

АЛГОРИТМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ СО СЛОЖНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ СВАРОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА

Рассматривается задача получения сплошного покрытия при упрочняющей или восстанавливающей дуговой наплавке с колебаниями сварочного инструмента по сложным траекториям, основу которых составляют колебания по гармоническому закону перпендикулярные оси перемещения дуги. В аналитическом виде получены условия решения задачи обеспечения сплошного слоя наплавки с выбором определённых параметров колебаний и скорости наплавки. Адекватность результатов аналитических выводов проверена численными расчётами для конкретных режимов дуговой наплавки. Получены условия получения сплошности наплавленного слоя при колебаниях в направлениях отличных от перпендикулярных к оси перемещения сварочного инструмента. При этом доказана возможность повышения производительности процесса.

Ключевые слова: восстановление, упрочнение, наплавка, электродная проволока, установка, траектории движения, расчёт.

Важным критерием получения качественного шва при наплавке с наложением механических колебаний на сварочный инструмент является соблюдение условия сплошности, а именно: формирование сплошного валика с равномерным перекрытием по ширине. Следует отметить, что механические колебания могут быть разного типа и накладываться на сварочный инструмент или на расплав ванны.

Так в работах [1–4] при наплавке применяются колебания сварочного инструмента по трапециевидной траектории, что в одних случаях обусловлено получением большой площади наплавки, а значит увеличением производительности процесса [1–2], в других – вместе с получением широкого валика необходимо обеспечение низких значений скорости охлаждения расплава ванны [3].

Для получения мелкозернистой структуры наплавленного слоя обычно применяются гармонические колебания сварочного инструмента или расплава ванны, что обусловлено природой кристаллизационных процессов, имеющих периодичность гармонического характера при затвердевании металла [5].

Синхронизируя колебания сварочного инструмента или расплава ванны с колебаниями кристаллизационного процесса, и подбирая частотные характеристики, можно добиться максимальной степени измельчения структуры наплавленного металла, что обеспечит его высокие механические свойства.

Таким образом, обеспечение сплошности наплавленного шва с применением гармонических колебаний является актуальной задачей технологии наплавки.

Как показано в работе [6], в случае гармонических колебаний сварочного инструмента, сплошность будет обеспечена в том случае, если нормаль AB в произ-

вольной точке графика функции $y(t) = \frac{L}{2} \sin \omega t$, из

точки A (середина между двумя максимумами) будет иметь длину, равную половине ширины шва – $l/2$. В случае прямолинейного и равномерного движения сварочного инструмента вдоль оси X зависимость $y(x)$ будет иметь вид изображенный на рис. 1.

В аналитическом виде условие сплошности должно выражаться в определении скорости наплавки V_n как функции от частотных характеристик ($L/2$ – амплитуда колебания, ω – частота колебания) и ширины шва l с учётом вышеуказанного положения и размера нормали AB . Конечное выражение для V_n , представленное в работе [6] имеет вид:

$$V_n = \frac{L\omega}{2} \sqrt{\frac{(\sin \tau - 1) \cos \tau}{\frac{3}{2} \pi - \tau}}, \quad (1)$$

где τ – корень уравнения:

$$\frac{l^2}{L^2} = (\sin t - 1) \left[(\sin t - 1) + \left(\frac{3}{2} \pi - t \right) \cos t \right] \quad (2)$$

при $t = \frac{\omega x_1}{V_n}$. Как видно, формула (1) не имеет смысла

в силу того, что множитель $(\sin \tau - 1)$ на участке области допустимых значений $(-1; 0)$ для функции \sin будет отрицательным. Кроме того, исходя из подхода вывода данной формулы, непонятно, как было получено уравнение (2). Данные обстоятельства обуславливают необходимость проведения некоторой корректи-

ровки конечной формулы (1).

