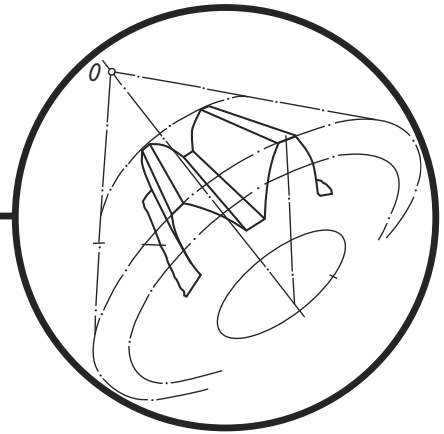




DOI 10.15589/jnn20160103
УДК 621.791.92
О-62

DETERMINATION OF PARAMETERS OF MECHANICAL PULSE ACTION ON THE WELD POOL FOR THE METAL STRUCTURING IN AUTOMATIC ARC DEPOSITION WELDING

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВАРОЧНУЮ ВАННУ ДЛЯ СТРУКТУРИЗАЦИИ МЕТАЛЛА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

Volodymyr O. Lebediev
valpaton@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0006-3576

Stanislav V. Drahan
stanislav.dragan@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8634-782X

Anatolii F. Hal
anatolij.gal@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-1888-5962

Oleh A. Kozyrko
o.kozyrko@dmt-winces.com
ORCID: 0000-0002-7387-1144

В. А. Лебедев
д-р техн. наук¹

С. В. Драган
канд. техн. наук²

А. Ф. Галь
канд. техн. наук²

О. А. Козырко
инженер³

¹*Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv*
²*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*
³*DMT Marine Equipment, Mykolaiv*

¹*ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев*

²*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

³*DMT Marine Equipment, г. Николаев*

Abstract. The strength and other operational characteristics of the metal during arc deposition welding processes are determined by the presence of columnar crystals, the growth of which occurs as a result of metal overheating in the molten bath. To control the columnar crystals growth, a variety of methods are used, including pulse impacts on the weld pool or creating mechanical vibrations of the part during deposition welding. In the latter case, the periodic removal of the heat source from the point of the weld pool overheating prevents the growth of columnar crystallites and thus improves the weld metal structure. The developed engineering method for calculating the effective parameters of the mechanical vibrations of the weld pool during automatic deposition welding of cylindrical parts in CO₂ is based on the theory of heat transfer at welding. It is shown that deposit welding on the mild steel St.3 with the Sv08G2C wire of the 1.2 mm diameter should be carried out with the 1...12 Hz vibration frequency at the amplitude equal to 1/2 of the deposition welding step. Experimental verification of various mode parameters showed that, compared to the welding performed without vibration of the weld pool, the weld bead width is increased by 16...23% in the deposited layer, there are no cracks, and its durability improved by 1.3...1.7 times. The improvement of mechanical properties of

the deposited layer is due to grinding of metal grains exposed to the controlled vibrations of the part. At that, there are hardly any weld metal columnar structures, which are observed at conventional deposition welding.

Keywords: automatic arc deposition welding; weld pool; metal structuring; mechanical pulse action.

Аннотация. Изложена и экспериментально подтверждена инженерная методика расчета параметров механического импульсного воздействия на сварочную ванну с целью управления структурой металла при автоматической дуговой наплавке в CO_2 на детали цилиндрической формы.

Ключевые слова: автоматическая дуговая наплавка; сварочная ванна; структуризация металла; механическое импульсное воздействие.

Анотація. Викладено й експериментально підтверджено інженерну методику розрахунку параметрів механічного імпульсного впливу на зварювальну ванну з метою управління структурою металу при автоматичному дуговому наплавленні в CO_2 на деталі циліндричної форми.

Ключові слова: автоматичне дугове наплавлення; зварювальна ванна; структуризація металу; механічний імпульсний вплив.

