



Stanislav V. Dragan
Драган
Станислав
Владимирович

УДК 621.791.92
В 80

INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY ELECTRODE VIBRATIONS ON THE GEOMETRY OF PENETRATION AT AUTOMATIC SUBMERGED ARC CLADDING

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОДА НА ГЕОМЕТРИЮ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАПЛАВКЕ ПОД ФЛЮСОМ

DOI 10.15589/SMI.2015.01.02

Stanislav V. Dragan

С. В. Драган, канд. техн. наук, проф. НУК¹
stanslav.dragan@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0001-8634-782X

Yuriy A. Yaros

Ю. А. Ярослав, канд. техн. наук²
yaros.amity.mk.ua@gmail.com
ORC ID: 0000-0002-5274-3514

Ivan V. Simutenkov

И. В. Симутенков, магистр¹
ivan.simutienkov@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0002-2896-2637

Vasiliy Ya. Trembich

В. Я. Трэмбич, студент¹
rememberme07@yandex.ru
ORC ID: 0000-0003-2996-675X



Yuriy A. Yaros
Ярос
Юрий
Александрович

¹Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev

²AMITI Research and Production Enterprise Ltd, Nikolaev

¹Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

²ООО научно-производственная фирма «АМИТИ», г. Николаев

Abstract. High-frequency oscillations electrodes for automatic submerged arc cladding, along with providing managed metal transfer and improved productivity melting electrode — an effective management tool geometry penetration.

The purpose of this work—design and experimental evaluation of the influence of the geometry of penetration of the high-frequency oscillations electrodes in submerged arc cladding.

Based on the analysis of the speed of the arc for high-frequency oscillations electrodes found that with increasing amplitude of the oscillation frequency increases and the average speed of the electrode tip and arc cladding. When vibrations of the electrode tip with a frequency of 1 Hz and amplitude of 10 mm can be regarded as an arc of a fast-heating source. The speed of movement of such a source is ten times greater than the rate of propagation of heat in the base metal. Therefore, electrode oscillation with amplitude greater than the width of the weld bead results in loss of depth and area of penetration during cladding with high-frequency oscillations electrodes. This pattern is confirmed by calculations using the model of the moving heat source of finite width.

Based on the ratio between the speed of movement of the heat source and heat propagation in base metal, established three areas of influence of the frequency and amplitude of the high-frequency oscillations electrodes on the technological characteristics of the arc process and the geometry of the metal penetration zone:

- 1) the influence of the geometry of the penetration zone and there is no transfer of metal;
- 2) melting of the electrode performance, the nature and geometry of the managed transfer penetration zone defined by the relation between frequency and amplitude of vibration;
- 3) the quality of the formation of the deposited layer decreases sharply due to violation of the stability of the arc at high speed of its movement.

Based on the records of thermal cycles points in the heating zone confirmed the influence of the geometry of the high-frequency oscillations electrodes penetration and the propagation of heat in the base metal. Found that variations in cladding a temperature of 250 Hz test points, located transversely at a distance of 6 mm from the roll axis at 60 °C (15%) than the value obtained by cladding without vibration. This is because increasing the amplitude of the oscillations increases the heat flow dispersion zone decreases weld metal bath superheat increases the thermal efficiency of the fusion process and, as a consequence, increases the penetration area. This pattern persists as long as the heat surrounding layers of solid based metal will not



Ivan V. Simutenkov
Симутенков
Иван
Викторович



Vasiliy Ya. Trembich
Трэмбич
Василий
Ярославович

exceed the influx of heat from the heating source. Further growth of the oscillation amplitude will increase the width of the weld pool and reduce the depth and area of penetration. The dependence is confirmed by the results of the calculation. Established laws allow by calculation to determine the size and shape of the penetration zone for automatic submerged arc cladding with the high-frequency oscillations electrodes, as well as serve as a basis for selecting parameters oscillation mode to control the geometry of the deposited layer.

Keywords: submerged arc cladding; electrode vibrations; temperature field; the area of penetration; metal transfer.

Аннотация. Приведены результаты исследования влияния скорости перемещения источника нагрева — сварочной дуги при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода на температурное поле в основном металле и геометрию зоны проплавления. Расчетным путем определены области, соответствующие различному эффекту от воздействия параметров поперечных высокочастотных колебаний электрода на устойчивость дуги, характер переноса металла и геометрию зоны проплавления.

Ключевые слова: наплавка под флюсом; колебания электрода; температурное поле; зона проплавления; перенос металла.

Анотація. Наведено результати дослідження впливу швидкості переміщення джерела нагріву — зварювальної дуги при автоматичному наплавленні під флюсом з високочастотними коливаннями електрода на температурне поле в основному металі та геометрію зони проплавлення. Розрахунковим шляхом визначено області, що відповідають різному ефекту від впливу параметрів поперечних високочастотних коливань електрода на стійкість дуги, характер перенесення металу та геометрію зони проплавлення.

Ключові слова: наплавлення під флюсом; коливання електрода; температурне поле; зона проплавлення; перенесення металу.

References

Alov A. A., Vinogradov V. S. Vliyanie vibratsii elektroda na protsess dugovoy svarki i svoystva shvov [Effect of electrode vibration on the arc welding process and the properties of welds]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding production*, 1958, no. 9, pp. 19–22.

Goloborodko Zh. G., Dragan S. V., Simutenkov I. V. Avtomaticheskaya naplavka pod flyusom konstruktivnykh staley s poperechnymi vysokochastotnymi peremeshcheniyami elektroda [Automatic submerged arc cladding of structural steels with transverse high-frequency movements of the electrode]. *Avtomaticheskaya svarka — The Paton Welding Journal*, 2013, no. 6, pp. 35–38.

Dragan S. V., Simutenkov I. V., Ignatenkov O. V. Metodika opredeleniya parametrov vysokochastotnykh mekhanicheskikh kolebaniy elektroda pri avtomaticheskoy naplavke pod flyusom [Method of calculating the high-frequency mechanical vibrations of electrode at automatic arc cladding]. *Visnyk DDMA [Bulletin of the DSEA]*, 2012, no. 3, pp. 124–129.

Lenivkin V. A., Dyurgerov N. G., Sagirov H. N. *Tekhnologicheskie svoystva svarochnoy dugi v zashchitnykh gazakh* [Technological properties of the arc in shielded gas]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 264 p.

Leskov G. I. *Elektricheskaya svarochnaya duga* [Electric arc]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 335 p.

Simutenkov I. V., Dragan S. V., Gal A. F. *Prystriei dlia podavannia elektrodnoho drotu* [Device for feeding welding wire] Patent UA, no. 104894, 2011.