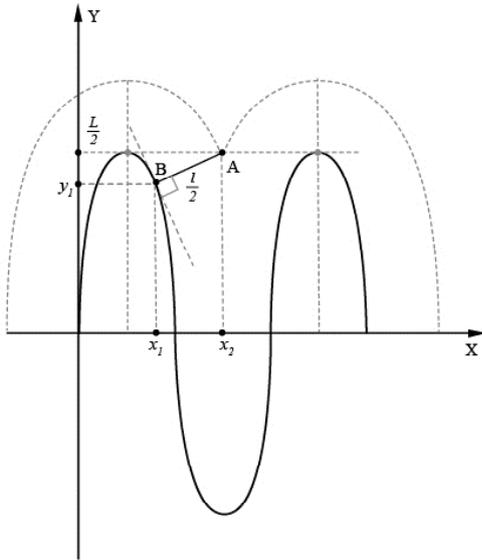


Рис. 1. Схема траектории движения источника нагрева

Рассматривая AB как участок нормали к произвольной точке x_1 графика $y(t) = \frac{L}{2} \sin \omega t$, можно написать для точек A и B (рис. 1) выражения:

$$\frac{L}{2} = ax_2 + b \quad \text{— для точки } A;$$

$$y_1 = ax_1 + b \quad \text{— для точки } B,$$

где a — угловой коэффициент нормали, b — свободный член.

Вычитая из первого уравнения второе и выражая $x_2 - x_1$ получим:

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{a} \left(\frac{L}{2} - y_1 \right). \quad (3)$$

Т. к. $x_2 - x_1$ является расстоянием, то в дальнейших рассуждениях будет рассматриваться модуль $|x_2 - x_1|$. С другой стороны, определяя AB как расстояние между двумя точками заданными в декартовой системе координат, можно написать:

$$\left(\frac{l}{2} \right)^2 = (x_2 - x_1)^2 + \left(\frac{L}{2} - y_1 \right)^2, \quad (4)$$

где $\frac{l}{2}$ — длина отрезка AB как половины ширины шва.

Угловой коэффициент нормали a в связи с тем, что величины y и x являются функциями от времени t , а

также с учётом $y(t) = \frac{L}{2} \sin \omega t$, будет равен [7]:

$$\begin{aligned} a &= -\frac{1}{\frac{dy}{dx}} = -\frac{1}{\frac{\frac{\partial y}{\partial t} \cdot dt}{\frac{\partial x}{\partial t} \cdot dt}} = -\frac{1}{\frac{\frac{\partial y}{\partial t}}{\frac{\partial x}{\partial t}}} = \\ &= -\frac{1}{\frac{L\omega \cos \omega t}{2V_H}} = -\frac{2V_H}{L\omega \cdot \cos \omega t}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, принимая во внимание, что значение y_1 есть некоторое случайное значение функции $y(t) = \frac{L}{2} \sin \omega t$, т. е. индекс 1 можно отбросить и записать систему уравнений:

$$\begin{cases} a = -\frac{2V_H}{L\omega \cos \omega t} \\ |x_2 - x_1| = \frac{1}{|a|} \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right) \\ \left(\frac{l}{2} \right)^2 = (x_2 - x_1)^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right)^2. \end{cases} \quad (6)$$

Решением данной системы будет выражение для V_H (L, l, ω):

$$V_H = \frac{L\omega}{2} \cdot \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L} \right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}}. \quad (7)$$

Из анализа данного выражения видно, что скорость наплавки не будет постоянной. Она будет равна нулю при значениях $\omega t = \frac{n\pi}{2}$, где n — любое нечётное число.

Кроме того, необходимо, чтобы было удовлетворено условие:

$$\left(\frac{l}{L} \right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2 > 0. \quad (8)$$

Т. к. по смыслу всегда $\frac{l}{L} > 0$, то данное неравенство сводится к следующему:

$$1 - \frac{l}{L} < \sin \omega t. \quad (9)$$

Из данного неравенства видно, что оно истинно при любых значениях

$\frac{l}{L} > 2$, т. е. формула (7) будет однозначно определять скорость наплавки с соблюдением условия сплошности для любого наперед заданного значения $\frac{l}{L} > 2$.

