

УДК 621.791.92
DOI: 10.12737/20807

В.А. Лебедев, д.т.н.,
С.В. Новиков, ведущий инженер
(ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев)
E-mail: valpaton@ukr.net

Разработка алгоритма сложных колебаний для обеспечения сплошности дуговой наплавки

Представлен расчёт скорости наплавки, исходя из условия сплошности в случае гармонического колебания сварочного инструмента и одновременного периодического воздействия на сварочную ванну по заданному закону как поперёк оси шва, так и вдоль него.

Ключевые слова: сплошность; периодическое воздействие; скорость наплавки; гармоническое колебание.

V.A. Lebedev, D.Eng.,
S.V. Novikov, Principal engineer
(Paton IEW of NAS of Ukraine, Kiev)

Development of complicated oscillation algorithm for continuity assurance at arc welding deposition

A theoretical development of formulae for the definition of a speed of welding deposition on a flat is presented where in the first case cross oscillations are applied on it and in the second one – longitudinal oscillations. The law of oscillation motion for both variants and also the law of sinusoidal oscillations of a welding tool are specified. In such a way, the computation of the rate of welding deposition in both cases is carried out under conditions of an additive oscillation effect.

The realization of continuity conditions with the application of a heating source motion according to a sinusoidal law at a motionless surface to be under welding deposition – a uniform formation of a beaded weld on a width which is characterized by the position of a continuity point is assumed as a basis of the computation.

In case of a shift of the surface under welding deposition this condition will change considerably as a point of continuity will be shifted in which connection in the first case – crosswise, and in the second – lengthwise. The module of the shift of this point is specified by a differential equation which describes motion character equally both at longitudinal and transversal shift of the surface under welding deposition. Final expressions for a welding deposition rate will differ that is caused by a difference in a mathematical description of a continuity condition.

Keywords: continuity; periodical effect; welding deposition rate; harmonic oscillation.

Как известно, управление структурой металла наплавочного или сварного шва весьма эффективно осуществляется посредством наложения низкочастотных механических колебаний на сварочный инструмент или расплав сварочной ванны [1 – 5]. При этом оптимальным, с точки зрения формирования структуры, характером колебаний является гармонический [5 – 6], а величина частоты определяется собственной частотой кристаллизации данного типа металла, которая непосред-

ственно зависит от скорости сварки (наплавки) [3, 4, 7].

В случае наплавки немаловажной является проблема сплошности шва, т.е. проблема соблюдения условия формирования сплошного по ширине наплавленного валика. В математическом смысле данное условие обеспечивается в том случае, если нормаль AB в произвольной точке графика функции $y = \frac{L}{2} \sin \omega t$,

из точки A (середина между двумя максимумами) будет иметь длину, равную половине ширины поперечного шва $-l/2$ [8] (рис. 1).

Математически это описывается системой уравнений [9]:

$$\begin{cases} a = -\frac{2v_n}{L\omega \cos \omega t} \\ |x_2 - x_1| = \frac{1}{|a|} \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right) \\ \left(\frac{l}{2} \right)^2 = (x_2 - x_1)^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right)^2 \end{cases} \quad (1.1)$$

где a – угловой коэффициент нормали; ω – частота колебания; L – размах колебания.