RD 212.0080-87. *Rukovodyashchiy dokument po standartizatsii. Pravila. Avtomaticheskaya naplavka stalnykh tsilindricheskikh detaley uglerodistoy i korrozionnostoykoy stalyu pod flyusom. Osnovnye polozheniya* [Guiding document on standardization. Rules. Automatic submerged arc cladding of steel cylindrical parts of carbon and stainless steel. Fundamentals]. Moscow, 1988. 57 p.

Rykalin N. N. *Raschety teplovykh protsessov pri svarke* [Calculations of thermal processes in welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1951. 296 p.

Rykalin N. N. *Prostranstvennoe raspredelenie temperatury pri dugovoy svarke* [Spatial distribution of temperature in arc welding]. Leningrad, Akademii nauk SSSR Publ., 1941. 56 p.

Simutenkov I. V., Dragan S. V. Stabilnost dugovogo protsessu pri avtomaticheskoy naplavke pod flyusom s vysokochastotnymi kolebaniyami elektroda [Stability of the arc process at automatic submerged arc cladding with high-frequency vibrations of the electrode]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2014, no. 4, pp. 43–48.

Lebedev V. A., Dragan S. V., Goloborodko J. G., Simutenkov I. V. Upravlenie razmerami valika pri naplavke pod flyusom s poperechnymi vysokochastotnymi impulsnymi peremeshcheniyami elektroda [Control of the size of overlay when submerged cladding with transverse high-frequency pulse movements of the electrode]. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii — Procuring production in mechanical engineering*, 2014, no. 4, pp. 6–10.

Frumin I. I. *Avtomaticheskaya elektrodugovaya naplavka* [Automatic arc welding]. Kharkov, 1961. 423 p.

Problem statement. Various methods of regulation of the heat input and physical and chemical effect on the arc and weld puddle are used during cladding works to obtain a given structure and geometry of the cladding layer [4, 11]. Control of the structure provides the necessary mechanical properties of the cladding metal and control of dimensions of penetration increases the productivity of the cladding process and reduces the parent metal in the cladding layer.

The control methods used are based on the external mechanical, electromagnetic or another effect. The advantages of the mechanical method include the ease of implementation, and as a result, the low cost, the possibility of independent regulation of power and thermal parameters of the control action, the absence of overheating of droplets and burning of alloying elements [11].

It is necessary for the electrode wire with a drop of molten metal at its end to make transverse (or longitudinal) high-frequency vibrations ($f_k > 25$ Hz) with small amplitude ($d_3 < A_k < e_0$) in the mechanical method for the controlled metal transfer. Here e_0 is the width of the zone of penetration at a fixed power of the source and the absence of vibrations; d_e is the electrode diameter [1].

To control the geometry of penetration (obtaining of a wide roll with a small penetration depth for a single pass) it is recommended to perform cladding with the transverse vibrations of the electrode at the low frequency ($f_k < 2$ Hz) and the big amplitude ($A_k \gg d_3$) [12]. Reducing the depth of penetration in this case is due to the fact that the weld arc together with the end of the electrode has time to move relative to the metal surface at the low frequency vibrations. It causes the dispersal of the heat flow. At that, the parameters of the heat source (the heating spot dimensions, the nature of the distribution of specific heat flow rate on the heating spot etc.) will vary depending on the velocity of the arc movement. As it is stated [8], an increase in the velocity of the arc movement less heat is distributed in front of the heat source, so the penetration depth and area are reduced. The same effect is observed when cladding with the high-frequency vibrations of the electrode. With the growth of the velocity of the arc movement the penetration width, depth and area of reduced due to the high-frequency vibrations of the electrode [2].

Furthermore, as noted above, when there are the high-frequency vibrations, there is an ability to control the metal transfer across the arc and, consequently, the melting capacity of the electrode. Therefore, the use of the high-frequency vibrations of the electrode for the development of the combined control action (CA) is urgent. At that, the conditions of simultaneous controlling of the metal transfer across the arc and the geometry of the cladding layer at the automatic submerged arc cladding are implemented.

Latest research and publications analysis. The positive effect of the use of the combined CA at the automatic submerged arc cladding can be achieved when

Постановка проблемы. При наплавочных работах для получения заданной структуры и геометрии наплавленного слоя используют различные методы регулирования тепловложения и физико-химического воздействия на дугу и сварочную ванну [4, 11]. Управление структурой обеспечивает необходимые механические характеристики металла наплавки, а управление размерами проплавления способствует повышению производительности наплавочного процесса и сокращению участия основного металла в наплавленном слое.

Применяемые методы управления основаны на внешнем механическом, электромагнитном или другом воздействии. К преимуществам механического метода следует отнести простоту реализации, и как следствие, невысокую стоимость, возможность независимого регулирования силовых и тепловых параметров управляющего воздействия, отсутствие перегрева капель и выгорания легирующих элементов [11].

При механическом методе для управляемого переноса металла необходимо, чтобы электродная проволока с каплей расплавленного металла на ее торце совершала поперечные (или продольные) колебания высокой частоты ($f_k > 25$ Гц) с малой амплитудой ($d_3 < A_k < e_0$). Здесь e_0 — ширина зоны проплавления при фиксированной мощности источника и отсутствии колебаний; d_3 — диаметр электрода [1].

Для управления геометрией наплавки (получения за один проход широкого валика с малой глубиной проплавления) наплавку рекомендуется выполнять с поперечными колебаниями электрода при низкой частоте ($f_k < 2$ Гц) и большой амплитуде ($A_k \gg d_3$) [12]. Уменьшение глубины проплавления в этом случае связано с тем, что сварочная дуга вместе с торцом электрода при низкочастотных колебаниях успевает перемещаться относительно поверхности металла, что способствует рассредоточению теплового потока. При этом параметры источника нагрева (размеры пятна нагрева, характер распределения удельного теплового потока по пятну нагрева и др.) будут изменяться в зависимости от скорости перемещения дуги. Как установлено [8], при увеличении скорости перемещения дуги перед источником нагрева распространяется все меньше тепла, поэтому глубина и площадь проплавления уменьшаются. Такой же эффект наблюдается и при наплавке с высокочастотными колебаниями электрода. По мере роста скорости перемещения дуги вследствие высокочастотных колебаний электрода ширина, глубина и площадь проплавления уменьшаются [2].

Кроме того, как отмечено выше, при высокочастотных колебаниях существует возможность управления переносом металла через дугу и, следовательно, производительностью плавления электрода. Поэтому актуальным является использование высокочастотных колебаний электрода для разработки комбинированного управляющего воздействия (УВ), при котором реализуются условия одновременного управления переносом металла через дугу и геометрией наплавленного слоя при автоматической наплавке под флюсом.

the implementation of two necessary conditions is met: 1) the high stability of the arc process and 2) the presence of the generator of high-frequency vibrations.

