УДК 621.791

Д-р техн. наук В. А. Лебедев, С. В. Новиков

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПРИ ПРОГРАММНО ИЗМЕНЯЕМЫХ ПАРАМЕТРАХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Получена формула для определения скорости наплавки, осуществляемой в условиях воздействия механических колебаний на сварочный инструмент, сварочную ванну и длину дуги, исходя из условия сплошности ширины наплавляемого валика.

Ключевые слова: *слошность, периодическое воздействие, скорость наплавки, гармоническое колебание, длина дуги.*

Применение механического периодического воздействия на металл сварочной ванны в процессе наплавки позволяет не только контролировать формирование структуры, но и обеспечивать снижение глубины проплавления основного металла, что является не менее актуальной задачей.

Еще более уменьшить проплавление можно за счет периодического изменения длины дуги. Реализовать такое решение можно за счет применения станины с возможностью ее отклонения от вертикального положения в обе стороны (рис. 1).

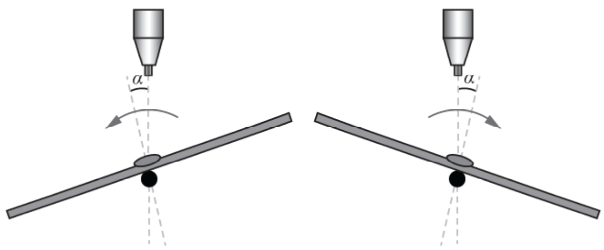

Рис. 1. Принципиальный вид подвижной станины

Накладывая поперечные колебания на сварочный инструмент по наперед заданному гармоническому закону и асинхронный им периодический закон отклонения станины на некоторый угол, можно реализовать поставленную задачу.

Как показано в работах [1–3], в случае наложения внешних колебаний на расплав или сварочный инструмент, актуальной задачей является соблюдение сплошности наплавочного валика, т. е. его равномерного формирования по ширине. Из математического описания поставленной задачи определяется скорость наплавки, как функция времени через заданные законы колебаний станины и сварочного инструмента.

Согласно работе [1], сплошность будет иметь место, если нормаль *AB,* проведенная из точки сопряжения *A* (середина между двумя максимумами синусоиды) и произвольной точки графика функции $y = \frac{L}{2}\sin\omega t$ будет иметь длину, равную половине ширины поперечного шва – $l/2$ (рис. 2).

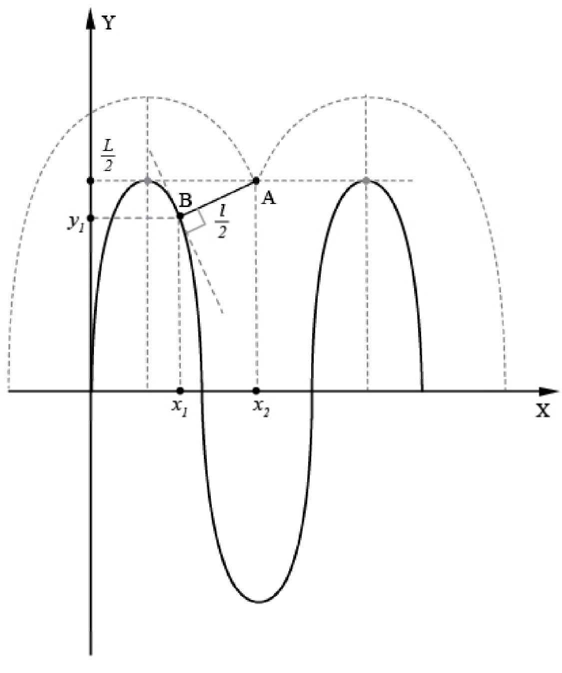

Рис. 2. К пояснению концепции сплошности при наплавке на неподвижную деталь сварочным инструментом с наложенными на него гармоническими колебаниями

Так в работе [3] представлена система уравнений, описывающая формирования наплавочного валика в условиях асинхронных поперечных колебаний, как сварочного инструмента, так и сварочной ванны. Где $y = \frac{L}{2}\sin\omega t$ – закон перемещения сварочного инструмента, *щ* – частота колебания, *L* – размах колебания, *a* – угловой коэффициент нормали *AB*, $V_н$ – скорость наплавки, $\vec{u}$ – вектор, характеризующий отклонение точки A, перпендикулярный оси x и учитывающий поперечные колебания сварочной ванны по заданному закону ш(t). Внешний вид системы уравнений:

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

Пусть сварочный инструмент испытывает колебания по гармоническому закону $y=\frac{L}{2}\sin\omega t$, а угол отклонения от горизонтального положения станины – $\alpha(t)$. Тогда в некоторый момент времени t взаимное положение сварочного инструмента и формируемого наплавочного валика будет таким, что смещение точки A по оси y будет определяться выражением: $y=y'\cos a(t)=\left(\frac{L}{2}-\frac{L}{2}\sin\omega t\right)\cos\alpha(t)$, а изменение ширины шва, обусловленное изменением длины, – Δl (рис. 3). $|Ay_1|=|A'y'_1|=\left(\frac{L}{2}-\frac{L}{2}\sin\omega t\right)$). Тогда система (1) примет вид:

$$\begin{cases} a=-\dfrac{1}{\dfrac{\partial y}{\partial x}}=-\dfrac{1}{\dfrac{\dfrac{\partial y}{\partial t}dt}{\dfrac{\partial x}{\partial t}dt}}=-\dfrac{1}{\dfrac{\dfrac{L\omega}{2}\cos\omega t\cos\alpha(t)-\dfrac{\partial\alpha(t)}{\partial t}\dfrac{L}{2}\sin\omega t\sin\alpha(t)}{V_н}}= \\ =-\dfrac{2V_н}{L\omega\cos\omega t\cos\alpha(t)-\dfrac{\partial\alpha(t)}{\partial t}L\sin\omega t\sin\alpha(t)} \\ |x_2-x_1|=\dfrac{1}{|a|}\left(\dfrac{L}{2}-\dfrac{L}{2}\sin\omega t\right)\cos\alpha(t) \\ \left(\dfrac{l-\Delta l}{2}\right)^2=(x_2-x_1)^2+\left(\dfrac{L}{2}-\dfrac{L}{2}\sin\omega t\right)^2\cos^2\alpha(t). \end{cases} \quad (2)$$

С учетом того, что данный процесс является наплавкой, значение ширины зоны термического влияния (ЗТВ) – $l_{зтв}$ задается формулой [4]:

$$l_{зтв}=\sqrt{\frac{8q}{\pi eV_нc\rho\Delta T}}\,, \quad (3)$$

где $q=\eta U_\partial I_н$ [Вт] – эффективная мощность источника питания, η – коэффициент мощности, U_∂ – напряжение на дуге, $I_н$ – ток наплавки, e – основание натурального логарифма, $c\rho$ [Дж/(мм^3·К] – объемная теплоемкость стали, ΔT [К] – разность температур точек в центре сварочной ванны и в ЗТВ. Тогда ширина шва и ширина ЗТВ могут быть связаны через некий безразмерный коэффициент G: $l=Gl_{зтв}$. С учетом формулы (3) ширина шва определится выражением:

$$l=G\sqrt{\frac{8\eta U_\partial I_н}{\pi eV_нc\rho\Delta T}}\,. \quad (4)$$

Тогда изменение ширины шва Δl ,вызванное изменением длины дуги $\Delta\delta$, определится следующим образом:

$$\Delta l=G\sqrt{\frac{8\eta\Delta U_\partial\Delta I_н}{\pi eV_нc\rho\Delta T}}=G\sqrt{\frac{8\eta\Delta E\Delta\delta\Delta I_н}{\pi eV_нc\rho\Delta T}}\,, \quad (5)$$

где $\Delta I_н$ и ΔE [В/мм] – соответственно изменение тока наплавки и напряженности электрического поля, обусловленное $\Delta\delta$. Принимая горение дуги при атмосферном давлении, можно написать выражения для ΔE [5]:

$$\Delta E=2{,}05\cdot10^8\frac{U_i^{\frac{29}{12}}g_e^{\frac{1}{3}}}{\Delta I_\partial^{\frac{1}{3}}a^{\frac{1}{3}}}\,, \quad (6)$$

где U_i [эВ] – потенциал ионизации атомов газа, a – отношение статистических весов ионов и атомов, g_e [м^2] – сечение столкновения частиц с электронами (рамзауэровское сечение). При подстановке выражения (5) в (6) получится:

$$\Delta l=G\Delta I_\partial^{\frac{1}{3}}\sqrt{\frac{16{,}4\cdot10^8\eta\Delta\delta U_i^{\frac{29}{12}}g_e^{\frac{1}{3}}}{\pi eV_нc\rho\Delta Ta^{\frac{1}{3}}}}\,. \quad (7)$$