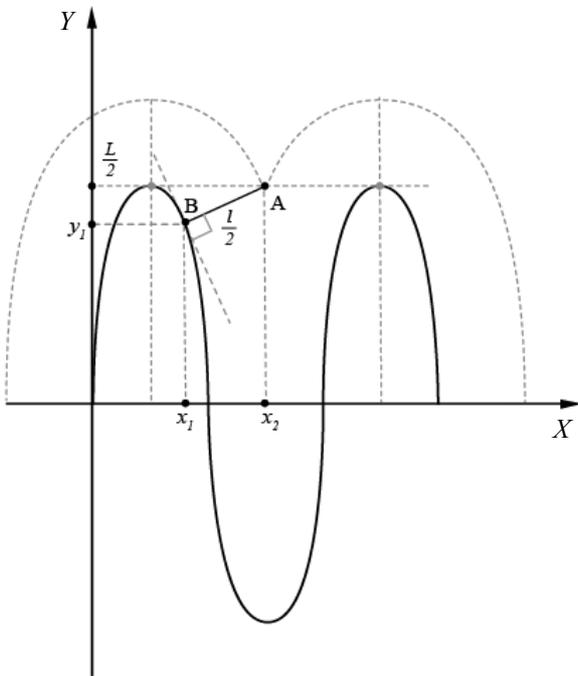


Рис. 1. Схема реализации наплавки с учётом концепции сплошности

Модуль обусловлен тем фактом, что расстояние является положительной величиной. Решение системы имеет вид:

$$v_n = \frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}} \quad (2.1)$$

Большинство авторов при исследовании влияния внешнего колебания на структуру металла шва ограничиваются одним типом такого колебания, однако, как показано в работе [10], наилучшие результаты в формировании структуры были получены при сложном дви-

жении источника нагрева, а именно при его прямолинейном и равномерном перемещении с одновременным вращением по эллиптической траектории вокруг своей оси.

Такое движение можно рассматривать как аддитивное влияние поперечных и продольных колебаний. В данной работе делается попытка математически описать этот процесс при условии наплавки на плоскую подложку, где основным будет условие соблюдения сплошности наплавленного валика.

Пусть наплавка производится на плоскую деталь, которая колеблется по определённому заданному закону $\psi(t)$, а сварочный инструмент перемещается со скоростью v_n , испытывая поперечные гармонические колебания, описываемые уравнением $y = \frac{L}{2} \sin \omega t$, где

ω – частота колебания; L – размах колебания. Тогда точка сопряжения валиков A будет

→ смещаться на некоторый вектор u перпендикулярный оси X , а отрезок нормали AB займёт положение $A'B'$ (рис. 2).

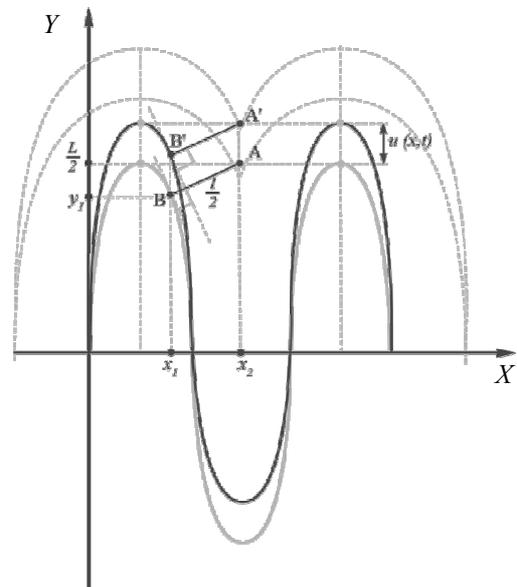


Рис. 2. Изменение положения точки сопряжения валиков при поперечных колебаниях сварочной ванны в момент времени t

Величину смещения точки A можно описать функцией $u(x,t)$, при этом координата y изменится на эту величину и станет равной

$y' = \frac{L}{2} \sin \omega t + u(x,t)$, тогда система уравнений (1.1) примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} a &= -\frac{1}{\frac{\partial y'}{\partial x}} = -\frac{1}{\frac{\partial y'}{\partial t} dt} = -\frac{1}{\frac{L\omega \cos \omega t + \frac{\partial u}{\partial t}}{v_H}} = -\frac{2v_H}{L\omega \cos \omega t + 2\frac{\partial u}{\partial t}}; \\ |x_2 - x_1| &= \frac{1}{|a|} \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t + u(x, t) \right); \\ \left(\frac{l}{2} \right)^2 &= (x_2 - x_1)^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t + u(x, t) \right)^2. \end{aligned} \right. \quad (1.2)$$

Функция $u(x, t)$ определяется из дифференциального уравнения гиперболического типа [11]:

$$\left(\frac{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) = c^2 \left(\frac{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} \right), \quad (3)$$

где $c = \sqrt{\frac{F}{\rho}}$, (F – сила обусловленная вязкостью расплава; ρ – плотность расплава) – коэффициент учитывающий силу инерции и силу поверхностного натяжения расплава в точке A , который в случае однородного расплава является постоянным.