The stability of the arc process is determined by selecting the corresponding relation between the parameters of the CA, i.e. the frequency and amplitude of vibrations of the electrode. The previously conducted studies [10] helped to state a criterion by which one can determine the allowable values of the frequency of the electrode vibrations depending on the amplitude — for controlling the geometry of the cladding roller and the allowable values of the amplitude depending on the frequency — for controlling the metal transfer across the arc.

The mechanical generator should be able of creating high-frequency vibrations of the electrode, consisting of two harmonics with the necessary values of frequency and amplitude. The harmonic with a big frequency provides the more improved productivity of the electrode melting, and harmonic with the bigger amplitude will increase the width of the roller and decrease the depth of penetration.

The previously developed design of the generator is simple and allows one to create pulse movements applied to the electrode wire in the area of stickout, in wide ranges of frequencies and amplitudes [6]. At that, bending vibrations are excited in the welding wire, and its end starts moving with a frequency equal to the pulse movement frequency.

However, there is one drawback for this scheme for generating vibrations of the electrode. To accommodate the drummer of the generator at the point of application of pulsed movements it is required to increase the electrode stickout. Such a solution can only be justified by the wire cladding with low resistivity, such as of mild steel. However, in this case, an increased stickout leads to a deviation of the electrode tip from the cladding axis (roller wander) and the deterioration of the formation of the roller [2]. With increasing frequency and amplitude of vibrations the indicated negative trend increases.

To overcome this drawback, we developed a new design of the current contact jaw (Fig. 1). This design allows us to create electrode vibrations both along and across the roller and regulate their amplitude, regardless of the value of stickout which is technologically conditioned.

The joint control of the metal transfer and the geometry of the running roller at the vibrations of the electrode tip in accordance with the circuit of application of the pulse CA (see. Fig. 1, *b*) is achieved by combining the diameter and the pitch of the driving of rollers of the master unit of the mechanical generator [6].

The effect of the combined actions is achieved through the implementation of qualitatively new technological opportunities which each CA harmonic can not provide alone.

THE ARTICLE AIM is to develop methods of calculation and to experimentally study the effect of the

Анализ последних исследований и публикаций. Положительный эффект от применения комбинированного УВ при автоматической наплавке под флюсом может быть достигнут при реализации двух необходимых условий: 1) высокой стабильности дугового процесса и 2) наличия генератора высокочастотных колебаний.

Стабильность дугового процесса определяется выбором соответствующего соотношения между параметрами УВ — частотой и амплитудой колебаний электрода. Ранее выполненные исследования [10] позволили установить критерий, с помощью которого можно определить допустимые значения частоты колебаний электрода в зависимости от амплитуды — для управления геометрией наплавляемого валика и допустимые значения амплитуды в зависимости от частоты — для управления процессом переноса металла через дугу.

Механический генератор должен обладать способностью создания высокочастотных колебаний электрода, состоящих из двух гармоник с необходимыми значениями частоты и амплитуды. Гармоника с большей частотой обеспечит повышение производительности плавления электрода, а гармоника с большей амплитудой будет способствовать увеличению ширины валика и уменьшению глубины проплавления.

Ранее разработанная конструкция генератора отличается простотой и позволяет создавать импульсные перемещения, прикладываемые к электродной проволоке на участке вылета, в широких диапазонах частоты и амплитуды [6]. При этом в электродной проволоке возбуждаются изгибные колебания, и ее торец начинает перемещаться с частотой, равной частоте импульсных перемещений.

Однако для указанной схемы генерирования колебаний электрода характерен один существенный недостаток. Для размещения ударника генератора в точке приложения импульсных перемещений требуется увеличивать вылет электрода. Такое решение может быть оправдано только при наплавке проволокой с низким удельным сопротивлением, например из низкоуглеродистой стали. Но и в этом случае увеличенный вылет приводит к отклонению торца электрода от оси наплавки (блужданию валика) и ухудшению формирования валика [2]. По мере увеличения частоты и амплитуды колебаний указанная отрицательная тенденция усиливается.

Для устранения этого недостатка была разработана новая конструкция токоподвода (рис. 1), позволяющая создавать колебания электрода как вдоль, так и поперек наплавляемого валика и регулировать их амплитуду независимо от технологически обусловленной величины вылета.

Совместное управление переносом металла и геометрией наплавляемого валика при колебаниях торца электрода, в соответствии со схемой приложения импульсного УВ (см. рис. 1, *б*), достигается путем комбинирования диаметра и шага установки роликов задающего узла механического генератора [6].

Эффект от комбинированного воздействия достигается за счет реализации качественно новых

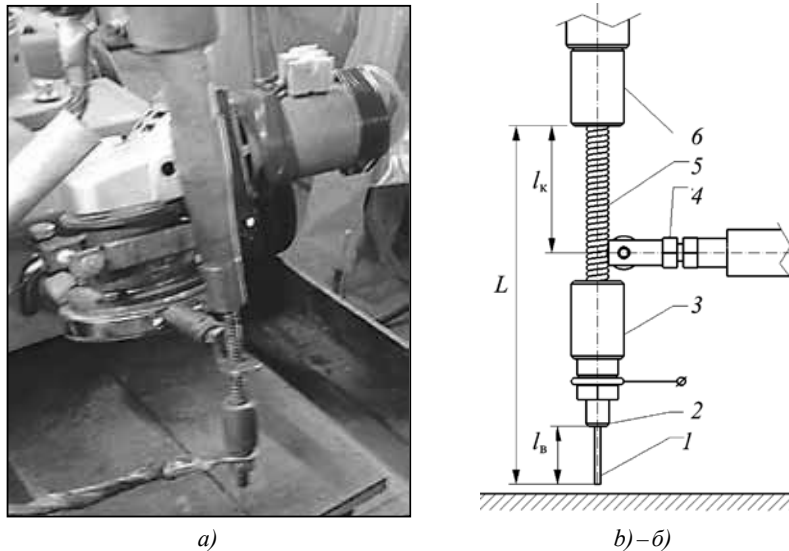


Fig. 1. Implementation of the combined control action on the electrode at the automatic submerged arc cladding:

Рис. 1. Реализация комбинированного управляющего воздействия на электрод при автоматической наплавке под флюсом: *a)* — is a technological unit /технологический узел; *b)–б)* — is a circuit of creating vibrations of the electrode / схема создания колебаний электрода; 1 — is an electrode wire / электродная проволока; 2 — is a current contact jaw / токоподвод; 3 — is a surge chamber of the current contact jaw to the Bowden cable / обойма крепления токоподвода к боуден-тросу; 4 — is a vibration generator unit / вибративный узел генератора; 5 — is a Bowden cable / боуден-трос; 6 — is a surge chamber of the Bowden cable to the welding head / обойма крепления боуден-троса к сварочной головке; L — is a length of the movable (elastically fixed) part of the current contact jaw with the electrode / длина подвижной (эластично закрепленной) части токоподвода с электродом; l_k — is an arm of the control action application / плечо приложения управляющего воздействия; l_b — is the electrode stickout / вылет электрода

combined high-frequency control action on the geometry of penetration at the automatic submerged arc cladding.

