

УДК 621.791.72

В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, А.Л. Пискунов, А.Н. Лялин

V.Ya. Belenkiy, D.N. Trushnikov, A.L. Piskunov, A.N. Lyalin

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
State National Research Polytechnical University of Perm

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ СО СКВОЗНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

THE DYNAMIC MODEL OF THE ELECTRON-BEAM WELDING WITH FULL PENETRATION

Рассмотрены процессы формирования канала проплавления при электронно-лучевой сварке с полным проплавлением металла. Предложена динамическая модель, описывающая формирование обратного валика сварного шва в зависимости от параметров процесса электронно-лучевой сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, канал проплавления, моделирование электронно-лучевой сварки, сквозное проплавление.

The processes of formation of a channel penetration in electron-beam welding with full penetration of the metal are analyzed. A dynamic model describing the formation of the back of the weld bead, depending, on the parameters of electron beam welding is proposed. The process of the movement of the beam collision with the metal from the surface to the bottom opening of the channel is seen as the result of several successive reflections of the beam from the front wall of the keyhole.

Keywords: electron beam welding, keyhole, weld formation, simulation of electron beam welding, full penetration.

Процесс передачи энергии электронного пучка металлу при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) сопровождается колебательными процессами, связанными с физическими явлениями в канале проплавления. Среди колебаний в канале значительный интерес представляет колебательное перемещение области соударения электронного пучка с металлом по передней стенке канала, при котором осуществляется выделение энергии в свариваемом металле и формирование сварного шва. Этот процесс носит стохастический автоколебательный характер [1].

При разработке динамической модели ЭЛС со сквозным проплавлением учет этих колебаний является особенно важным, так как в существующих моделях процесса ЭЛС тепловложение в металл рассматривается в условиях проекции электронного пучка на полную поверхность передней стенки кана-

ла проплавления [2]. Однако результаты экспериментальных исследований [3] свидетельствуют о том, что область взаимодействия пучка с металлом постоянно перемещается по высоте канала, а характерный размер этой области значительно меньше протяженности передней стенки канала. При этом механизм перемещения области соударения пучка с металлом не может быть описан в рамках существующих моделей процесса проплавления при ЭЛС, так как углубление пучка в металл, согласно этим моделям, должно сопровождаться увеличением протяженности области пересечения пучка с передней стенкой канала, а не ее движением вглубь от поверхности металла.

В предлагаемой динамической модели ЭЛС со сквозным проплавлением процесс движения области соударения пучка с металлом от поверхности до нижнего отверстия канала рассматривается как результат нескольких последовательных отражений пучка от передней стенки канала [4].

Рассмотрим тепловой баланс процесса воздействия пучка на элемент передней стенки в верхней части канала проплавления (рис. 1). В случае, если вся энергия пучка расходуется на испарение металла на данном участке стенки, тепловой баланс характеризуется таким углом наклона элемента поверхности γ , при котором вводимая пучком мощность равна мощности, требуемой для разрушения (абляции) металла:

$$\operatorname{tg} \gamma \approx \frac{q_s \eta}{\rho v_{\text{св}} L}, \quad (1)$$

где q_s – удельная мощность электронного пучка в приближении ее равномерного распределения по сечению пучка; η – коэффициент полезного действия процесса абляции металла; ρ – плотность металла; L – удельная теплота абляции.



Рис. 1. Схема воздействия электронного пучка на переднюю стенку канала проплавления

Если анализировать процесс формирования передней стенки канала в динамике, связанной с периодической экранировкой электронного пучка продуктами испарения, то в течение времени экранировки пучка тепловложение в рассматриваемый элемент поверхности передней стенки минимально и угол наклона этого элемента стенки меньше угла, определяемого из выражения (1).

С момента начала воздействия пучка на рассматриваемый элемент поверхности угол его наклона к горизонтали начинает увеличиваться, а углы падения электронов на переднюю стенку начинают уменьшаться. Этот процесс носит аperiодический характер.