REFERENCES

- [1] Boldyrev A. M. *O mekhanizme formirovaniya struktury metalla shva pri vvedenii nizkочастотnykh kolebaniy v svarochnyuyu vannu* [On the mechanism of the weld metal structure formation with the introduction of low-frequency vibrations into the weld pool]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Production*. 1976, no 2. pp. 1–3.
- [2] Dragan S. V., Simutenkov I. V., Yaros Yu. A. *Vliyaniye vysokочастотnykh kolebaniy elektroda na geometriyu proplavleniya pri avtomaticheskoy naplavke pod flyusom* [Influence of high-frequency electrode vibrations on the penetration geometry for automatic deposition welding under flux]. *Sudostroenie i morskaya infrastruktura — Shipbuilding and marine infrastructure*. 2015, no. 1(3)., pp. 76–86.
- [3] Yefimov W. A., Eldarhanov A. S. *Fizicheskie metody vozdeystviya na protsessy zatverdevaniya splavov* [Physical methods of influence on the alloys solidification processes]. Moscow, Metalurgiya Publ., 1995, 272 p.
- [4] Ivochkin I. I. *Podavleniye rosta stolbchatykh kristallov metodom «zamorazhivaniya» svarochnoy vannы* [Suppression of the columnar crystals growth by «freezing» the weld pool]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Production*. 1965, no. 12, pp. 1–3.
- [5] Korinets I. F., Okhay Yu. I. *Nomogrammy dlya opredeleniya rezhimov dugovoy svarki v uglekislom gaze* [Nomograms for determining the mode of arc welding in carbon dioxide]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*, 1995, no. 10, pp. 46–48.
- [6] Kuznetsov V. D. *Krystally i krystallizatsiya* [Crystals and crystallization]. Moscow, GPTL Publ., 1954, 411 p.
- [7] Lutsenko V. T. *Metodika priblizhennogo rascheta parametrov shva pri svarke (naplavke) v CO_2* [Methods of approximate calculation of the weld parameters at welding (deposition welding) in CO_2]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Production*, 1973, no.1, pp. 20–22.
- [8] Makara A. M., Kushnerenko B. N. *Poperechnye peremeshcheniya dуги kak faktor uluchsheniya struktury i svoystv svarnykh soedineniy* [Lateral displacements of the arc as a factor of improvement of the welded joints structure and properties]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*, 1967, no. 1, pp. 31–35.
- [9] Mirlin G. A., Ageev V. I., Barashev V. V. *Dugovaya svarka modulirovannym tokom* [Arc welding with the modulated current]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Production*. 1980, no. 8, pp. 16–17.
- [10] Petrov G. L., Tumarev A. S. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 392 p.
- [11] Ryzhov R. N. *Vliyaniye impulsnykh elektromagnitnykh vozdeystviy na formirovaniye i krystallizatsiyu shvov* [Influence of electromagnetic pulse actions on the formation and crystallization of welds]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*, 2007, no. 2., pp. 56–58.
- [12] Rykalin N. N. *Prostranstvennoye raspredeleniye temperatury pri dugovoy svarke* [Spatial temperature distribution in arc welding]. Leningrad, Izd-vo akademii nauk SSSR Publ., 1941. 56 p.
- [13] Lebedev V. O., Kozyrko O. A., Dragan S. V., Gal A. F. *Sposib dugovogo zvaryvannya abo naplavlennya* [Method of arc welding or deposition welding]. Patent UA, no. 101999. B23K 9/00, 2015.
- [14] Ostrovskaya S. A., Leskov G. I., Voloshkevich G. Z. and oth. *Tekhnologiya elektricheskoy svarki metallov i splavov plavleniem* [Technology of electric welding of metals and alloys with melting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 768 p.

- [15] Tewari S.P. Effekts of Oscillation on Impact Property of Weldments. ISIJ International. 1999, Vol. 39 (8), pp. 809–812.
- [16] Tewari S.P. Influence of Longitudinal Oscillation on Tensile Properties of Medium Carbon Steel Welds of Different Thickness. ISIJ International. 2009, Vol. 14 (4), pp. 17–27.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Получение наплавленного металла с требуемыми эксплуатационными характеристиками — актуальная задача современной технологии автоматической дуговой наплавки, широко применяемой при изготовлении новых или ремонте изношенных деталей машин и механизмов. Данную задачу решают путем подбора сварочных материалов, использования специальных активаторов, добавок и другими методами активного воздействия на металл сварочной ванны [4, 11, 14].