В случае $\frac{l}{L} = 2$ формула (7) будет иметь смысл для всех значений ωt кроме точки $\omega t_0 = -\frac{\pi}{2}$, где будет иметь место неопределённость вида $\frac{0}{0}$. Тогда формула (7) примет вид:

$$V_H = \lim_{\omega t_0 \rightarrow -\frac{\pi}{2}} V'_H, \quad (10)$$

где

$$V'_H = \lim_{\omega t_0 \rightarrow -\frac{\pi}{2}} \frac{L\omega}{2} \cdot \frac{(1 - \sin \omega t_0) |\cos \omega t_0|}{\sqrt{4 - (1 - \sin \omega t_0)^2}}. \quad (11)$$

Формула (11) определяет скорость сварки в окрестности точки $\omega t_0 = -\frac{\pi}{2}$. Раскрывая неопределённость и применяя теорему 3° [8], получим:

$$\begin{aligned} V_H &= \frac{L\omega}{2} \lim_{\omega t_0 \rightarrow -\frac{\pi}{2}} \frac{(1 - \sin(\omega t_0 + \frac{\pi}{2}) - \frac{\pi}{2}) \cos(\omega t_0 + \frac{\pi}{2})}{\sqrt{4 - (1 - \sin(\omega t_0 + \frac{\pi}{2}) - \frac{\pi}{2})^2}} = \\ &= \frac{L\omega}{2} \cdot \frac{\lim_{(\omega t_0 + \frac{\pi}{2}) \rightarrow 0} (1 - \cos(\omega t_0 + \frac{\pi}{2})) \sin(\omega t_0 + \frac{\pi}{2})}{\lim_{(\omega t_0 + \frac{\pi}{2}) \rightarrow 0} \sqrt{4 - (1 - \cos(\omega t_0 + \frac{\pi}{2}))^2}} = \frac{L\omega}{2} \cdot \frac{0}{2} = 0. \quad (12) \end{aligned}$$

Для значений $0 < \frac{l}{L} < 2$ очевидно не все значения скорости, вычисленные по формуле (7), будут корректны, т. к. некоторые из них могут не удовлетворять условию (8), что обуславливает необходимость дальнейшего исследования выражения (9), которое преобразуется в такое двойное неравенство:

$$\arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) < \omega t < \pi - \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right), \quad (13)$$

$$\arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) < \omega \frac{|x_2 - x_1|}{V_H} < \pi - \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right). \quad (14)$$

С учётом (3) и (5) получится следующее выражение:

$$\begin{aligned} \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) &< \frac{\omega^2 L^2 (1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{4V_H^2} < \\ &< \pi - \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right). \quad (15) \end{aligned}$$

В силу того, что данное неравенство справедливо как для значений $0 < \frac{l}{L} \leq 1$, так и для значений $1 < \frac{l}{L} < 2$, то, сохраняя знак неравенства, можно написать:

$$\begin{aligned} \left| \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) \right| &< \frac{\omega^2 L^2 (1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{4V_H^2} < \\ &< \left| \pi - \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) \right|. \quad (16) \end{aligned}$$

Анализируя данное неравенство, можно заметить, что выражение $(1 - (1 - \sin \omega t))$ можно заменить на $\frac{l}{L}$, что позволяет сделать неравенство (9) в сочетании

с условием $0 < \frac{l}{L} < 2$. Представляя в неравенстве (9) $\sin \omega t$ через $\cos \omega t$, получим:

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2 &> \sin^2 \omega t; \quad \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2 > 1 - \cos^2 \omega t; \\ 1 - \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2 &> \cos^2 \omega t. \end{aligned}$$

Таким образом, получается конечное выражение для $|\cos \omega t|$:

$$\sqrt{1 - 1 - \frac{l}{L} \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2} > |\cos \omega t| \quad (17)$$

Выражение (17), при условии $0 < \frac{l}{L} < 2$, будет лежать в пределах $0 < \sqrt{1 - \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2} < 1$, что входит в область допустимых значений функции $|\cos \omega t|$, а значит можно произвести замену, что приведёт неравенство (16) к виду:

$$\begin{aligned} \left| \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) \right| &< \frac{\omega^2 L^2 \frac{l}{L} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2}}{4V_H^2} < \\ &< \left| \pi - \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) \right|. \quad (18) \end{aligned}$$

Производя все необходимые преобразования, конечное неравенство примет вид:

$$\frac{\omega L}{2} \sqrt{\frac{\frac{l}{L} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2}}{\left|\arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right)\right|}} > V_n > \frac{\omega L}{2} \sqrt{\frac{\frac{l}{L} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2}}{\left|\pi - \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right)\right|}} \quad (19)$$