Объединяя в последней формуле все параметры в некоторый постоянный коэффициент R, которые не изменяются в зависимости от приращения дуги $\Delta\delta$, а также с учетом того, что $\Delta I_\partial^{\frac{1}{3}}$ незначительно по модулю и его изменение, вызванное так же мало, то вместо него можно принять некое усредненное постоянное значение. Тогда получим формулу:

$$\Delta l=R\sqrt{\frac{y\sin\alpha(t)}{V_н}}\,, \quad (8)$$

где $R=G\left|\Delta I^{\frac{1}{3}}\right|_{ср}\sqrt{\frac{16{,}4\cdot10^8\eta U_i^{\frac{29}{12}}g_e^{\frac{1}{3}}}{\pi ec\rho\Delta Ta^{\frac{1}{3}}}}$ [м/с$^{1/2}$],

$\Delta\delta=y\sin\alpha(t)$ (рис. 3).

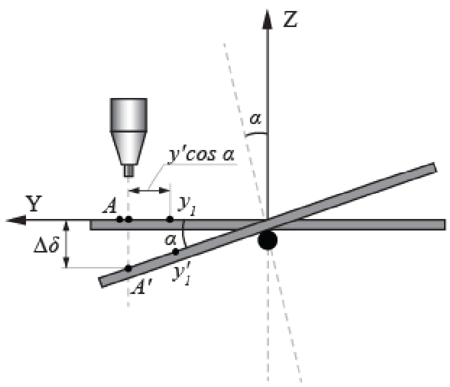

Рис. 3. К составлению системы уравнений (2)

Тогда подстановка (8) в систему (2) даст окончательную формулу:

$$\left(\frac{l-R\sqrt{\frac{\left(\frac{L}{2}-\frac{L}{2}\sin\omega t\right)\sin\alpha(t)}{V_{н}}}}{2}\right)^2 = \frac{\left(L\omega\cos\omega t\cos\alpha(t)-\frac{\partial\alpha(t)}{\partial t}L\sin\omega t\sin\alpha(t)\right)^2\left(\frac{L}{2}-\frac{L}{2}\sin\omega t\right)^2\cos^2\alpha(t)}{4V_{н}^2}+$$
$$+\left(\frac{L}{2}-\frac{L}{2}\sin\omega t\right)^2\cos^2\alpha(t). \qquad (9)$$

С учетом некоторых сокращений, формула (5) примет вид:

$$\left(\frac{l}{L}\frac{1}{\cos\alpha(t)}-\frac{R\sqrt{\left(\frac{L}{2}-\frac{L}{2}\sin\omega t\right)\frac{\tan\alpha(t)}{\cos\alpha(t)}}}{L\sqrt{V_{н}}}\right)^2 =$$
$$=(1-\sin\omega t)^2\left(\frac{\left(L\omega\cos\omega t\cos\alpha(t)-\frac{\partial\alpha(t)}{\partial t}L\sin\omega t\sin\alpha(t)\right)^2}{4V_{н}^2}+1\right). \qquad (10)$$

Заданное выражение относительно $V_{н}$ можно привести к виду:

$$V_{н}^2-\frac{2\left(\frac{lR}{L^2}\right)(1-\sin\omega t)^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{L}{2}\sin\alpha(t)}}{\left(\left(\frac{l}{L}\right)^2-(1-\sin\omega t)^2\cos^2\alpha(t)\right)}V_{н}^{3/2}+$$
$$+\frac{\left(\frac{R^2}{2L}\right)(1-\sin\omega t)^{\frac{3}{2}}\sin\alpha(t)}{\left(\left(\frac{l}{L}\right)^2-(1-\sin\omega t)^2\cos^2\alpha(t)\right)}V_{н}-$$
$$-\frac{\left(L\omega\cos\omega t\cos\alpha(t)-\frac{\partial\alpha(t)}{\partial t}L\sin\omega t\sin\alpha(t)\right)^2(1-\sin\omega t)^2\cos^2\alpha(t)}{4\left(\left(\frac{l}{L}\right)^2-(1-\sin\omega t)^2\cos^2\alpha(t)\right)}=0. \qquad (11)$$

Решение данного уравнения относительно $V_{н}$ можно осуществить посредством метода Феррари [6].