Эффективными способами улучшения структуры наплавленного металла являются силовые влияния, создаваемые с помощью электромагнитных полей, ультразвуковых излучений или механических колебаний [8, 11, 15]. Значительные результаты достигнуты при модуляции процессов на основе регулярных изменений параметров сварочного процесса — тока, напряжения и состава защитного газа [9].

Вместе с тем, к перспективному направлению управления структурой металла сварочной ванны в процессе его кристаллизации можно отнести и импульсное механическое воздействие дополнительных устройств, устанавливаемых на сварочном оборудовании [15, 16].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Прочностные характеристики наплавленного металла, как известно [4], во многом определяются наличием столбчатых кристаллитов, рост которых происходит в результате перегрева металла расплавленной ванны, низкой скорости сварки и повышенного теплоотвода в обрабатываемую деталь со значительной массой. Таким образом, решение задачи управления ростом столбчатых кристаллов сводится к поиску технических возможностей организации цикла наплавки с влиянием на указанные выше процессы. При этом очевидно, что скорость наплавочного процесса, если имеется техническая возможность и технологическая обусловленность, необходимо повышать.

Другие способы ограничения роста столбчатых кристаллитов металла в наплавленном металле предусматривают введение в ванну специальных порошков, снижающих температуру перегрева жидкого металла [4], а также периодическое изменение параметров режима сварки — модуляцию [9] и относительное перемещение источника нагрева — дуги — путем внеосевых колебаний электродной проволоки или изделия [2, 8], позволяющее рассредоточить место нагрева. Однако имеющиеся в литературе сведения не дают

однозначных рекомендаций по назначению амплитуды и частоты колебаний для ограничения скорости роста кристаллитов в наплавленном металле. Обычно выбор этих параметров основывается на результатах экспериментальных работ. Следует также отметить, что любые виды колебаний или импульсных воздействий на сварочную ванну при наплавке могут быть эффективны, если они оказывают существенное влияние на структуру наплавленного металла.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — разработка инженерной методики расчетного определения эффективных параметров колебаний сварочной ванны, создаваемых механизмами сварочного оборудования, для улучшения структуры металла, наплавленного автоматическим способом в CO_2 .

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для подавления роста столбчатых кристаллитов за счет снижения перегрева сварочной ванны необходимо в процессе наплавки создать условия, при которых удельная энтальпия сварочной ванны при температуре перегрева будет стремиться к ее удельной энтальпии при температуре плавления металла [4], т. е.

$$\frac{Q_n}{m_n} \rightarrow \frac{Q_{пл}}{m_{пл}}, \quad (1)$$

где Q_n и m_n — количество тепла, содержащееся в ванне, и ее масса при температуре перегрева T_n ; $Q_{пл}$ и $m_{пл}$ — то же при температуре плавления $T_{пл}$.

Если допустить, что массы металла сварочной ванны при температуре плавления и перегрева практически одинаковы, т. е. $m_{пл} \approx m_n = m$, то выражение (1) можно записать в таком виде:

$$Q_n \rightarrow Q_{пл}. \quad (2)$$

Выполнение условия (2) возможно, в частности, за счет периодического удаления источника нагрева от точки перегрева сварочной ванны, при колебательных движениях дуги. При таких перемещениях дуги будет периодически изменяться и температурное поле нагреваемой детали.

Из теории распространения тепла при сварке следует, что тепло, вводимое в металл источником нагрева, определяется режимом сварки (наплавки) и обуславливает значение эффективного удельного теплового потока, распространяющегося в массе нагреваемого тела [12].