Basic material. To control the geometry of penetration the following condition is necessary: as a result of the electrode vibrations the dimensions of the heating area should significantly increase in comparison with the dimensions of the heating area without vibration. When cladding with the electrode vibrations the following conditions of the relationship between the amplitude of vibration and the geometry of penetration can be met:

- a) if $A_k < d_s$, then $e = e_0$;
- b) if $d_s < A_k < e_0$, then $e = e_0 + \Delta$;
- c) if $e_0 < A_k < L_b$, then $e = A_k$.

Here e is a width of penetration in the presence of vibrations; L_b is the maximum length of the area heated by the arc to the melting temperature of the base metal (weld puddle length) in the absence of vibrations; Δ is an increment of the penetration width due to the influence of nature of the metal transfer.

When the condition (1,a) is met, the transverse vibrations can not influence the geometry of the cladding due to the small value of the amplitude. When the condition (1,b) is met, the transverse vibrations can influence the geometry of the cladding mainly due to the changing nature of the metal transfer — from the globular to the atomizing one — with the increasing frequency [3]. To actively control the geometry of penetration (depth, width, cross-sectional area) in the transverse vibrations

технологических возможностей, которые каждая из гармоник УВ в отдельности обеспечить не может.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка методики расчета и экспериментальное исследование влияния комбинированного высокочастотного управляющего воздействия на геометрию проплавления при автоматической наплавке под флюсом.

Изложение основного материала. Для управления геометрией проплавления необходимо, чтобы в результате колебаний электрода размеры зоны нагрева существенно увеличивались по сравнению с размерами участка нагрева без колебаний. При наплавке с колебаниями электрода возможно выполнение следующих условий взаимосвязи между амплитудой колебаний и геометрией проплавления:

- а) если $A_k < d_s$, то $e = e_0$;
- б) если $d_s < A_k < e_0$, то $e = e_0 + \Delta$;
- в) если $e_0 < A_k < L_b$, то $e = A_k$.

Здесь e — ширина проплавления при наличии колебаний; L_b — наибольшая длина участка, нагретого дугой до температуры плавления основного металла (длина сварочной ванны) при отсутствии колебаний; Δ — приращение ширины проплавления, обусловленное влиянием характера переноса металла.

При соблюдении условия (1,a) поперечные колебания не могут влиять на геометрию наплавки вследствие малого значения амплитуды. При соблюдении условия (1,b) поперечные колебания способны оказывать влияние на геометрию наплавки преимущественно за счет изменения характера переноса

it is necessary to satisfy the condition (1, c). In this case, when there is a certain value of the amplitude of the electrode vibrations, the arc can be viewed as a fast-moving heating source which velocity of movement is greater than the velocity of heat distribution in the given body. As is known, the nature of the source can be determined by the Peclet number

$$Pe = \frac{Vl}{a}, \quad (2)$$

where V is a velocity of the source movement; l is a characteristic linear dimension of the heat transfer surface; a is a coefficient of the thermal diffusivity of the base metal.

If the criterion $Pe = 0$, the source is considered to be immovable; $Pe < 1$ — the source is slow-moving; $Pe \geq 10$ — the source is fast-moving [8].

The heat exchange surface between the arc as a normally distributed heat source and the base metal is considered to be a circle, within which the vast majority of the source heat is transferred [8]. However, if the arc with the electrode tip varies transverse to the direction of cladding, the length of the heat exchange area is increased and its width may be taken as equal to the amplitude of vibrations.

Given, that the average velocity of the electrode tip moving during the period of vibration is equal to the half of the product of the amplitude and the frequency of vibrations, after the transformation (2) we obtain

$$A_k > \sqrt{2 \frac{Pe}{f_k} a}. \quad (3)$$

Under the inequality (3) the impact of the heat source on the penetration area of the base metal may be different depending on the value of the criterion Pe .

When $Pe \leq 1$ (Fig. 2, a, b) the heat source is considered as a point slowly-moving one, and the transverse vibrations of the electrode does not affect its parameters. The control of the geometry (width) of cladding in this case is carried out not by changing the shape and dimensions of the penetration area but by controlling the trajectory of movement of the heat source itself. At that, the depth of penetration, the share of the base metal and the cladding process performance remain the same as in cladding without vibration.

Within the range $1 < Pe < 10$ the arc can be seen as a moving point heat source. The nature of its impact on the geometry of the weld puddle is determined by the particular value of the Peclet number (Fig. 2, c, d). In this case the higher the Peclet number, the stronger the dimensions and shape of penetration will vary. The minimum values of the penetration depth and area will conform to its maximum value.

When $Pe \geq 10$ the arc is a fast-moving heat source. It is moving when the electrode vibrations are transverse to the direction of cladding. Therefore the crystallization front does not have time to follow it, and the heat is fed at the section which is equal to the amplitude of the vibrations (Fig. 2, d).

металла — от крупнокапельного к мелкокапельному — при увеличении частоты [3]. Для активного управления геометрией проплавления (глубиной, шириной, площадью поперечного сечения) при поперечных колебаниях необходимо выполнение условия (1, в). В этом случае, при определенном значении амплитуды колебаний электрода, дугу можно рассматривать как быстродвижущийся источник нагрева, у которого скорость перемещения больше скорости распространения тепла в данном теле. Как известно, характер источника можно определить с помощью критерия Пекле

$$Pe = \frac{Vl}{a}, \quad (2)$$

где V — скорость перемещения источника; l — характерный линейный размер поверхности теплообмена; a — коэффициент температуропроводности основного металла.

Если критерий $Pe = 0$, источник считается неподвижным; $Pe < 1$ — источник медленно движущийся; $Pe \geq 10$ — источник быстродвижущийся [8].

Поверхностью теплообмена между дугой, как нормально распределенным источником нагрева, и основным металлом принято считать круг, в пределах которого передается подавляющая часть тепла источника [8]. Но если дуга вместе с торцом электрода колеблется поперек направления наплавки, протяженность зоны теплообмена увеличивается, и ее ширина может быть принята равной амплитуде колебаний.