Таким образом, при определении скорости наплавки с учётом реализации условия сплошности по формуле (7) необходимо обязательно учитывать неравенство (19) для случая $0 < \frac{l}{L} < 2$. В случае $\frac{l}{L} \geq 2$ формула (7) даёт правильный результат без дополнительных условий. Хотя для дополнительной проверки можно использовать неравенство, получаемое из формулы (7) при значении $\cos \omega t = 1$ ($\sin \omega t = 0$), т. к. тогда значение V_n будет максимальным для заданного значения $\frac{l}{L}$:

$$V_n \leq \frac{\omega L}{2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - 1}} \quad (20)$$

Для проверки правильности рассуждений необходимо произвести ориентировочный расчёт, что можно сделать с помощью методики, изложенной в работе [9].

Пусть заданы такие параметры режима наплавки: частота колебаний: $\omega = 0,5$ Гц;

ток сварки: $I_n = 200$ А;

диаметр электродной проволоки: $d_3 = 1,2$ мм;

скорость наплавки [9]: $V_n = \frac{3,5 \cdot 10^3}{I_{св}} = 17,5$ м/ч;

дуговое напряжение [9]:

$$U_D = 20 + \frac{0,05 \cdot I_{св}}{\sqrt{d_3}} = 24,56 \text{ В.}$$

плотность тока: $j = \frac{4I_n}{\pi d_3^2} = \frac{4 \cdot 200}{3,14 \cdot 1,2^2} = 176,93$ А/мм².

Необходимо определить значения амплитуды колебаний L и ширины шва l .

$l = h \varphi$, где h – глубина проплавления; φ – коэффициент формы проплавления:

$$\varphi = k' (19 - 0,01 \cdot I_{св}) \frac{d_3 U_D}{I_n}; \text{ где } k'(j) = 0,92;$$

$$\varphi = 0,92(19 - 2) \frac{1,2 \cdot 24,56}{200} = 2,305;$$

$$h = 0,081 \sqrt{\frac{q}{\varphi}}, \text{ где } q - \text{погонная энергия наплавки};$$

$$q = 36 \cdot I_n \cdot U_D \frac{\eta}{V_n}, \eta = (0,7 - 0,75) - \text{эффективный}$$

КПД нагрева изделия дугой:

$$q = 36 \cdot 200 \cdot 24,56 \cdot \frac{0,7}{17,5} = 7073,28 \text{ Дж/см};$$

$$h = 0,081 \sqrt{\frac{7073,28}{2,305}} = 4,49 \text{ мм};$$

$$l = 4,49 \cdot 2,305 = 10,35 \text{ мм.}$$

Принимая значение $V_n = 17,5$ м/ч = 4,86 мм/с как максимальное, из формулы (12) определится значение

$$L: 4,86 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5L}{2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{10,35}{L}\right)^2 - 1}};$$

$$\left(\frac{10,35}{L}\right)^2 = 0,104L^2 + 1; 0,104L^4 + L^2 - 107,12 = 0;$$

$$L^4 + 9,62L^2 - 1030 = 0;$$

$$L^2 = \frac{-9,62 + \sqrt{9,62^2 + 4 \cdot 1030}}{2} = 27,642 \text{ мм}^2;$$

$$L = 5,26 \text{ мм};$$

$$\frac{l}{L} = \frac{10,35}{5,26} = 1,96.$$

Из данных расчётов видно, что необходимо проводить проверку для значения скорости наплавки по формуле (19):

$$\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 5,26}{2} \sqrt{\frac{1,96 \sqrt{1 - (1 - 1,96)^2}}{\left|\frac{\pi}{180} \arcsin(1 - 1,96)\right|}} > 4,86 > \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 5,26}{2} \sqrt{\frac{1,96 \sqrt{1 - (1 - 1,96)^2}}{\left|\pi - \frac{\pi}{180} \arcsin(1 - 1,96)\right|}};$$

$$4,13 \cdot 0,741 \cdot 6,6 > 4,86 > 4,13 \cdot 0,741 \cdot 0,57;$$

$$20,2 > 4,86 > 1,75.$$

Таким образом, видно, что условие сплошности при заданном технологическом режиме будет реализовано при скорости наплавки $V_n = 17,5$ м/ч и величине амплитуды колебания $L = 5,26$ мм, а расчётная величина ширины шва будет $l = 10,35$ мм.