Проведя 1-ю замену:

$\sqrt{V_{н}}=x;$

$$-\frac{2\left(\frac{lR}{L^2}\right)(1-\sin\omega t)^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{L}{2}\sin\alpha(t)}}{\left(\left(\frac{l}{L}\right)^2-(1-\sin\omega t)^2\cos^2\alpha(t)\right)}=A;$$

$$\frac{\left(\frac{R^2}{2L}\right)(1-\sin\omega t)^{\frac{3}{2}}\sin\alpha(t)}{\left(\left(\frac{l}{L}\right)^2-(1-\sin\omega t)^2\cos^2\alpha(t)\right)}=B;$$

$$-\frac{\left(L\omega\cos\omega t\cos\alpha(t)-\frac{\partial\alpha(t)}{\partial t}L\sin\omega t\sin\alpha(t)\right)^2(1-\sin\omega t)^2\cos^2\alpha(t)}{4\left(\left(\frac{l}{L}\right)^2-(1-\sin\omega t)^2\cos^2\alpha(t)\right)}=D,$$

уравнение (11) можно свести к виду:

$$x^4+Ax^3+Bx^2+D=0. \qquad (12)$$

Посредством подстановки $y=x-\frac{A}{4}$ данное уравнение примет вид:

$$y^4+py^2+qy+r=0, \qquad (13)$$

где $p=B-\frac{3A^2}{8}$; $q=\frac{A^3}{8}-\frac{AB}{2}$; $r=\frac{3A^4}{256}+\frac{A^2B}{16}+D$. Тогда уравнение (13) можно свести к совокупности уравнений:

$$\left[\begin{array}{l} y^2-y\sqrt{2s}\,y+\left(\frac{p}{2}+s+\frac{q}{2\sqrt{2s}}\right)=0 \\ y^2+y\sqrt{2s}\,y+\left(\frac{p}{2}+s-\frac{q}{2\sqrt{2s}}\right)=0 \end{array}\right., \qquad (14)$$

где s – корень кубического уравнения: $q^2-8s\left(s^2+ps-r+\frac{p^2}{4}\right)=0$, которое после преобразований будет таким:

$$s^3-\frac{p}{2}s^2-rs+\left(\frac{rp}{2}-\frac{q^2}{8}\right)=0. \qquad (15)$$

Вводя обозначения через 2-ю замену $-\frac{p}{2}=a$;

$-r = b$; $\frac{rp}{2} - \frac{q^2}{8} = c$, (15) преобразуется в:

$$s^3 + as^2 + bs + c = 0 . \tag{16}$$

Обозначая $s = z - \frac{a}{3}$, (16) примет вид:

$$z^3 + p_1 z + q_1 = 0 . \tag{17}$$

где $p_1 = b - \frac{a^2}{3}$; $q_1 = c + \frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3}$. Корни которого будут иметь вид:

$$z_1 = \sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} + \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} - \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}} ;$$

$$z_2 = -\frac{1}{2}\left(\sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} + \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} - \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}}\right) + i\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} + \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}} - \sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} - \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}}\right) ;$$

$$z_3 = -\frac{1}{2}\left(\sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} + \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} - \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}}\right) - i\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} + \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}} - \sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} - \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}}\right) ,$$

где I – мнимая единица. Каждый из этих корней должен удовлетворять уравнению (11). За критерий соответствия можно принять частный случай наплавки, при котором значение $\alpha(t_0) = 0$. Тогда коэффициенты уравнения (11) будут $A = B = 0$, а само уравнение преобразуется в выражение:

$$V_н\Big|_{t_0} = \frac{L\omega}{2}\frac{(1 - \sin\omega t_0)\cos\omega t_0}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin\omega t_0)^2}} . \tag{18}$$

Как показано в [2], это выражение определяет скорость наплавки при поперечных гармонических колебаниях сварочного инструмента и неподвижной станине, т. е. является частным случаем процесса наплавки, описываемого в данной статье. Таким образом, при $A = B = 0$, будет $p = q = a = c = q_1 = 0$, а корни кубического уравнения будут равны:

$$z_1 = \sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} = \sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} - \sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} = 0 ;$$

$$z_2 = -\frac{1}{2}\left(\sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}}\right) + i\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} - \sqrt[3]{-\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}}\right) =$$

$$= -\frac{1}{2}\left(\sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} - \sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}}\right) + i\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}}\right) =$$

$$= i\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}}\right) = i\sqrt{p_1} ;$$

