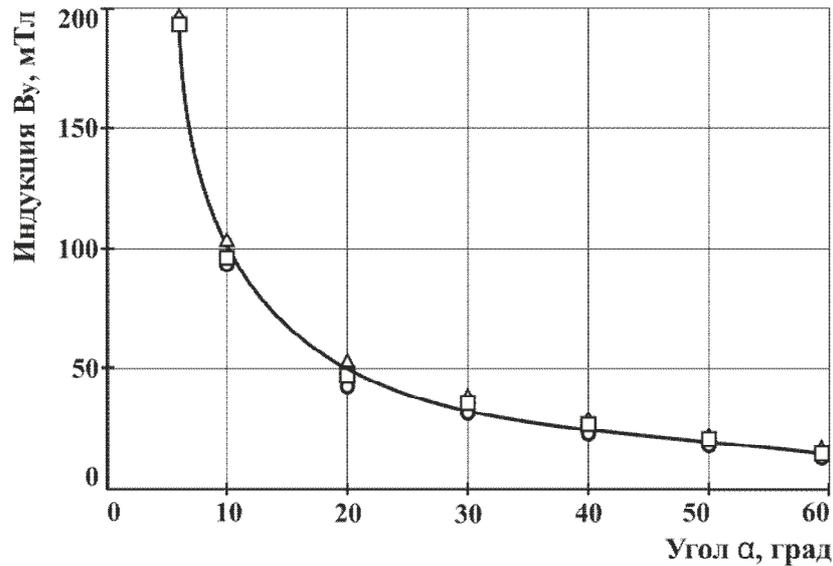


Рис. 4 – Зависимость индукции  $B_y$  от угла  $\alpha$  ( $I_n=500$  А) для электродов диаметрами:  $\Delta$  – 3 мм,  $\square$  – 4мм,  $\circ$  – 5мм

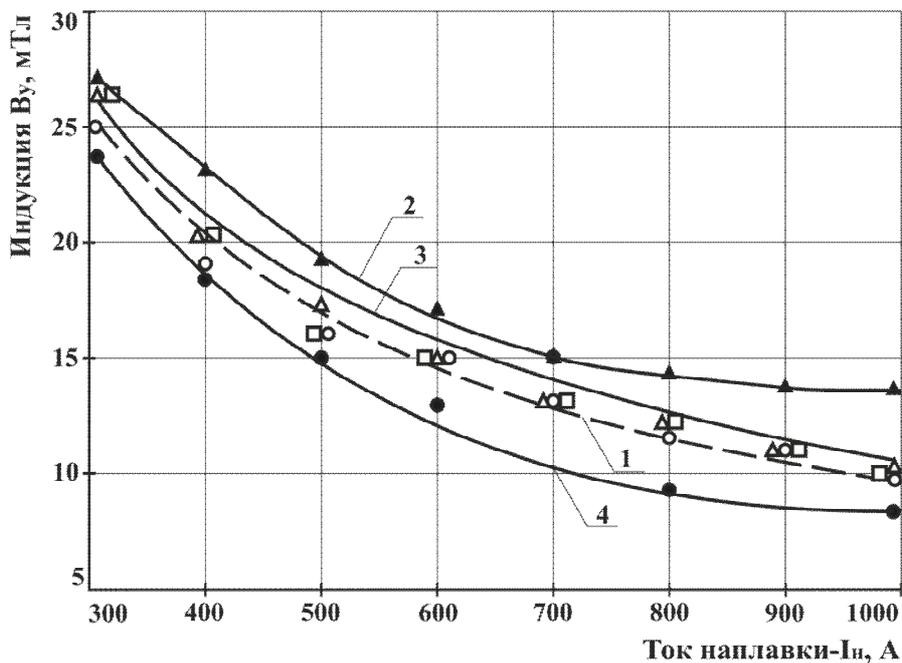


Рис. 5 – Зависимость индукции  $B_y$  от тока наплавки ( $\alpha=45^\circ$ ) для электродов диаметрами:  $\Delta$  – 3 мм,  $\square$  – 4мм,  $\circ$  – 5мм ( 2, 3, 4 – экспериментальные данные)

Исследовали влияние угла  $\alpha$  на индукцию  $B_y$  при одинаковой плотности тока в электродах для диаметров электродов 3, 4, 5 мм. Данные показали, что уровень индукции  $B_y$  уменьшается при увеличении угла  $\alpha$ . При этом сказывается влияние угла  $\alpha$  на индукцию  $B_y$ , и при уменьшении диаметра электрода уровень индукции  $B_y$  при данном значении угла  $\alpha$  увеличивается (рис. 6).

Следует отметить, что полученные расчетные данные являются оценочными. Эти данные, однако, можно рекомендовать для назначения параметров ПОМП для практического использования при дуговой наплавке либо сварке проволокой под флюсом.