Следует отметить, что данный подход определения скорости не учитывает колебательный характер границ

зоны расплава, что по мнению авторов работы [4] является следствием колебаний источника нагрева и условий отвода тепла через увеличивающийся наплавленный слой. В работе [10] данное обстоятельство подразумевает разграничение значений ординаты точки *A* и амплитуды колебательного движения источника нагрева, которые связаны между собой прямой зависимостью

через некий коэффициент *k*: $y_a = k \frac{L}{2}$ ($k = 0,8; 0,9;$

$1,0; 1,1; 1,2$). В той же работе показано, что с увеличением амплитуды колебаний источника нагрева точка *B* приближается к вершине траектории движения источника, при этом радиус пятна увеличивается, причём

при $\frac{L}{2} < 0,4$ весьма резко.

При наплавке на цилиндрический вал формула (7) также справедлива, однако в этом случае необходимо учесть, что наплавка будет вестись не прямолинейно, а вдоль траектории, которая описывается уравнением винтовой линии, определяемой таким образом [11]:

$$\begin{cases} x = R \cos \beta \\ y = R \sin \beta \\ z = c\beta, \end{cases} \quad (21)$$

где *R* – радиус вала, *c* – коэффициент пропорциональности, β – угол подъёма винтовой линии. Тогда элемент *ds* дуги линии будет таким:

$$\begin{aligned} ds &= \frac{\partial s}{\partial \beta} d\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \beta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \beta}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \beta}\right)^2} d\beta = \\ &= \sqrt{R^2 + c^2} d\beta. \end{aligned} \quad (22)$$

Выражение (5) примет вид:

$$a = -\frac{1}{\frac{\partial y}{\partial t}} = -\frac{1}{\frac{L}{2} \omega \cos \omega t} = -\frac{2\sqrt{R^2 + c^2} \theta}{L \omega \cos \omega t}. \quad (23)$$

где θ – угловая скорость вращения вала. Таким образом система (6) будет такой:

$$\begin{cases} a = -\frac{2\sqrt{R^2 + c^2} \theta}{L \omega \cos \omega t} \\ ds = \sqrt{R^2 + c^2} d\beta = \frac{1}{|a|} \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right) \\ \left(\frac{l}{2} \right)^2 = (ds)^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right)^2. \end{cases} \quad (24)$$

Решением данной системы будет выражение:

$$\theta = \frac{L \omega}{2\sqrt{R^2 + c^2}} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}}. \quad (25)$$

С учётом формулы $\vec{v} = \vec{\theta} \times \vec{r}$ и $|\vec{r}| = R$, а также при условии $\vec{\theta} \perp \vec{r}$ получим конечную формулу для модуля скорости сварки вдоль винтовой линии:

$$V_n = \frac{RL\omega}{2\sqrt{R^2 + c^2}} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}}. \quad (26)$$

Увеличить степень сплошности, а значит увеличить эффективность наплавки, можно изменив положение сварочного инструмента на некоторый угол $\alpha \neq 0$ от вертикального положения таким образом, чтобы колебания осуществлялись по наклонной синусоиде (рис. 2).

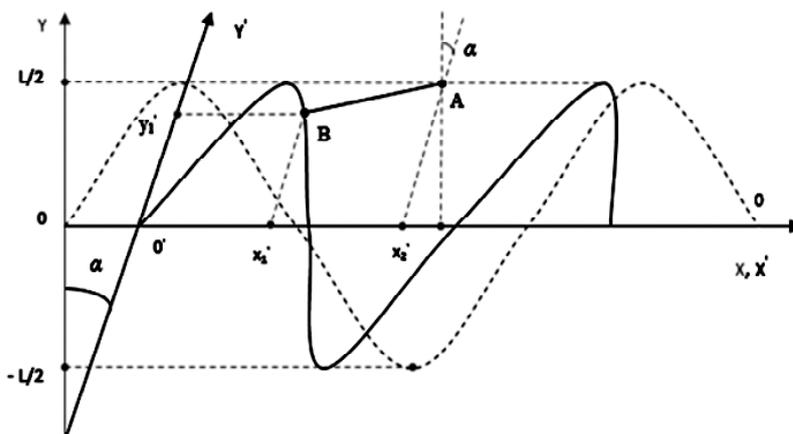


Рис. 2. Схема траектории движения источника нагрева в системе координат (0; x' ; y')