Тепловая энергия, вводимая дугой в сварочную ванну и расходуемая на перегрев металла в течение времени t , рассчитывается по формуле:

$$Q_{э.п.} = U_{д св} I_{св} t, \quad (3)$$

где $U_{д}$ — напряжение дуги; $I_{св}$ — ток сварки, а тепловая энергия, идущая на плавление металла сварочной ванны

$$Q_{э.п.} = q_{и} m, \quad (4)$$

где $q_{и}$ — эффективный удельный тепловой поток; $q_{и} = U_{д св} I_{и} \eta_{и}$. Тут $\eta_{и}$ — эффективный коэффициент процесса нагрева изделия дугой.

Полагая, что в процессе наплавки параметры режима остаются неизменными, затраты энергии, определяемые уравнениями (3) и (4), по аналогии с (2) также будут находиться в соотношении: $Q_{э.п.} \rightarrow Q_{пл}$.

Соответствующее соотношение будет справедливым и для температур $T_{п}$ и $T_{пл}$, т. е.:

$$T_{п} \rightarrow T_{пл}. \quad (5)$$

Тогда температуру в любой точке на границе сварочной ванны можно рассчитать по уравнению, описывающему тепловое поле движущейся сварочной дуги при наплавке на массивное тело [6]:

$$T(R) = \frac{q_{и}}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{vR}{a}}, \quad (6)$$

где $T(R)$ — температура ванны в точке с координатами, определяемыми радиус-вектором R ; $q_{и}$ — эффективный удельный тепловой поток; λ — коэффициент теплопроводности; a — коэффициент температуропроводности; v — скорость перемещения источника нагрева.

Для упрощения дальнейших расчетов преобразуем выражение (6) с использованием разложения в ряд Фурье и при этом ограничимся первыми тремя членами ряда. Тогда

$$T(R) = \frac{q_{и}}{2\pi\lambda R} \left[1 - \frac{vR}{a} + \frac{\left(\frac{vR}{a}\right)^2}{2} \right]. \quad (7)$$

На границе сварочной ванны, ограниченной изотермой $T(R) = T_{пл}$, для точки, находящейся непосредственно под дугой, уравнение (7) можно представить в виде:

$$T(R) = T_{пл} = \frac{q_{и}}{2\pi\lambda h} \left[1 - \frac{vh}{a} + \frac{\left(\frac{vh}{a}\right)^2}{2} \right]. \quad (8)$$

При интенсивном перегреве металла в этой точке можно принять:

$$T_{пл} = \frac{q_{и}}{2\pi\lambda h}. \quad (9)$$

С целью недопущения (или снижения интенсивности) роста столбчатых кристаллитов за счет снижения температуры перегрева, определим, исходя из условия (5), температуру, которую нужно компенсировать

$$\Delta T = T_{п} - T_{пл}. \quad (10)$$

Подставив в (10) выражения (8) и (9) после преобразований, получим уравнение:

$$\Delta T = \frac{q_{и}}{2\pi\lambda} \left[\frac{v}{a} - \frac{h\left(\frac{v}{a}\right)^2}{2} \right]. \quad (11)$$

Величину ΔT здесь следует принять или известной [10], или по результатам экспериментальных исследований авторов. Так, например, при наплавке в CO_2 проволокой Св08Г2С на малоуглеродистую сталь Ст.3 получено $\Delta T = 230 \dots 270^\circ\text{C}$, а при наплавке на инструментальную сталь Х12Ф1 — $\Delta T = 250 \dots 290^\circ\text{C}$.

Для эффективного снижения роста столбчатых кристаллитов можно, решая уравнение (13), найти скорость колебательных движений дуги относительно точки перегрева:

$$v = \frac{a}{h} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{h}\right)^2 - \frac{4\pi\lambda a^2}{h q_{и}} \Delta T}. \quad (12)$$

Расчеты показывают, что для стали Ст.3 искомая скорость колебаний дуги (или изделия относительно дуги) составляет $20 \dots 23$ м/ч, что близко по значению к скорости наплавки, обусловленной технологическими условиями.