Учитывая, что средняя скорость перемещения торца электрода за период колебания равна половине произведения амплитуды на частоту колебаний, после преобразования (2) получим

$$A_k > \sqrt{2 \frac{Pe}{f_k} a}. \quad (3)$$

При соблюдении неравенства (3) воздействие источника нагрева на зону проплавления основного металла может быть различным в зависимости от значения критерия Pe .

При $Pe \leq 1$ (рис. 2, а, б) источник нагрева рассматривается как точечный медленно движущийся и поперечные колебания электрода не влияют на его параметры. Управление геометрией (шириной) наплавки в этом случае осуществляется не за счет изменения формы и размеров зоны проплавления, а за счет управления траекторией движения самого источника тепла. При этом глубина проплавления, доля участия основного металла и производительность процесса наплавки остаются такими же, как при наплавке без колебаний.

В диапазоне $1 < Pe < 10$ дугу можно рассматривать как движущийся точечный источник тепла, характер воздействия которого на геометрию сварочной ванны определяется конкретным значением критерия Пекле (рис. 2, в, г). Размеры и форма проплавления в этом случае будут изменяться тем сильнее, чем выше число Пекле, а минимальные значения глубины и площади проплавления будут соответствовать его максимальному значению.

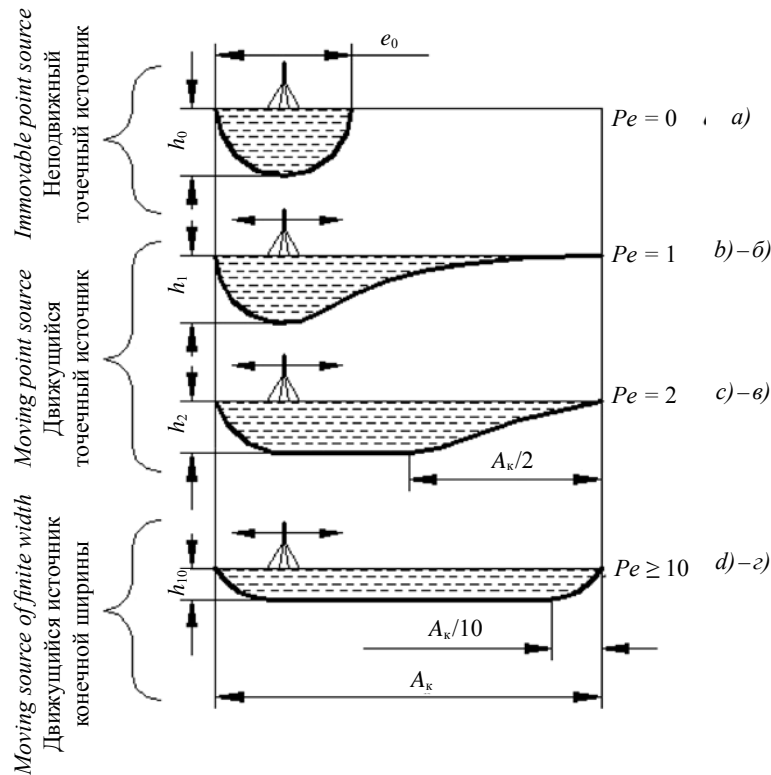


Fig. 2. Influence of the frequency of the electrode vibration at a constant amplitude (increasing Pe number) to change the shape of penetration:

Рис. 2. Влияние частоты колебаний электрода при постоянной амплитуде (возрастание числа Pe) на изменение формы проплавления:

h_0-h_{10} — is the depth of penetration corresponding to the Pe number / глубина проплавления, соответствующая числу Pe ;
 A_k — is the amplitude of vibrations / амплитуда колебаний; e_0 — is the width of the penetration area in the absence of vibrations;
 the direction of movement of the arc is indicated by arrows / ширина зоны проплавления при отсутствии колебаний; стрелками обозначено направление перемещения дуги

In this case, the action of the heat source, distributed over a specific section along the area or line, is equivalent to the cumulative effect of an infinitely large number of elementary point sources which fill this section [9].

Calculation according to the scheme of low carbon steel heating with the source of the finite width with 7 kW capacity, moving at the velocity of 20 m/h, at the coefficient of efficiency of the process of penetration of 0.5 for cladding with the electrode vibrations showed (Fig. 3) that the depth of penetration decreases monotonically with the increasing width of the heating area.

The calculations also show that the penetration area also changes in this way. Therefore, at a constant productivity of cladding the share of participation of the base metal in the cladding metal will decline with the increasing width of the heating area. It was observed in practice in welding [8]. It follows that for the calculation of the geometry of penetration at the automatic cladding with the high-frequency vibrations of the electrode with an amplitude which satisfies the condition (1, b) or (1, c), we can use the circuit of heating with the movable source of the finite width.

Based on the expressions (1) and (3), as well as taking into account the data [2, 10] and using calculation

При $Pe \geq 10$ дуга, перемещающаяся при колебаниях электрода поперек направления наплавки, представляет собой быстродвижущийся источник тепла, поэтому фронт кристаллизации не успевает следовать за ней, а тепло вводится на участке, равном амплитуде колебаний (рис. 2, з).

В этом случае действие источника тепла, распределенного по определенному участку — по площади или линии — эквивалентно суммарному действию бесконечно большого числа элементарных точечных источников, заполняющих данный участок [9].

Расчет по схеме нагрева низкоуглеродистой стали источником конечной ширины мощностью 7 кВт, движущегося со скоростью 20 м/ч, при КПД процесса проплавления 0,5 для наплавки с колебаниями электрода показал (рис. 3), что глубина проплавления монотонно убывает по мере увеличения ширины участка нагрева.

Расчеты показывают также, что подобным образом изменяется и величина площади проплавления. Следовательно, при неизменной производительности наплавки доля участия основного металла в металле наплавки по мере увеличения ширины участка нагрева будет снижаться, что и наблюдалось на практике при сварке [8]. Отсюда следует, что для расчета геометрии проплавления при автоматической

the areas are determined which correspond to the different nature of the impact of the transverse vibrations of the electrode tip on the geometry of penetration and the metal transfer. These areas are shown in the diagram (Fig. 4).

Section 1 — only the geometry of penetration is controlled by controlling the trajectory of the arc movement, the impact on the metal transfer is absent.

Section 2 — combined control of the geometry of penetration and metal transfer depending on the relationship between the frequency and amplitude of vibrations:

if $A_k < d_3$ and $f \geq f_{ЖМС}$ the control of thickness of a liquid-metal layer (LML) is provided at the electrode tip;

if $A_k < d_3$ and $f \geq f_{ГКР}$ the microdroplet metal transfer (MMT) is realized as a result of the gravitational-capillary spraying (GCS);

if $d_3 < A_k < e_0$ and $f \geq f_{ЕИМ}$ the metal transfer control (MTC) and the electrode cladding productivity control are possible;

наплавке с высокочастотными колебаниями электрода с амплитудой, удовлетворяющей условию (1,б) или (1,в), можно применить схему нагрева подвижным источником конечной ширины.