Граничными для данного уравнения будут условия:

$$u(0, t) = u(K, t) = \psi(t), \quad (4)$$

где K – длина шва.

А начальными:

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= \psi(0); \\ \left(\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right) \Big|_{t=0} &= \left(\frac{\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} dt}{\frac{\partial x}{\partial t} dt} \right) \Big|_{t=0} = \left(\frac{\frac{\partial \psi(t)}{\partial t}}{v_H} \right) \Big|_{t=0} = \frac{1}{v_H} \left(\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0}. \end{aligned} \quad (5)$$

Объединяя выражения (3) – (5), получим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) &= c^2 \left(\frac{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} \right) \\ u(0, t) &= u(K, t) = \psi(t) \\ u(x, 0) &= \psi(0) \\ \left(\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right) \Big|_{t=0} &= \frac{1}{v_H} \left(\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Решение данной системы будет иметь вид:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\psi(0) \cos \frac{\pi n}{K} ct + \frac{K}{\pi n c} \frac{1}{v_H} \left(\left(\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} \right) \sin \frac{\pi n}{K} ct \right) \sin \frac{\pi n}{K} x + \psi(t), \quad (7)$$

где n – любое целое число.

Решение системы (1.2) с учётом (7) даёт выражение для v_H в неявном виде:

$$v_H = \frac{\left(L\omega \cos \omega t + 2 \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \right) \left(1 - \sin \omega t + 2 \frac{u(x, t)}{L} \right)}{2 \sqrt{\left(\frac{L}{L} \right)^2 - \left(1 - \sin \omega t + 2 \frac{u(x, t)}{L} \right)^2}}. \quad (2.2)$$

Учитывая условия, накладываемые на знаменатель формулы (2.2), а также формулы (4), (5), (7) и саму формулу (2.2), можно написать систему уравнений, определяющих скорость наплавки с гармоническими колебаниями сварочного инструмента и дополнительным периодическим воздействием на сварочную ванну $\psi(t)$, осуществляемого перпендикулярно оси сварного шва:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_H = \frac{\left(L\omega \cos \omega t + 2 \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \right) \left(1 - \sin \omega t + 2 \frac{u(x, t)}{L} \right)}{2 \sqrt{\left(\frac{L}{L} \right)^2 - \left(1 - \sin \omega t + 2 \frac{u(x, t)}{L} \right)^2}}; \\ u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\psi(0) \cos \frac{\pi n}{K} ct + \frac{K}{\pi n c} \frac{1}{v_H} \left(\left(\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} \right) \sin \frac{\pi n}{K} ct \right) \sin \frac{\pi n}{K} x + \psi(t); \\ \left(\frac{L}{L} \right) > 1 - \sin \omega t + 2 \frac{u(x, t)}{L}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Аналитическое решение данной системы представляет собой значительные трудности, что обуславливает её решение численными методами.