$$_3 = -\frac{1}{2}\left(\sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}}\right) - i\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} - \sqrt[3]{-\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}}\right) =$$

$$= -\frac{1}{2}\left(\sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} - \sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}}\right) - i\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{\sqrt{\frac{p_1^3}{27}}}\right) =$$

$$= -i\sqrt{p_1} .$$

Совокупность уравнений (14) вообще не имеют смысла для $z_1 = 0$. Для остальных корней получается: $z_{2,3} = s_{2,3} = \pm i\sqrt{p_1} = \pm i\sqrt{b} = \pm i\sqrt{-r} = \mp\sqrt{r} = \mp\sqrt{D}$. Тогда совокупность (14) примет вид:

$$\left[\begin{array}{l} y^2 - y\sqrt{2\left(-\sqrt{D}\right)}y + \left(-\sqrt{D}\right) = 0 \\ y^2 + y\sqrt{2\left(-\sqrt{D}\right)}y + \left(-\sqrt{D}\right) = 0 \\ y^2 - y\sqrt{2\left(\sqrt{D}\right)}y + \left(\sqrt{D}\right) = 0 \\ y^2 + y\sqrt{2\left(\sqrt{D}\right)}y + \left(\sqrt{D}\right) = 0 . \end{array}\right. \tag{19}$$

Откуда с учетом $\sqrt{V_н}\Big|_{t_0} + \frac{A}{4} = y$, решение совокупности (19) будет выглядеть следующим образом (при $A = 0$):

$$\left[\begin{array}{l} V_н^{1}\Big|_{t_0} = -\sqrt{D}i \\ V_н^{2}\Big|_{t_0} = \sqrt{D}i . \end{array}\right. \tag{20}$$

Исходя из значения D, удовлетворять уравнению (15) будет только значение $V_н^{1}\Big|_{t_0} = -\sqrt{D}i$, причем оно будет иметь место как при решении первого уравнения совокупности (14) при s_2, так и второго, только при s_3. Таким образом, в общем виде решение совокупности уравнений (14) будет содержать корни $s_{2,3}$ уравнения (15), которые через коэффициенты p, q, r будут иметь вид:

$$s_{2,3}=-\frac{1}{2}\left(\sqrt[3]{-\frac{\left(\left(\frac{rp}{2}-\frac{q^2}{8}\right)-\frac{2\left(\frac{p}{2}\right)^3}{27}-\frac{pr}{6}\right)}{2}+\sqrt{\frac{\left(\left(\frac{rp}{2}-\frac{q^2}{8}\right)-\frac{2\left(\frac{p}{2}\right)^3}{27}-\frac{pr}{6}\right)^2}{4}-\frac{\left(r+\frac{\left(\frac{p}{2}\right)^2}{3}\right)^3}{27}}}+\sqrt[3]{-\frac{\left(\left(\frac{rp}{2}-\frac{q^2}{8}\right)-\frac{2\left(\frac{p}{2}\right)^3}{27}-\frac{pr}{6}\right)}{2}-\sqrt{\frac{\left(\left(\frac{rp}{2}-\frac{q^2}{8}\right)-\frac{2\left(\frac{p}{2}\right)^3}{27}-\frac{pr}{6}\right)^2}{4}-\frac{\left(r-\frac{\left(\frac{p}{2}\right)^2}{3}\right)^3}{27}}}\right)$$

$$\pm i\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sqrt[3]{-\frac{\left(\left(\frac{rp}{2}-\frac{q^2}{8}\right)-\frac{2\left(\frac{p}{2}\right)^3}{27}-\frac{pr}{6}\right)}{2}+\sqrt{\frac{\left(\left(\frac{rp}{2}-\frac{q^2}{8}\right)-\frac{2\left(\frac{p}{2}\right)^3}{27}-\frac{pr}{6}\right)^2}{4}-\frac{\left(r+\frac{\left(\frac{p}{2}\right)^2}{3}\right)^3}{27}}}-\sqrt[3]{-\frac{\left(\left(\frac{rp}{2}-\frac{q^2}{8}\right)-\frac{2\left(\frac{p}{2}\right)^3}{27}-\frac{pr}{6}\right)}{2}-\sqrt{\frac{\left(\left(\frac{rp}{2}-\frac{q^2}{8}\right)-\frac{2\left(\frac{p}{2}\right)^3}{27}-\frac{pr}{6}\right)^2}{4}-\frac{\left(r-\frac{\left(\frac{p}{2}\right)^2}{3}\right)^3}{27}}}\right)+\frac{p}{6}$$