На основании выражений (1) и (3), а также с учетом данных [2, 10] расчетным путем определены области, соответствующие различному характеру воздействия поперечных колебаний торца электрода на геометрию проплавления и перенос металла. Эти области представлены на диаграмме (рис. 4).

Область 1 — управление только геометрией проплавления за счет управления траекторией движения дуги, влияние на перенос металла отсутствует.

Область 2 — комбинированное управление геометрией проплавления и переносом металла в зависимости от соотношения между частотой и амплитудой колебаний:

при $A_k < d_3$ и $f \geq f_{ЖМС}$ обеспечивается управление толщиной жидкометаллического слоя (ЖМС) на торце электрода;

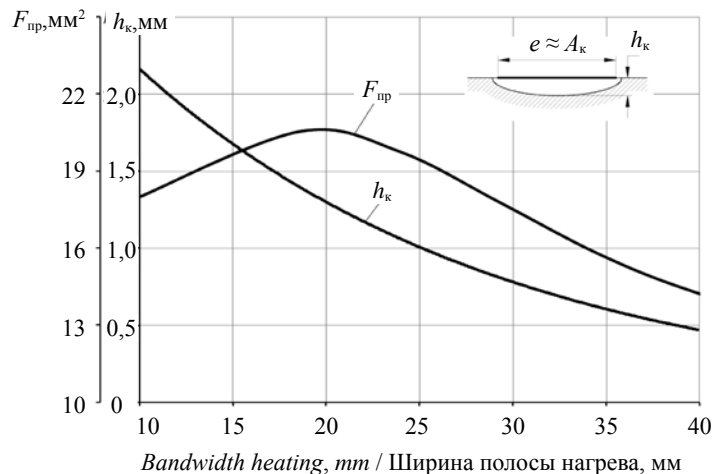


Fig. 3. Dependence of the depth h_k and penetration area $F_{пр}$ on the width of the band of heating with the mobile source

Рис. 3. Зависимость глубины h_k и площади зоны проплавления $F_{пр}$ от ширины полосы нагрева подвижным источником

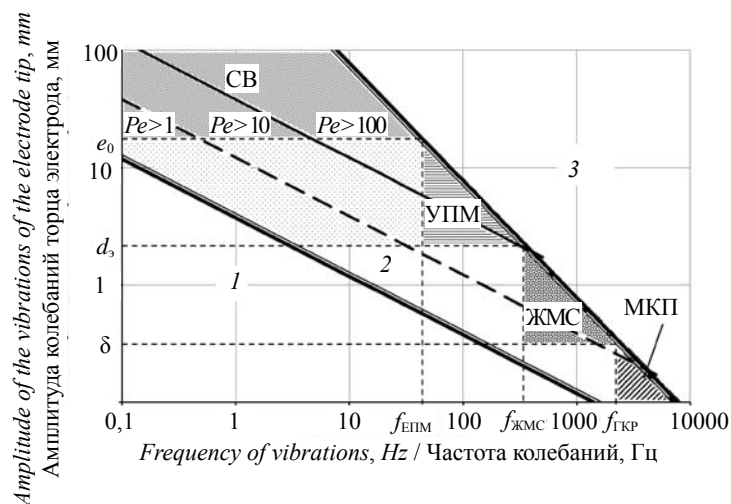


Fig. 4. Diagram for the selection of parameters of the control action at the transverse vibrations of the electrode tip

Рис. 4. Диаграмма для выбора параметров управляющего воздействия при поперечных колебаниях торца электрода

if $e_0 < A_k < L_b$ in the frequency range $f \leq f_{\text{ЕПМ}}$ the control of the geometry of penetration is performed ($f_{\text{ЕПМ}}$ is the frequency of the natural metal transfer).

Section 3 — unstable arcing and deterioration of the quality of formation of the cladding layer due to an excessively high velocity of the electrode vibration.

The analysis of thermal cycles at the automatic submerged arc cladding of the rolls on a plate of mild steel has been conducted. It was done to confirm the calculated dependences of the influence of the parameters of the high-frequency transverse vibrations of the electrode on the geometry of penetration. Work was carried out on the stand, consisting of the welding complex АСТ 1000 (the inverter power source and welding tractor), the generator of high-frequency pulse movements of the electrode fixed on the welding head, and thermal cycle recording devices (Fig. 5).

The plates with the dimensions $500 \times 200 \times 10$ mm made of the steel ВСтЗсп with chromel-alumel thermocouples staked in the middle part to a depth of 4 mm from the bottom side were used as an example. The following welding materials were used: the wire Св-08А + the flux ОСЦ-45. The parameters of the cladding mode were stated in accordance with [7]: $d_3 = 2$ mm; $I_{\text{св}} = 220 \dots 250$ A; $U_{\text{д}} = 27 \dots 30$ V; $V_{\text{св}} = 18 \dots 22$ m/h, $q_{\text{п}} = 10, 1 \dots 10, 4$ kJ/sm. The vibrations of the electrode were created transverse to

при $A_k < d_3$ и $f \geq f_{\text{ГКР}}$ реализуется микрокапельный перенос металла (МКП) в результате гравитационно-капиллярного распыления (ГКР);

при $d_3 < A_k < e_0$ и $f \geq f_{\text{ЕПМ}}$ возможно управление переносом металла (УПМ) и производительностью плавления электрода;

при $e_0 < A_k < L_b$ в диапазоне частот $f \leq f_{\text{ЕПМ}}$ обеспечивается управление геометрией проплавления ($f_{\text{ЕПМ}}$ — частота естественной перенос металла).

Область 3 — нестабильное горение дуги и ухудшение качества формирования наплавленного слоя вследствие чрезмерно высокой скорости колебания электрода.

Для подтверждения расчетных зависимостей о влиянии параметров высокочастотных поперечных колебаний электрода на геометрию проплавления проведен анализ термических циклов при автоматической наплавке под флюсом валиков на пластину из малоуглеродистой стали. Работы выполняли на стенде, состоящем из сварочного комплекса АСТ 1000 (инверторный источник питания и сварочный трактор), генератора высокочастотных импульсных перемещений электрода, закрепленного на сварочной головке, и приборами записи термоциклов (рис. 5).

В качестве образцов использовали пластины размерами $500 \times 200 \times 10$ мм из стали ВСтЗсп с зачеканенными в средней части на глубину 4 мм с нижней стороны хромель-алюмелиевыми термопарами.