Наклонная синусоида будет иметь место при преобразовании прямоугольной системы координат таким образом, чтобы ось Y' повернулась на заданный угол α относительно оси Y , а ось X' совпала с осью X . Координаты в косоугольной системе $(0; x'; y')$ будут связаны с координатами в прямоугольной $(0; x; y)$ таким образом:

$$\begin{cases} x = x' + y' \sin \alpha \\ y = y' \cos \alpha. \end{cases} \quad (27)$$

Тогда

$$\begin{cases} x' = x - y \tan \alpha \\ y' = \frac{y}{\cos \alpha}. \end{cases} \quad (28)$$

Запись системы уравнений (6) в косоугольной системе координат будет выглядеть следующим образом (рис. 3):

$$\begin{cases} y'_2 - y'_1 = (y_2 - y_1) \frac{1}{\cos \alpha} = \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right) \frac{1}{\cos \alpha} \\ x'_2 - x'_1 = |x_2 - x_1| + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right) \tan \alpha \\ \left(\frac{L}{2} \right)^2 = ((x'_2 - x'_1) + (y'_2 - y'_1) \sin \alpha)^2 + ((y'_2 - y'_1) \cos \alpha)^2. \end{cases} \quad (29)$$

где $|x_2 - x_1| = \frac{1}{|a|} \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right)$, $a = -\frac{2V_H}{L\omega \cos \omega t}$,

$$y_1 = \frac{L}{2} \sin \omega t, \quad y_2 = \frac{L}{2}.$$

Решением данной системы будет выражение (7). Данный факт показывает, что при условии сплошности, выдвинутом в работе [6], сдвиг траектории движения источника нагрева на угол α относительно оси Y

даст такой же эффект, как и при наплавке в прямоугольной системе координат.

Однако можно изменить само условие сплошности (рис. 4): пусть при амплитуде $\frac{L}{2}$ траектория источника

нагрева, движущегося по гармоническому закону, будет отклонена на некоторый угол α от оси Y . Тогда найдётся положение при котором валик, проходя через нормаль в точке B в момент времени ωt_0 , будет пересекаться в т. A с валиком, формирующемся в момент времени $(\omega t_0 + \pi/2)$ и проходящем через положение касательной в т. C . При этом ордината точки A не меняется в ортогональной системе координат и будет равна $\frac{L}{2}$. Тогда образованный прямоугольный треугольник с прямым углом при вершине A будет иметь такие дли-

ны сторон: $AB = \frac{l}{2}$; $BC = x'_2 - x'_1$; $AC = \frac{l}{2} \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$,

что видно из чертежа (рис.4). Таким образом, можно получить систему уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{l}{2} \right)^2 + \left(\frac{l}{2} \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \right)^2 = (x'_2 - x'_1)^2 \\ x'_2 - x'_1 = |x_2 - x_1| + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right) \tan \alpha, \end{cases} \quad (30)$$

где $|x_2 - x_1| = \frac{1}{|a|} \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right)$, $a = -\frac{2V_H}{L\omega \cos \omega t}$. Решение которой будет иметь вид:

$$V_H = \frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) \cos \omega t}{\frac{1}{\sin \alpha} \left(\frac{1}{L} \right) - (1 - \sin \omega t) \tan \alpha}. \quad (31)$$

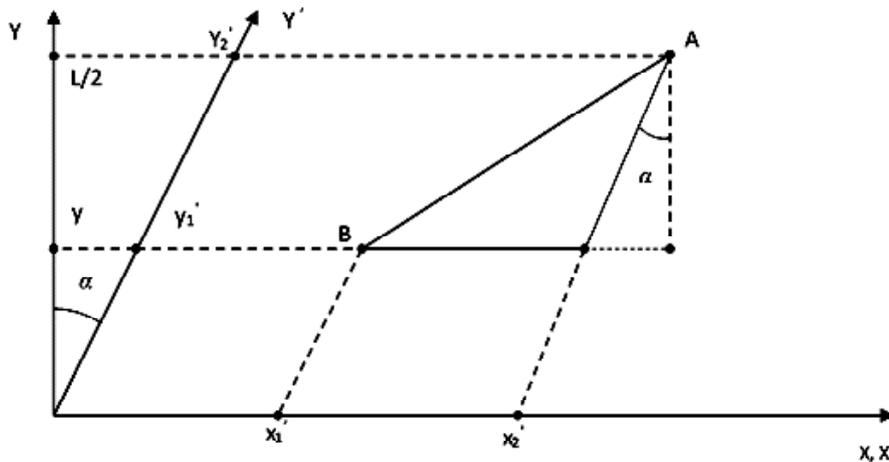


Рис. 3. Графическое представление геометрических закономерностей при выводе системы (29)