Скорость наплавки определится одной из формул:

$$V_н=\left(\frac{\sqrt{2s_2}\pm\sqrt{2s_2-4\left(\frac{p}{2}+s_2+\frac{q}{2\sqrt{2s_2}}\right)}}{2}+\frac{A}{4}\right)^2 \quad \text{или}$$

$$V_н=\left(\frac{-\sqrt{2s_3}\pm\sqrt{2s_3-4\left(\frac{p}{2}+s_3-\frac{q}{2\sqrt{2s_3}}\right)}}{2}+\frac{A}{4}\right),$$

где $p=B-\frac{3A^2}{8}$; $q=\frac{A^3}{8}-\frac{AB}{2}$; $r=\frac{3A^4}{256}+\frac{A^2B}{16}+D$, а A, B, D – коэффициенты уравнения (11).

Выводы

1. Получены выражения для определения скорости наплавки в условиях аддитивного влияния асинхронных колебательных процессов как источника нагрева и сварочной ванны, так и длины дуги с учетом соблюдения условия сплошности формирования наплавочного валика.

2. Из расчетов следует, что условие сплошности при наплавке на неподвижную пластину колеблющимся по гармоническому закону сварочным инструментом является частным случаем условия сплошности наплавки с аддитивным влиянием поперечных колебаний сварочного инструмента, наплавляемой пластины и длины дуги.

3. Аналитическое представление в радикалах скорости наплавки выходит за пределы действительных чисел и требует применение комплексного переменного, что затрудняет применение полученных выражений в технологических расчетах и, в качестве альтернативы, обуславливает применение численных методов.

4. Условие сплошности в общем виде определяется не только частотными характеристиками и шириной шва, как в случае применения только колебания сварочного инструмента [1–2] или совместного воздействия колебаний сварочного инструмента и сварочной ванны [3], но и силой тока, газодинамическими параметрами дуги и теплофизическими свойствами свариваемого металла.

5. Влияние растекания металла сварочной ванны под воздействием инерционных сил и сил тяжести не учтено, кроме того, данный расчет производился для постоянного тока, что ограничивает применение данной формулы, т. к. в последнее время применяются виды наплавки с импульсными алгоритмами управления дугой. Данные обстоятельства обуславливают доработку данной формулы на основе дальнейших экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Условие сплошности наплавки при движении источника нагрева по синусоидальному закону [Данилов А. И., Гартманова И. С., Колосова Н. А., Миркин М. А.] // Сварочное производство – № 2. – 1980. – 26 с.
2. Лебедев В. А. Определение параметров импульсного механического воздействия на сварочную ванну для структуризации металла при автоматической дуговой

наплавке / Лебедев В. А., Драган С. В., Новиков С. В. // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – № 1. – 2016.
3. Лебедев В. А. Разработка алгоритма сложных колебаний для обеспечения сплошности дуговой наплавки / В. А. Лебедев, С. В. Новиков // Наукоемкие технологии в машиностроении – № 8. – 2016.
4. Теория сварочных процессов / [Волченко В. Н., Ямпольский В. М., Винокуров В. А. и др.] ; под ред. Фролова В. В. – М. : Высшая школа, 1988. – С. 208–210.
5. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Лесков Г. И. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.
6. Курош А. Г. Курс высшей алгебры / Курош А. Г. – М. : Наука, 1968. – С. 239–240.

Одержано 27.04.2016

Лебедєв В.О., Новиков С.В. Визначення параметрів процесу дугового наплавлення при програмно змінюваних параметрах механічних коливань

Отримано формулу для визначення швидкості наплавлення, що здійснюється в умовах впливу механічних коливань на зварювальний інструмент, зварювальну ванну і довжину дуги, виходячи з умови суцільності ширини наплавного валика.

Ключові слова: *суцільність, періодичний вплив, швидкість наплавлення, гармонійне коливання, довжина дуги.*

Lebedev V., Novikov S. Determination process arc welding with software to change the parameters of mechanical vibrations

The formula is obtained for velocity of surfacing detection that is realized in condition of mechanical oscillations influence onto the welding tool, pool and the arc length that is proceeding from condition of the welding seam width continuity.

Key words: *a continuity, periodic action, velocity of surfacing, harmonic oscillation, length of welding arc.*