В случае продольного периодического воздействия $\psi(t)$ относительно оси шва координата x будет равна $x' = x_2 - x_1 = x_2 - x_1 + u(x, t)$ (рис. 3), а система (1.1) преобразуется к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = -\frac{1}{\frac{\partial y}{\partial x'}} = -\frac{1}{\frac{\partial y}{\partial t} dt} = -\frac{1}{\frac{L\omega}{2} \cos \omega t} = -\frac{2 \left(v_H + \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \right)}{L\omega \cos \omega t}; \\ |x_2 - x_1 + u(x, t)| = \frac{1}{|a|} \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right); \\ \left(\frac{L}{2} \right)^2 = (x_2 - x_1 + u(x, t))^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right)^2. \end{array} \right. \quad (1.3)$$

Решением данной системы будет выражение:

$$v_H = \frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}} - \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}. \quad (2.3)$$

Величина горизонтального отклонения $u(x, t)$ точка A будет определяться теми же зависимостями, а также граничными и начальными условиями, что и в случае вертикального отклонения [11]. Тогда с учётом формулы (7) окончательная формула будет иметь вид:

$$v_H = \frac{1}{2} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}} + \psi(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi n c}{K} \sin \frac{\pi n}{K} ct \sin \frac{\pi n}{K} x - \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \pm \\ & \sqrt{\left(\frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}} + \psi(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi n c}{K} \sin \frac{\pi n}{K} ct \sin \frac{\pi n}{K} x - \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right)^2 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left(\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} \right) \cos \frac{\pi n}{K} ct \sin \frac{\pi n}{K} x} \end{aligned} \right]. \quad (2.3.1)$$

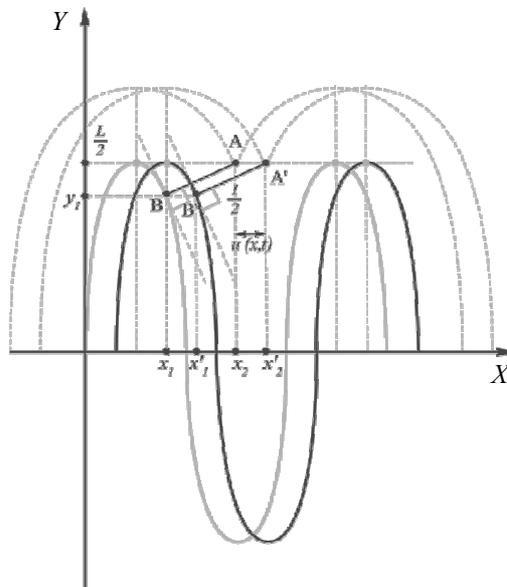


Рис. 3. Изменение положения точки сопряжения валков при продольных колебаниях сварочной ванны в момент времени t

Значения v_H , рассчитанные по формуле (2.3.1) для значений $0 < \frac{l}{L} < 2$ должны удовлетворять следующему неравенству [11]:

$$\frac{L\omega}{2} \frac{\frac{l}{L} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2}}{\left| \arcsin \left(1 - \frac{l}{L}\right) \right|} > v_H > \frac{L\omega}{2} \frac{\frac{l}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{l}{L}\right)^2}}{\left| \pi - \arcsin \left(1 - \frac{l}{L}\right) \right|}. \quad (9)$$

Данное условие обусловлено ограничениями на определённое значение v_n , накладываемое знаменателем первого члена формулы (2.3.1). Для значений $\frac{l}{L} \geq 2$ данная формула ограничений не имеет.

Выводы:

1. Приведен расчёт скорости наплавки с соблюдением условия сплошности формирования наплавочного валика с одновременным периодическим воздействием на расплав сварочной ванны 2-х процессов: колебания сварочного инструмента и расплава сварочной ванны. Рассмотрены случаи как продольных, так и поперечных колебаний сварочной ванны относительно оси сварного шва.

2. Расчёт скорости наплавки с поперечным периодическим воздействием на сварочную ванну не является однозначным, что требует применения численных методов решения.