Т. к. справедливо неравенство $0 \leq (1 - \sin \omega t) \leq 2$, то значение α должно удовлетворять условию:

$$\frac{1}{\sin \alpha} \left(\frac{l}{L} \right) - (1 - \sin \omega t) \tan \alpha \neq 0; \quad (32)$$

$$(0 \div 2) \neq \frac{\left(\frac{l}{L} \right)}{\sin \alpha \tan \alpha} \quad (33)$$

α можно определить из второго уравнения системы

$$(28) \text{ где } y' = \frac{L}{2} + \frac{l}{2}, \text{ а } y = \frac{L}{2}:$$

$$\left(\frac{L}{2} + \frac{l}{2} \right) = \frac{\frac{L}{2}}{\cos \alpha}. \quad (34)$$

Откуда

$$\alpha = \arccos \left(\frac{1}{1 + \frac{l}{L}} \right). \quad (35)$$

Таким образом, угол β должен удовлетворять системе уравнений:

$$\begin{cases} (0 \div 2) \neq \frac{\left(\frac{l}{L} \right)}{\sin \alpha \tan \alpha} \\ \alpha = \arccos \left(\frac{1}{1 + \frac{l}{L}} \right). \end{cases} \quad (36)$$

В случае наплавки на цилиндрическую деталь формула (31) примет вид:

$$V_H = \frac{RL\omega}{2\sqrt{R^2 + r^2}} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\frac{1}{\sin \alpha} \left(\frac{l}{L} \right) - (1 - \sin \omega t) \tan \alpha}, \quad (37)$$

где R – радиус вала, c – коэффициент пропорциональности между углом поворота вала и осью вращения.

Обработка технологических режимов, при которых будет обеспечена не только мелкозернистая структура металла наплавленного валика, но и обеспечена максимальная его сплошность, обуславливает необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований.

Выводы

1. Откорректирована конечная формула (1) для определения скорости наплавки с учётом условия сплошности.

2. Из формулы (7) видно, что для соблюдения сплошности скоростной режим должен быть тем меньше, чем больше отношение ширины (l) шва к размаху колебания (L).

3. Получены пределы, в которых должно лежать значение скорости наплавки, рассчитанное по формуле

(7) в зависимости от заданного отношения $\frac{l}{L}$.

4. Получена формула для расчёта скорости с соблюдением условия сплошности при наплавке на цилиндрический вал.

Выдвинута иная точка зрения на условие сплошности на основе идеи сдвига траектории движения источника нагрева от вертикали на угол α , благодаря чему можно увеличить эффективность формирования шва при наплавке. Получено аналитическое выражение для скорости наплавки, значения и пределы изменения угла α .

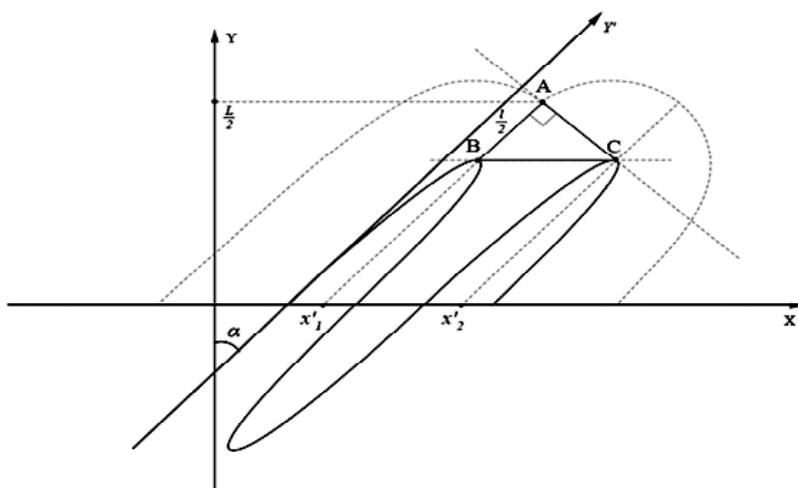


Рис. 4. Формирование наплавочного валика при движении источника нагрева по траектории наклонной синусоиды