В зоне воздействия электронного пучка имеет место интенсивное испарение металла и ионизация паров металла с образованием низкотемпературной плазмы. При малых углах падения электронов пучка происходит их отражение в слое пространственного заряда на границе «плазма – стенка канала». Критическое значение угла падения, при котором пучок отражается от передней стенки, определяется перепадом потенциала в слое пространственного заряда U_1 и величиной ускоряющего напряжения U [5]:

$$\theta_c = \left(\frac{U_1}{U} \right)^{1/2}.$$

Кроме того, плазма оказывает фокусирующее воздействие на электронный пучок в результате проявления эффекта ионной фокусировки, что позволяет рассматривать на каждом участке взаимодействия пучка с металлом сходящийся пучок с локальной фокусировкой на поверхности металла.

Отражение электронов пучка в этом случае будет иметь место, если угол наклона траектории электронов к оси пучка меньше значения

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta_c - \lambda.$$

Оценим теперь величину мощности электронного пучка, которая будет передаваться расположенному ниже участку передней стенки канала при отражении.

Распределение удельной мощности электронного пучка удовлетворительно описывается нормальным законом

$$q_s = q_{sm} \exp(-kr^2),$$

где q_{sm} – максимальная удельная мощность ЭП, $q_{sm} = \left(\frac{k}{\pi} \right) q$; q – полная мощность пучка; k – коэффициент сосредоточенности; r – расстояние от оси пучка

ка. Если считать, что на границе пучка плотность мощности, по сравнению с максимальным значением, уменьшается в e раз (e – основание натурального логарифма), тогда $k = r_e^{-2}$.

Проекция фокального сечения электронного пучка на переднюю стенку канала проплавления в реальном процессе ЭЛС имеет сложную пространственную конфигурацию. Поэтому, для упрощения анализа, в первом приближении будем рассматривать ее в виде круга с радиусом $r_{ep} = r_e (\cos \gamma)^{-1}$. При этом величина коэффициента сосредоточенности будет зависеть от угла наклона передней стенки канала к горизонтали:

$$k_p = (r_{ep})^{-2} = r_e^{-2} \cos^2 \gamma = k \cos^2 \gamma.$$

Соответственно и максимальная удельная мощность в случае проекции пучка на переднюю стенку канала будет зависеть от угла наклона передней стенки:

$$q_{smp} = q_{sm} \cos^2 \gamma,$$

а распределение удельной мощности будет иметь вид

$$q_s = q_{sm} \cos^2 \gamma \exp \left[- (k \cos^2 \gamma) r^2 \right]. \quad (2)$$

Обозначим через r_m радиус круга, при превышении которого углы падения электронов пучка будут меньше критического значения θ_c и будет происходить отражение электронов на низлежащие участки передней стенки канала.

Для оценки величины r_m будем считать, что угол наклона траекторий электронов к оси пучка в диапазоне от 0 до α_0 (угла сходимости пучка) изменится линейно:

$$\alpha = \frac{\alpha_0 r}{r_e}.$$

Тогда отражение электронов будет иметь место в случае

$$\frac{\alpha_0 r}{r_e} \geq \frac{\pi}{2} - \gamma - \theta_c.$$

Отсюда величина радиуса пучка в плоскости локальной фокусировки, при превышении которого имеет место отражение электронов,

$$r_m = r_e \alpha_0^{-1} \left(\frac{\pi}{2} - \gamma - \theta_c \right). \quad (3)$$

Величина мощности пучка, передаваемая металлу в круге радиусом r_{mp} , равным проекции радиуса r_m на переднюю стенку канала $r_{mp} = r_m \cos^{-1} \gamma$,

$$q_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{mp}} q_s r d\varphi dr = 2\pi \int_0^{r_{mp}} q_{sm} \cos^2 \gamma \exp\left[-(k \cos^2 \gamma) r^2\right] r dr = q \left[1 - \exp(-kr_m^2)\right].$$

Электроны в кольцевой проекции сечения пучка на передней стенке канала проплавления с радиусом $r \geq r_{mp}$ отражаются от рассматриваемого элемента передней стенки канала в слое пространственного заряда и попадают на низлежащий участок передней стенки.