Назначая параметры импульсных колебаний детали, наплавляемой по винтовой линии, следует учитывать два фактора: скорость наплавки и получение сплошного наплавленного слоя. Скорость наплавки $v_{и}$ (рис. 1) является результирующей линейной скорости вращения детали $v_{в}$ и скорости постоянного осевого смещения $v_{о}$ сварочной дуги, т. е.

$$v_{и} = \sqrt{v_{в}^2 + v_{о}^2}. \quad (13)$$

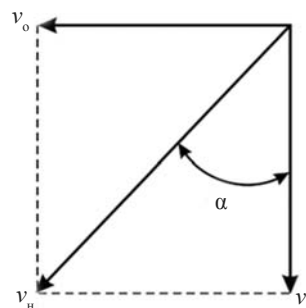


Рис. 1. К определению скорости наплавки по винтовой линии

Сплошность наплавленного слоя гарантируется соответствием шага s винтовой наплавки ширине B наплавленного валика, которая напрямую зависит от параметров сварочного процесса [14]. Для определения ширины валика применяют различные расчетные методики, например, с помощью математических моделей, составленных на основе анализа большого числа экспериментальных данных. В настоящей работе воспользуемся методикой расчета ширины валика, наплавленного в среде углекислого газа, позволяющей минимизировать количество экспериментальных данных [5]. Основа указанной методики — использование комплексного параметра P , характеризующего давление дуги, и удельной ширины шва B_0 в соотношениях [7]:

$$B_0 = \frac{B}{U_d I_{св}} 10^4, \quad (14)$$

$$P = \frac{I_{св}^2 v}{d_{п}} 10^{-4}, \quad (15)$$

где v — скорость сварки (наплавки); $d_{п}$ — диаметр электродной проволоки.

Зависимость $B_0 = f(P)$ (рис. 2), установленная нами по результатам наплавки плоских поверхностей на разных режимах электродной проволокой Св08Г2С диаметром 1,2 мм, аппроксимирована прямой:

$$B_0 = b - \frac{b}{p} P, \quad (16)$$

где b и p — максимальное и минимальное (в диапазоне использованных режимов наплавки) значение функции $B_0 = f(P)$.

Используя соотношения (14)–(16), после преобразований получаем выражение для определения ширины наплавленного валика в следующем виде:

$$B = U_d I_{св} b \cdot 10^{-4} \left(1 - \frac{I_{св}^2 v}{p d_{п}} 10^{-4} \right). \quad (17)$$

Проверку уравнения (17) выполняли путем наплавки валиков на пластину на режиме: $I_{св} = 200$ А; $U_d = 26$ В; $v = 20$ м/ч. Изготовленные поперечные макрошлифы наплавленных валиков обмерили с высокой степенью точности, полученные результаты усреднили. При расчетной ширине валика $B = 0,0062$ м средняя измеренная ширина составила 0,0066 м. Наибольшее расхождение результатов, не превышающее 10%, можно объяснить колебаниями параметров режима наплавки, а также точностью аппроксимации зависимости $B_0 = f(P)$.

Основываясь на расчетных зависимостях (11) (13) и (17), определим параметры режима колебаний цилиндрической детали (вала) при автоматической наплавке по винтовой линии.

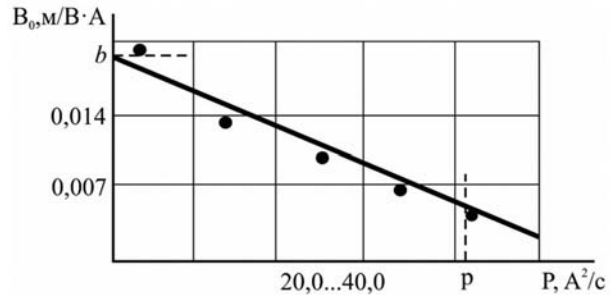


Рис. 2. Аппроксимация функции $B_0 = f(P)$:

точки — экспериментальные данные

Шаг перемещения дуги с учетом коэффициента k перекрытия соседних валиков равен:

$$h_{п} = k(B + h). \quad (18)$$

При этом величина h находится из уравнения (11):

$$h = \frac{a(2vq_{п} - 4\pi\lambda a\Delta T)}{v^2 a q_{п}}. \quad (19)$$

Составляющие скорости наплавки в соответствии с рис. 1, найдем, учитывая связь угла подъема винтовой линии валиков α с диаметром D наплавливаемой детали:

$$v_{в} = v \cos \left(\arctg \frac{h_{п}}{\pi D} \right), \quad (20)$$

$$v_{о} = v \sin \left(\arctg \frac{h_{п}}{\pi D} \right). \quad (21)$$

Частоту осевых колебаний сварочной ванны на поверхности детали (с целью подавления роста столбчатых кристаллитов) определим из условия получения линейной скорости перемещения ванны $v_{к}$, превышающей скорость роста граней кристаллитов столбчатого типа $v_{кр}$, рассчитываемой, например, по формуле [6]:

$$v_{кр} = \frac{\lambda}{Q_{пл} \rho_{кр}} \frac{dT}{dx} \cos \varphi, \quad (22)$$

где $\rho_{кр}$ — плотность кристаллита; $\frac{dT}{dx}$ — градиент температуры; φ — угол между направлением максимального температурного градиента и нормалью к грани кристаллита. (Максимальные значения скорости роста кристаллита и направления максимального температурного градиента совпадают).

Если деталь наплавляется с шагом $h_{п}$, то необходимая частота колебаний $f_{к}$ должна назначаться из условия:

$$f_{к} \geq \frac{h_{п}}{v_{к}}. \quad (23)$$

Оценочный диапазон частот, удовлетворяющий условию (23) при наплавке автоматом в углекислом газе, составляет $f_k = 1 \dots 12$ Гц.

Следует отметить, что вибрация сварочной ванны предопределяет внесение в расплавленный металл дополнительной энергии упругих колебаний, которая в значительной мере зависит от частоты f_k и амплитуды A_k колебательного движения [3]. Для случая наплавки можно принять $A_k = h_p/2$.

Результаты выполненных исследований положены в основу разработки технологии и установки для наплавки с осевой управляемой вибрацией цилиндрических деталей, в основном валов различного назначения [13]. С использованием макетного образца установки выполнены пробные наплавки на приведенных выше режимах, для восстановления шеек (посадочных мест) диаметром $D = 30$ -мм приводных валов судовых механизмов.

Анализ полученных результатов показал, что по сравнению с наплавкой, выполненной без колебаний сварочной ванны, ширина наплавленного валика увеличилась на 16...23%, в наплавленном слое трещины отсутствуют, а его износостойкость повысилась в 1,3...1,7 раза.

Улучшение механических характеристик наплавленного слоя обусловлено, главным образом, измельчением зерен металла под воздействием управляемых колебаний сварочной ванны. При этом в наплавленном металле практически отсутствуют столбчатые структуры, наблюдаемые при наплавке обычным способом (рис. 3). Увеличенная ширина валика, наплавленного с управляемой вибрацией, позволяет снизить припуск на последующую обработку детали, способствует повышению производительности процесса наплавки и, в конечном итоге, снижает общие затраты на технологический процесс.

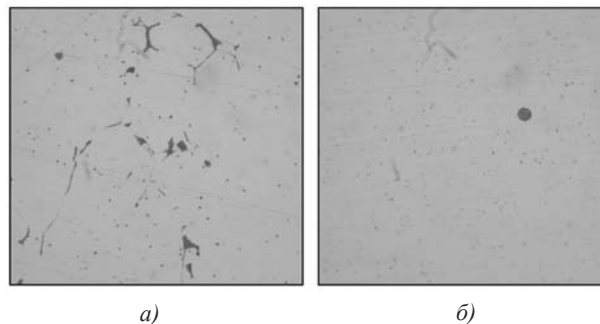


Рис. 3. Микроструктура металла, наплавленного:

а — обычным способом; б — с управляемыми колебаниями сварочной ванны ($\times 500$)

ВЫВОДЫ. 1. Разработанная инженерная методика определения параметров механического импульсного воздействия на сварочную ванну при автоматической наплавке в CO_2 обеспечивает получение достоверного результата с минимизацией числа экспериментов.