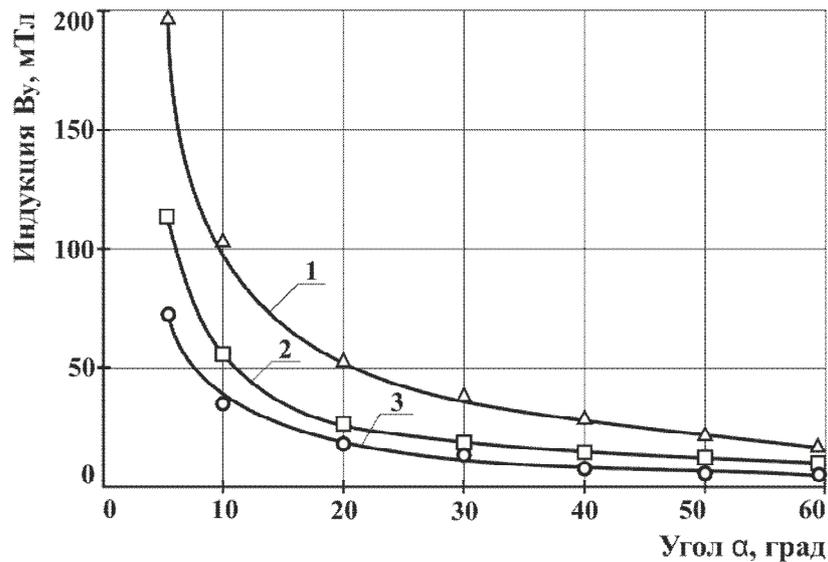


Рис. 6 – Зависимость индукции  $B_y$  от угла  $\alpha$  при одинаковой плотности тока в электродах ( $j=70,8 \text{ A/m}^2$ ): 1, 2, 3–диаметры электродов 3, 4, 5 мм

#### Выводы

1. При дуговой наплавке под флюсом с воздействием постоянного ПОМП образуется скос торца электрода под углом  $\alpha$  к горизонту, величина этого угла возрастает от 38 до 62 градусов при увеличении индукции ПОМП от 10 до 45 мТл.
2. Разработана методика, основанная на учете сил, действующих на каплю при наплавке с воздействием ПОМП, позволяющая определить минимальный уровень индукции ПОМП, обеспечивающий отрыв капли с торца электродной проволоки и повысить коэффициент ее расплавления.

#### Список использованных источников:

1. Производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля / А.Д. Размышляев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2011. – №5. – С. 48-51.
2. Производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля / А.Д. Размышляев [и др.] // Вісник Донбаської державної машинобудівельної академії : Зб. наук. пр. / ДДМА. – Краматорськ, 2011. – №1(22). – С.140-147.
3. Березовский Б.М. Давление дуги, дефекты сварных швов, перенос электродного металла / Б.М. Березовский. – Челябинск : Юур ГУ, 2003. – 485 с. – (Математические модели дуговой сварки : в 3-х т.; Т. 3).
4. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1986. – 544 с.

#### Bibliography:

1. Electrode wire melting productivity of at arc surfacing under a flux with transversal magnetic field influence / A.D. Razmyshlyayev [et al.] // Avtomaticheskay svarka. – 2011. – №5. – P. 48-51. (Rus.)
2. Electrode wire melting productivity of at arc surfacing under a flux with transversal magnetic field influence / A.D. Razmyshlyayev [et al.] // Herald of the Donbass State Engineering Academy : Collection of science papers / DSEA. – Kramators'k, 2011. – №1(22). – P. 140-147. (Rus.)
3. Berezovskiy B.M. The pressure of the arc, defects in welds, the transfer of electrode metal / B.M. Berezovskiy. – Chelyabinsk : Yuur GU, 2003. – 485 p. – (Mathematical models of arc welding : in 3 vol.; Vol. 3). (Rus.)

4. Bronshteyn I.M. Handbook of mathematics for engineers and students of higher technical educational institutions / I.M. Bronshteyn, K.A. Semendyaev. – М. : Nauka, Home edition of Physical and Mathematical Literature, 1986. – 544 p. (Rus.)

Рецензент: В.В. Чигарев  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 02.03.2015

УДК 621.311

© Гудим В.І.<sup>1</sup>, Янків В.В.<sup>2</sup>, Мамцяж Д.<sup>3</sup>

### АНАЛІЗ ГАРМОНІК В МЕРЕЖАХ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

*В роботі наведено результати експериментальних досліджень спектру гармонік в електричних контурах електродугового зварювального апарату змінної напруги, які він генерує під час технологічного процесу та основні енергетичні параметри, які негативно впливають на мережі електроживлення напругою 0,4/0,23 кВ.*

**Ключові слова:** електродугові зварювальні апарати, вищі гармоніки, мережа електроживлення.

*Гудым В.И., Янкив В.В., Мамцяж Д. Анализ гармоник в сети электросварочного оборудования переменного напряжения. В работе приведены результаты экспериментальных исследований спектра гармоник в электрических контурах электродугового сварочного аппарата переменного напряжения, которые он генерирует при технологическом процессе и основные энергетические параметры, которые негативно влияют на сети электропитания напряжением 0,4 / 0,23 кВ.*

**Ключевые слова:** электродуговые сварочные аппараты, высшие гармоники, сеть электропитания.

*V.I. Hudym, V.V. Yankiv, D. Mamcaj. Analysis of harmonics in the power supply networks of electric welding equipment of alternating voltage. Electric arc welding is widely used in construction and engineering for rigid connections of metal elements. Substantial nonlinearity of dynamic voltage-current characteristics of electric arcs in such equipment is a source of distortion in current and voltage sinusoids at the points of other electric receivers parallel joints. The voltage fluctuations from the nominal value result in changing luminous flux of bulbs, while current higher harmonics result in additional losses in electric motors. However, the problem of electric welding equipment influence on power lines wasn't paid proper attention to. Therefore, this work is to research electric arc equipment influence on power lines in order to find out the values and the spectrum of higher harmonics, and the prevailing amplitudes dynamics of change. In this paper the results of experimental researches of harmonics spectrum in electrical circuits of electric arc welding machine of alternating voltage that it generates during the technological process and the main energy parameters, that influence negatively on the power supply networks of 0,4/0,23 kV. Analyzing the results of the measurements we come to the conclusion that if the load factor is about 35% the power coefficient of the welding machine is 0,46, that is rather low. Such a result is economically disadvantageous since high*

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів; Краківська політехніка, м. Краків, Польща

<sup>2</sup> викладач, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, [JankivVasyl@gmail.com](mailto:JankivVasyl@gmail.com)

<sup>3</sup> асистент, Краківська політехніка, м. Краків, Польща