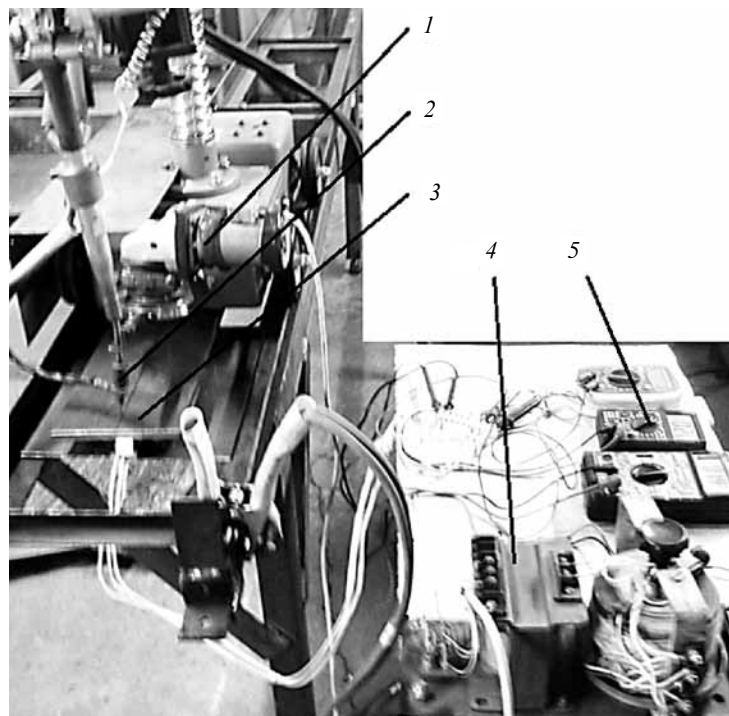


Fig. 5. Experimental stand with equipment for thermal cycle recording at the automatic submerged arc cladding with high-frequency vibrations:

Рис. 5. Экспериментальный стенд с аппаратурой для записи термоциклов при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными колебаниями:

1 — is the generator of high frequency vibrations / генератор высокочастотных колебаний; 2 — is the weld head with the current contact jaw of the new construction / сварочная головка с токоподводом новой конструкции; 3 — is a product with fixed thermocouples / изделие с закрепленными термопарами; 4 — is a the generator power supply / источник питания генератора; 5 — are devices of the thermocouples signal control / приборы контроля сигнала термопар

the direction of the welding, the parameters of the mode of vibrations of the electrode wire tip were varied in the limits: the frequency $f_k = 25 \dots 100$ Hz, the amplitude $A_k = 3 \dots 7$ mm.

The thermal cycles recording was performed at the control points at a distance from the roll axis $y = 0, 6$ and 12 mm, in the absence and the presence of high-frequency vibrations of the electrode in the process of cladding in accordance with the standard procedure [5].

Comparison of thermal cycles (Fig. 6) has shown that they coincide in the points with the coordinates $y = 0$ and $y = 12$ mm. At the same time, the maximum temperature at the point $y = 6$ mm at cladding with variations by 60°C (15%) is higher than the values obtained at cladding without vibrations. In our opinion, this is due to the fact that at a constant arc power with the increasing vibration amplitude area of dispersal of heat flow is expanding, overheating of the metal of the weld puddle reduces, the thermal coefficient of efficiency of the process of penetration increases and, consequently, the area of penetration increases. This regularity remains valid as long as the heat irradiation from the bottom of the weld puddle surrounding the unmelted metal layers exceeds the heat inflow from the heating source. The further growth of the amplitude of vibrations and the width of the weld puddle will, on the contrary, be accompanied by a reduction in the depth and area of penetration (see. Fig. 3). This complex relationship is confirmed by the results of calculations by N. Rykalin [9].

Сварочные материалы: проволока Св-08А+флюс ОСЦ-45. Параметры режима наплавки устанавливали в соответствии с [7]: $d_s = 2$ мм; $I_{св} = 220 \dots 250$ А; $U_d = 27 \dots 30$ В; $V_{св} = 18 \dots 22$ м/ч; $q_n = 10, 1 \dots 10, 4$ кДж/см. Колебания электрода создавали поперек направления наплавки, параметры режима колебаний торца электродной проволоки изменяли в пределах: частоту $f_k = 25 \dots 100$ Гц, амплитуду $A_k = 3 \dots 7$ мм.

В процессе наплавки проводили в соответствии с общепринятой методикой [5] запись термоциклов в контрольных точках на расстоянии от оси валика $y = 0, 6$ и 12 мм при отсутствии и наличии высокочастотных колебаний электрода.

Сравнение термоциклов (рис. 6) показало их совпадение в точках с координатами $y = 0$ и $y = 12$ мм. В то же время максимальная температура в точке $y = 6$ мм при наплавке с колебаниями на 60°C (15%) превышает значения, полученные при наплавке без колебаний. По нашему мнению, это объясняется тем, что при постоянной мощности дуги по мере увеличения амплитуды колебаний расширяется зона рассредоточения теплового потока, снижается перегрев металла сварочной ванны, повышается термический КПД процесса проплавления и, как следствие, возрастает площадь проплавления. Указанная закономерность остается справедливой до тех пор, пока теплоотдача от дна сварочной ванны окружающим слоям нерасплавленного металла не превысит приток тепла от источника нагрева. Дальнейший рост амплитуды колебаний и ширины сварочной ванны будет, напротив, сопровождаться снижением глубины и площади проплавления (см. рис. 3). Такая сложная зависимость подтверждается результатами расчета по Н. Н. Рыкалину [9].