Величина мощности пучка, передаваемая на низлежащий участок передней стенки при отражении,

$$q_2 = \int_0^{2\pi} \int_{r_{mp}}^{r_q} q_s r d\varphi dr = q \left[\exp(-kr_m^2) - \exp(-kr_q^2) \right], \quad (4)$$

где r_q – радиус электронного пучка, ограничивающий зону, в которой удельная мощность достаточна для интенсивного испарения металла. Этот радиус можно определить, подставляя в левую часть выражения (2) значение критической удельной мощности q_s^* , которая определяет воздействие электронного пучка на металл в режиме интенсивного взрывного испарения [2].

$$r_q = \left[(k \cos^2 \gamma)^{-1} \ln(q_{sm} \cos^2 \gamma / q_s^*) \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Таким образом, решая систему уравнений (1), (3), (4) и (5), можно оценить угол наклона рассматриваемого элемента передней стенки канала и величину мощности электронного пучка, передаваемую на низлежащий элемент передней стенки.

Выше был рассмотрен тепловой баланс верхнего элемента передней стенки канала, подвергающегося воздействию вертикального электронного пучка. На низлежащие элементы передней стенки воздействие пучка происходит после его отражения от предыдущего элемента, и при рассмотрении теплового баланса необходимо учитывать отклонение оси электронного пучка от вертикали.

Применительно к произвольному элементу передней стенки канала уравнение теплового баланса будет иметь вид

$$q_{sn} \sin(\varphi_{n-1} - \gamma_n) = \rho v_{cb} L \sin \gamma_n, \quad (6)$$

где γ_n – угол наклона n -го элемента передней стенки канала к горизонтали; q_{sn} – удельная мощность, выделяемая пучком на n -м элементе; φ_{n-1} – угол наклона оси пучка к горизонтали после его отражения от $(n-1)$ -го элемента передней стенки канала.

Длина n -го элемента передней стенки канала приближенно определяется формулой

$$l_n \approx \frac{2r_n}{\cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma_n - \varphi_{n-1}\right)}, \quad (7)$$

где r_n – радиус пучка в плоскости, совпадающей с началом n -го участка передней стенки.

Количество отражений n электронного пучка от передней стенки канала можно оценить, приравнявая толщину металла H сумме проекций длин элементов передней стенки на вертикальную ось:

$$H = \sum_{n=1}^m y_n. \quad (8)$$

Зная количество отражений пучка от передней стенки канала, можно оценить величину тока пучка, выходящего при сквозном проплавлении через нижнее отверстие в канале, т.е. проходящего тока.

При численной оценке геометрии передней стенки канала по уравнениям (6), (7) и (8) рассчитывались длины элементов передней стенки канала и их количество, исходя из заданной толщины проплавляемого металла. Расчет осуществлялся при следующих значениях параметров режима и теплофизических параметров: $q_0 = 1500 \dots 1800$ Вт; $v_{св} = 5$ мм/с; $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; $L = 6,5 \cdot 10^6$ Дж/кг.

На рис. 2 приведены результаты численного моделирования профиля передней стенки канала при ЭЛС со сквозным проплавлением.

Оценим динамические характеристики процесса взаимодействия электронного пучка с передней стенкой канала проплавления. Для этого проанализируем поворот элемента передней стенки канала при скачкообразном изменении удельной мощности электронного пучка, считая в первом приближении, что распределение удельной мощности в сечении пучка равномерно, а рассматриваемый элемент в процессе поворота сохраняет форму отрезка прямой линии.

В установившемся режиме элемент передней стенки канала, находящийся под воздействием энергии электронного пучка, наклонен к горизонтальной оси под углом γ , определяемом уравнением теплового баланса (1).