2. Механические колебания детали в процессе наплавки позволяют управлять температурой перегрева металла сварочной ванны за счёт периодического отвода дуги от центра сварочного процесса и обеспечивают механическую ломку растущих кристаллитов с последующей переплавкой образующихся обломков (осколков).

3. Автоматическая наплавка в CO_2 с управлением колебаниями сварочной ванны по рассчитанным параметрам обеспечивает увеличение ширины наплавленного валика на 16...23% и повышение износостойкости наплавленного слоя в 1,3...1,7 раза по сравнению с наплавкой, выполненной без колебаний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Болдырев, А. М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну [Текст] / А. М. Болдырев // Сварочное производство. — 1976. — № 2. — С. 1–3.
- [2] Драган, С. В. Влияние высокочастотных колебаний электрода на геометрию проплавления при автоматической наплавке под флюсом [Текст] / С. В. Драган, И. В. Симутенков, Ю. А. Ярослав и др. // Судостроение и морская инфраструктура. — 2015. — № 1 (3). — С. 76–86.
- [3] Ефимов, В. А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов [Текст] / В. А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. — М. : Металлургия. — 1995. — 272 с.
- [4] Ивочкин, И. И. Подавление роста столбчатых кристаллов методом «замораживания» сварочной ванны [Текст] / И. И. Ивочкин // Сварочное производство. — 1965. — № 12. — С. 1–3.
- [5] Коринец, И. Ф. Номограммы для определения режимов дуговой сварки в углекислом газе [Текст] / И. Ф. Коринец, Ю. И. Охай // Автоматическая сварка. — 1995. — № 10. — С. 46–48.
- [6] Кузнецов, В. Д. Кристаллы и кристаллизация [Текст] / В. Д. Кузнецов. — М. : ГПТЛ, 1954. — 411 с.
- [7] Луценко, В. Т. Методика приближённого расчёта параметров шва при сварке (наплавке) в CO_2 [Текст] / В. Т. Луценко // Сварочное производство. — 1973. — № 1. — С. 20–22.
- [8] Макара, А. М. Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений [Текст] / А. М. Макара, Б. Н. Кушнеренко // Автоматическая сварка. — 1967. — № 1. — С. 31–35.
- [9] Мирлин, Г. А. Дуговая сварка модулированным током [Текст] / Г. А. Мирлин, В. И. Агеев, В. В. Барашев // Сварочное производство. — 1980. — № 8. — С. 16–17.

- [10] **Петров, Г. Л.** Теория сварочных процессов [Текст] / Г. Л. Петров, А. С. Тумарев. — М. : Высшая школа. — 1977. — 392 с.
- [11] **Рыжов, Р. Н.** Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов [Текст] / Р. Н. Рыжов // Автоматическая сварка. — 2007. — № 2. — С. 56–58.
- [12] **Рыкалин, Н. Н.** Пространственное распределение температуры при дуговой сварке. [Текст] / Н. Н. Рыкалин. — Л. : Изд-во академии наук СССР, 1941. — 56 с.
- [13] Спосіб дугового зварювання або наплавлення. Лебедев В. О., Козырко О. А., Драган С. В., Галь А. Ф. Патент на корисну модель № 101999. В23К 9/00 Заявлено 17.04. 2015. Опубл. 12.10. 2015. — Бюл. № 19. — 8 с.
- [14] Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением [Текст] / С. А. Островская, Г. И. Лесков, Г. З. Волошкевич и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — М. : Машиностроение. — 1974. — 768 с.
- [15] **Tewari S.P.** Effects of Oscillation on Impact Property of Weldments. ISIJ International. — 1999. — Vol. 39 (8). — Pp. 809–812.
- [16] **Tewari S. P.** Influence of Longitudinal Oscillation on Tensile Properties of Medium Carbon Steel Welds of Different Thickness. ISIJ International. — 2009. — Vol. 14 (4). — Pp. 17–27.

© В. А. Лебедев, С. В. Драган, А. Ф. Галь, О. А. Козирко

Надійшла до редколегії 19.01.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. О. М. Дубовий