Список литературы

1. Ерофеев В. А. Особенности технологии дуговой наплавки упрочняющих слоёв на стальную подложку / Ерофеев В. А., Захаров С. К., Кузнецов О. В. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 2. – Ч. I. – С. 132–137.
2. Судник В. А. Физико-математическое моделирование процесса широкослойной наплавки с поперечными колебаниями плазматрона / Судник В. А., Ерофеев В. А., Страхова Е. А. // Сварка и диагностика. – № 3. – 2009. – С. 32–38.
3. Ерофеев В. А. Компьютерный инженерный анализ наплавки порошковой проволокой с сердечником / Ерофеев В. А., Масленников В. А., Зайцев О. И. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 2. Ч. I. – С. 52–60.
4. Судник В. А. Анализ качества кольцевой плазменной наплавки на основе компьютерного моделирования / Судник В. А., Ерофеев В. А., Страхова Е. А. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 4. – Ч. I. – С. 200–211.
5. Морозов В. П. Анализ условий формирования измельчённой структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений / Морозов В. П. // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 8. – С. 41–54.
6. Условие сплошности наплавки при движении источника нагрева по синусоидальному закону / [Данилов А. И., Гартманова И. С., Колосова Н. А. и др.] // Сварочное производство. – № 2. – 1980. – 26 с.
7. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т1 / Фихтенгольц Г. М. – М. : Наука, 1969. – 523 с.
8. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т1 / Фихтенгольц Г. М. – М. : Наука, 1969. – 59 с.
9. Катаев Р. Ф. Расчет основных параметров режима механизированной дуговой сварки плавящимся электродом: методические указания к курсовому и дипломному проектированию/ Сост. : Р. Ф. Катаев. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. – С. 8–17.
10. Зотов Ю. Ф. Условие сплошности наплавки при гармоническом движении источника нагрева / Зотов Ю. Ф., Гордиенко Е. П. // Сварочное производство. – № 1. – 1993. – С. 14–15.
11. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т1 / Фихтенгольц Г. М. – М. : Наука, 1969. – 521 с.

Одержано 01.12.2015

Лебедєв В.О., Новіков С.В. Алгоритм дугового наплавлення циліндричних деталей зі складними рухами зварювального інструменту

Розглядається завдання одержання суцільного покриття за умов зміцнюючого або відновлюваного наплавлення з коливаннями зварювального інструмента по складних траєкторіях, основу яких становлять коливання за гармонічним законом, які є перпендикулярними осі переміщення дуги. В аналітичному вигляді отримано умови забезпечення суцільного шару наплавлення з вибором певних параметрів коливань і швидкості наплавлення. Адекватність результатів аналітичних висновків перевірено чисельними розрахунками для конкретних режимів дугового наплавлення. Отримано умови одержання суцільного наплавленого шару під час коливань у напрямках, які є відмінними від перпендикулярних до осі переміщення зварювального інструмента. Доведено можливість підвищення продуктивності процесу.

Ключові слова: відновлення, зміцнення, наплавлення, електродний дріт, установка, траєкторії руху, розрахунок.

Lebedev V., Novikov S. Algorithm for arc welding of cylindrical parts with complex welding tools movements

The obtaining of a continuous coating by reinforcing or recovering arc surfacing with the vibrations of the welding tool through complex trajectories perpendicular to the axis of arc movement, which are based on harmonic oscillation is presented. The analytical conditions are obtained to ensure a continuous layer of surfacing with a choice of certain oscillation parameters and welding speed. The adequacy of the results of analytical conclusions is verified by numerical calculations for specific modes of arc welding. Conditions are developed for obtaining the continuous deposited layer during vibration in directions other than perpendicular to the axis of movement of the welding tool. The possibility of increasing the productivity of the process is proved.

Key words: renewal, strengthening, weld deposition, electrode wire, plant, movement trajectory, calculation.