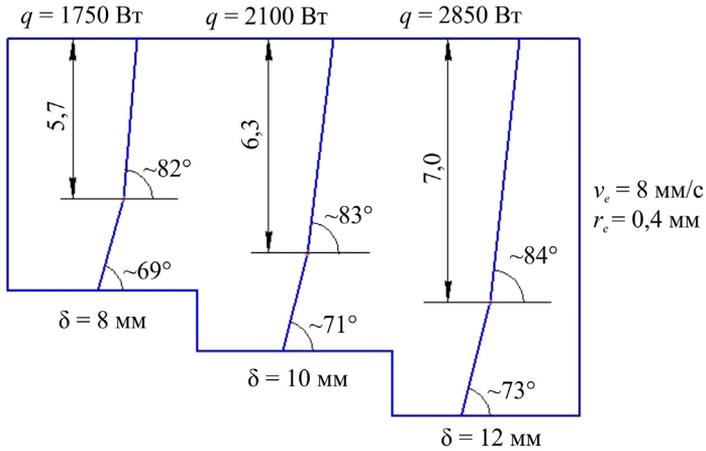


Рис. 2. Результаты численного моделирования профиля передней стенки канала при сквозном проплавлении металла

Изменение удельной мощности на величину Δq_{s0} приводит к нарушению теплового баланса процесса взаимодействия электронного пучка с металлом и возникновению избыточной мощности:

$$\Delta q_s \approx \Delta q_{s0} - \frac{q}{\gamma} \Delta\gamma \approx \Delta q_{s0} - \frac{\rho L v_{cb}}{\cos^2 \gamma_0} \Delta\varphi. \quad (9)$$

Эта избыточная мощность обуславливает поворот элемента передней стенки канала с текущим приращением угла поворота:

$$\Delta\gamma = \gamma - \gamma_0,$$

где γ – текущее значение угла наклона элемента передней стенки; γ_0 – начальный угол наклона.

Введем угловую скорость поворота элемента передней стенки:

$$\omega = \frac{d}{dt} \Delta\gamma \approx \frac{v_n \cos \gamma_0}{r_e},$$

где v_n – нормальная скорость движения фронта испарения металла на передней стенке канала.

Тогда уравнение теплового баланса для приращений будет иметь вид

$$\Delta q_s \cos^2 \gamma_0 = \rho L r_e \omega.$$

Подставляя в это уравнение выражение для избыточной мощности (9), получаем уравнение переходного процесса поворота элемента передней стенки канала при скачкообразном изменении удельной мощности электронного пучка:

$$\Delta q_{s0} = \frac{\rho L}{\cos^2 \gamma_0} \left(v_{\text{св}} \Delta \gamma + r_e \frac{d}{dt} \Delta \gamma \right).$$

Полученное дифференциальное уравнение описывает аperiodическое звено первого порядка с постоянной времени:

$$T = \frac{r_e}{v_{\text{св}}}.$$

Таким образом, в первом приближении постоянная времени процесса поворота элемента передней стенки канала проплавления при изменении мощности электронного пучка пропорциональна радиусу пучка, определяемому фокусировкой пучка, и обратно пропорциональна скорости сварки.

Представленный анализ геометрии передней стенки канала был проведен без учета гидродинамических процессов, связанных с расплавлением металла на передней стенке канала. В то же время формирование корня сварного шва при ЭЛС со сквозным проплавлением обусловлено периодическим перемещением расплавленного металла, движущегося по передней стенке канала проплавления, в корневую часть канала. При ЭЛС с частичным проплавлением движение жидкого металла на передней стенке канала было изучено в работах [6], где отмечено существование объемных волн расплава и качественно изучена связь этих гидродинамических процессов с образованием специфических дефектов при ЭЛС с частичным проплавлением (пикообразования, пустот и несплавлений в корне сварного шва).

Формирование обратного валика сварного шва при ЭЛС со сквозным проплавлением определяется соотношением диаметра выходного отверстия канала со стороны корня шва и амплитуды объемных волн расплавленного металла на передней стенке канала. При оптимальном соотношении этих величин объемные волны расплава, формируемые на передней стенке канала, выходят через нижнее отверстие канала и, удерживаясь силами поверхностного натяжения, кристаллизуются, образуя обратный валик сварного шва (рис. 3).