3. Влияние на формирование структуры металла сварного шва подобных технологических решений аддитивного характера, с учётом соблюдения условия сплошности ещё не исследовано на практике, что обуславливает необходимость проведения соответствующих исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сараев, Ю.Н., Лебедев, В.А., Новиков, С.В. Анализ существующих методов управления структурой металла сварного шва // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2016. – Т.4, №1. – С. 16–26.
2. Сутырин, Г.В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны // *Автоматическая сварка*. – 1975. – № 5. – С. 7 – 10.
3. Болдырев, А.М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну // *Сварочное производство*. – 1976. – № 2. – С. 52–55.
4. Славин, Г.А. Формирование дезориентированной структуры металла шва при наложении низкочастотных возмущений на сварную ванну // *Сварочное производство*. – 1980. – № 6. – С. 3–5.
5. Аристов, С.В., Руссо, В.Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава // *Сварочное производство*. – 1982. – № 11. – С. 42–44.
6. Морозов, В.П. Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2006. – № 8. – С. 41–54.

7. Морозов, В.П. Влияние колебательного механизма кристаллизации на процесс измельчения первичной структуры металла шва и зоны термического влияния // *Наука и образование*. – 2010. – № 9. – С. 1–18.

8. Данилов, А.И. и др. Условие сплошности наплавки при движении источника нагрева по синусоидальному закону // *Сварочное производство*. – 1980. – № 2. – С. 26.

9. Лебедев, В.А., Драган, С.В., Новиков, С.В. Определение параметров импульсного механического воздействия на сварочную ванну для структуризации металла при автоматической дуговой наплавке // *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2016. № 1.

10. Чен Сяофун, Ши Цзунъяо и др. Особенности кристаллизации металла шва при ЭЛС алюминиевых сплавов со сканированием пучка // *Автоматическая сварка*. – 1988. – № 10.

11. Тихонов, А.Н., Самарский, А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. С. 23, 27, 86, 103.

REFERENCES

1. Sarayev, Yu.N., Lebedev, V.A., Novikov, S.V. Analysis of existing methods for metal structure control in weld seam // *Mechanical Engineering: network electronic scientific journal*. – 2016. – Vol.4, №1. – pp. 16–26.
2. Sutyurin, G.V. Investigation of low-frequency oscillation effect mechanism upon molten pool crystallization // *Automatic Welding*. – 1975. – № 5. – pp. 7–10.
3. Boldyrev, A.M. On mechanism of metal weld seam formation at low-frequency oscillations introduction into molten pool // *Welding Engineering*. 1976. – № 2. – pp. 52–55.
4. Slavin, G.A. Formation of disoriented metal seam structure at application of low-frequency disturbances upon molten pool // *Welding Engineering*. – 1980. – № 6. – pp. 3–5.
5. Aristov, S.V., Russo, V.L. Metal seam crystallization at melt low-frequency oscillations // *Welding Engineering*. – 1982. – № 11. – pp. 42–44.
6. Morozov, V.P. Analysis of milled structure formation at molten pool metal crystallization with application of external periodical disturbances // *College Proceedings. Mechanical Engineering*. – 2006. – № 8. – pp. 41–54.
7. Morozov, V.P. Effect of crystallization oscillation mechanism upon decomposition process of metal seam primary structure and thermal effect area // *Science and Education*. – 2010. – № 9. – pp. 1–18.
8. Danilov, A.I. et al. Condition for welding deposition continuity at heating source motion according to sinusoidal law // *Welding Engineering*. – 1980. – № 2. – pp. 26.
9. Lebedev, V.A., Dragan, S.V., Novikov, S.V. Definition of pulse mechanical effect parameters upon molten pool for metal structuring at automatic arc welding deposition // *Proceedings of Shipbuilding National University*. 2016. № 1.
10. Chen Siaofun, Shi Tsunyao et al. Peculiarities in metal seam crystallization at aluminum alloy electric welding with beam scanning // *Automatic Welding*. – 1988. – № 10.
11. Tikhonov, A.N., Samarsky, A.A. Equations of Mathematical Physics. M.: Science, 1977. pp. 23, 27, 86, 103.

Рецензент чл.-кор. В.И. Лысак