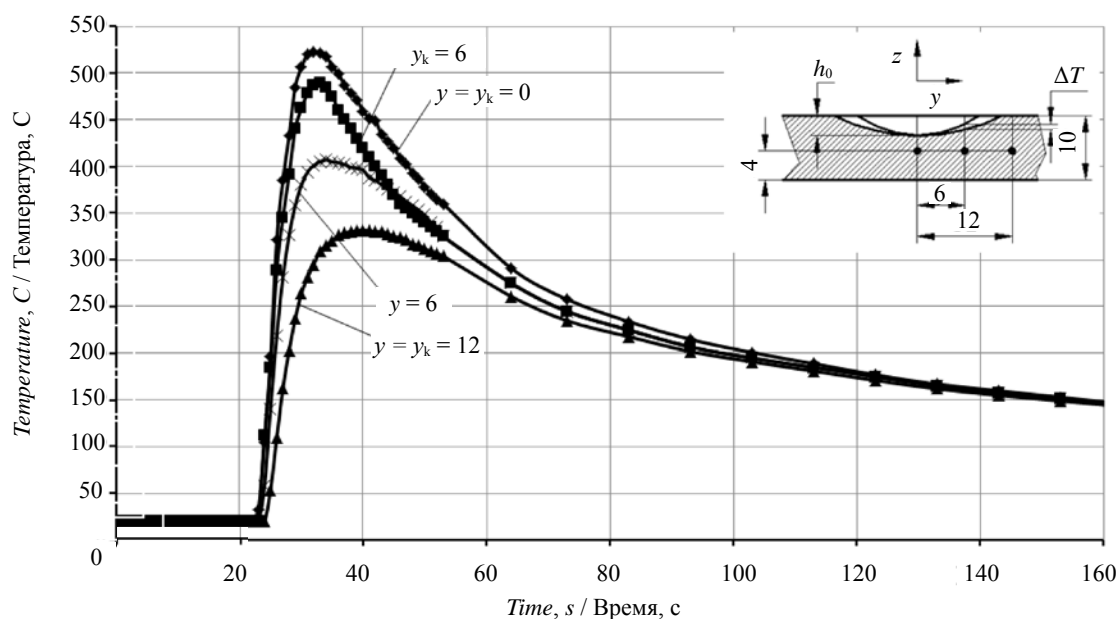


Fig. 6. Heat affected zone thermal cycles at the automatic submerged arc cladding: when there is a coordinate y , index “к” corresponds to the cladding with vibrations

Рис. 6. Термоциклы околошовной зоны при автоматической наплавке под флюсом: индекс “к” при координате y соответствует наплавке с колебаниями

CONCLUSIONS. 1. The ranges of changes in frequency and amplitude of high frequency vibrations of the electrode, determined by calculation, provide a combined control of the thickness of the liquid-metal layer on the electrode tip, the nature of metal transfer through the arc and the geometry of penetration at the automatic submerged arc cladding. The developed diagram “frequency–amplitude” of vibrations and the improved design of current supply of the welding head allow us to realize the combined control action on the electrode.

2. Based on calculations using the Peclet number it is shown that the average speed of the arc transfer corresponds to the circuit of the fast-moving heating source at the automatic cladding with high-frequency vibrations of the electrode.

3. High-frequency vibrations of the electrode contribute to the dispersal of the heat flow and changing in the geometry of cladding. Calculations have shown that at the low-carbon steel cladding with the arc with the power of 7 kW the increase of the amplitude of transverse vibrations up to 20 mm leads to the decrease in depth of penetration by 50% as compared with cladding without vibration. It was experimentally stated that at the cladding with vibrations with the frequency of 250 Hz the maximum temperature at a distance of 6 mm from the axis of the roller exceeds the metal temperature by 15% at the cladding without vibrations.

ВЫВОДЫ. 1. Установленные расчетом диапазоны изменения частоты и амплитуды высокочастотных колебаний электрода обеспечивают комбинированное управление толщиной жидко-металлического слоя на торце электрода, характером переноса металла через дугу и геометрией проплавления при автоматической наплавке под флюсом. Разработанная диаграмма «частота–амплитуда» колебаний и усовершенствованная конструкция токоподвода сварочной головки позволяют реализовать комбинированное управляющее воздействие на электрод.

2. На основании расчетов с использованием критерия Пекле показано, что при автоматической наплавке с высокочастотными колебаниями электрода средняя скорость перемещения дуги соответствует схеме быстродвижущегося источника нагрева.

3. Высокочастотные колебания электрода способствуют рассредоточению теплового потока и изменению геометрии наплавки. Расчеты показали, что при наплавке на низкоуглеродистую сталь дугой мощностью 7 кВт увеличение амплитуды поперечных колебаний до 20 мм приводит к снижению глубины проплавления на 50% по сравнению с наплавкой без колебаний. Экспериментально установлено, что при наплавке с колебаниями частотой 250 Гц максимальная температура на расстоянии 6 мм от оси валика превышает температуру металла при наплавке без колебаний на 15%.

Список литературы

- [1] Алов, А.А. Влияние вибрации электрода на процесс дуговой сварки и свойства швов [Текст] / А.А. Алов, В.С. Виноградов // Сварочное производство. — 1958. — №9. — С. 19–22.
- [2] Голобородько, Ж.Г. Автоматическая наплавка под флюсом конструкционных сталей с поперечными высокочастотными перемещениями электрода [Текст] / Ж.Г. Голобородько, С.В. Драган, И.В. Симутенков // Автоматическая сварка. — 2013. — №6. — С. 35–38.
- [3] Драган, С.В. Методика определения параметров высокочастотных механических колебаний электрода при автоматической наплавке под флюсом [Текст] / С.В. Драган, И.В. Симутенков, О.В. Игнатенков // Вісник ДДМА. — 2012. — №3. — С. 124–129.
- [4] Ленивкин, В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах [Текст] / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргерев, Х.Н. Сагиров. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
- [5] Лесков, Г.И. Электрическая сварочная дуга [Текст] / Г.И. Лесков. — М.: Машиностроение, 1970. — 335 с.
- [6] Пат. Україна МПК 2014.01. Пристрій для подавання електродного дроту [Текст] / Симутенков І.В., Драган С.В., Галь А.Ф.; заявитель и патентообладатель Национальный университет кораблестроения. — №104894; заявл. 21.12.2011; опубл. 25.03.2014. Бюл. №6.
- [7] Руководящий документ по стандартизации. Правила. Автоматическая наплавка стальных цилиндрических деталей углеродистой и коррозионностойкой сталью под флюсом. Основные положения [Текст] / РД 212.0080-87// М. — 1988. — 57 с.
- [8] Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н.Н. Рыкалин. — М.: Машиностроение, 1951. — 296 с.
- [9] Рыкалин, Н.Н. Пространственное распределение температуры при дуговой сварке [Текст] / Н.Н. Рыкалин. — Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1941. — 56 с.
- [10] Симутенков, И.В. Стабильность дугового процесса при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода [Текст] / И.В. Симутенков, С.В. Драган, Ю.А. Ярослав // Зб. наук. праць НУК. — 2014. — №4. — С. 43–48.
- [11] Управление размерами валика при наплавке под флюсом с поперечными высокочастотными импульсными перемещениями электрода [Текст] / В.А. Лебедев, С.В. Драган, Ж.Г. Голобородько, И.В. Симутенков // Заготовительные производства в машиностроении. — 2014. — №4. — С. 6–10.
- [12] Фрумин, И.И. Автоматическая электродуговая наплавка [Текст] / И.И. Фрумин. — Х.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии. — 1961. — 423 с.

© С.В. Драган, Ю.А. Ярослав, И.В. Симутенков, В.Я. Трембич

Статью рекомендует в печать
д-р техн. наук, проф. А.Н. Дубовой