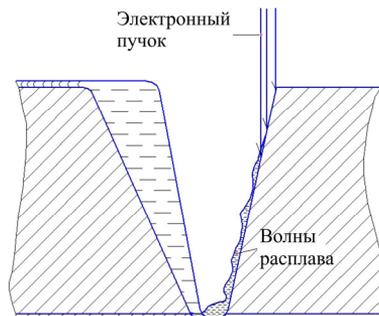


Рис. 3. Схема формирования объемных волн расплава на передней стенке канала при сквозном проплавлении

При анализе процесса формирования обратного валика сварного шва при ЭЛС со сквозным проплавлением представляют интерес количественные оценки параметров объемных волн расплава при полном проплавлении металла, так как оптимальное соотношение амплитуды этих волн и диаметра отверстия в металле в нижней части канала проплавления позволяет сформировать качественный обратный валик сварного шва.

Ниже приведены результаты аналитической оценки параметров объемных волн расплавленного металла на передней стенке канала проплавления при сквозном проплавлении металла.

В процессе движения пленки жидкого металла на передней стенке канала проплавления при превышении ее толщины некоторого критического значения развивается неустойчивость ламинарного течения расплава и на стекающей пленке формируются одиночные объемные волны – диссипативные солитоны [7].

Для приближенной оценки параметров этих волн используем нелинейное стационарное решение уравнения Кортевега – де Вриза в виде семейства одномерных солитонов. Такое допущение оправдывается тем, что большинство нестационарных возмущений в слое жидкости в процессе распространения асимптотически стремится к одномерным стационарным солитонам уравнения Кортевега – де Вриза [7].

Простота анализа обусловлена тем, что семейство решений в виде солитонов является однопараметрическим, т.е. ширина, амплитуда солитона и скорость его движения однозначно связаны. Профиль солитона описывается уравнением

$$A = A_m \operatorname{ch}^{-2} \left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{3A_m}{a_0^3}} \right), \quad (10)$$

где A_m – амплитуда солитона; x – бегущая координата; a_0 – критическая толщина пленки жидкого металла, предшествующая развитию возмущения в слое расплава и формированию объемной волны.

Амплитуда и скорость движения солитона, описываемого уравнением (10), для горизонтального расположения твердой поверхности, на которой формируются одиночные волны в слое жидкости, связаны соотношением [8]:

$$v(ga_0)^{\frac{1}{2}} = 1 + \frac{A_m}{2a_0},$$

где v – скорость движения солитона; g – ускорение свободного падения.

Применительно к анализу процесса формирования объемных волн расплава на передней стенке канала при ЭЛС со сквозным проплавлением необ-

ходимо учесть наклон передней стенки канала, аппроксимируемой в данном случае отрезком прямой, наклоненным к горизонтальной оси под углом γ_{cp} .

Этот угол определяется условиями теплового баланса на передней стенке канала проплавления:

$$\gamma_{\text{cp}} = \arctg \frac{q_s \eta}{\rho v_{\text{св}} L}, \quad (11)$$

где q_s – удельная мощность электронного пучка; η – КПД процесса тепловыделения на передней стенке канала; ρ – плотность металла; $v_{\text{св}}$ – скорость сварки; L – удельная теплота абляции металла при его разрушении электронным пучком.

В этом случае выражение для амплитуды объемной волны будет иметь вид

$$A_m = 2v \sqrt{\frac{a_0}{g \cos \gamma_{\text{cp}}}} - a_0. \quad (12)$$

Для оценки критической толщины пленки расплава на передней стенке канала рассмотрим условие нарушения ламинарного режима течения жидкого металла. Для течения жидкости в открытых каналах значение числа Рейнольдса, при котором ламинарный режим переходит в турбулентный, составляет $Re_c = 5,8 \cdot 10^2$ [7]. Отсюда можно определить критическую толщину пленки:

$$a_0 = \frac{Re_c \nu}{v_0},$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости; v_0 – невозмущенная скорость течения пленки, которую можно приближенно оценить по формуле [8]

$$v_0 = \frac{a_0^2 g \sin \gamma_{\text{cp}}}{\nu}.$$

Тогда критическая толщина пленки расплава на передней стенке канала:

$$a_0 = \left(\frac{Re_c \nu^2}{g \sin \gamma_{\text{cp}}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (13)$$

При практически наблюдаемых углах наклона передней стенки канала $\gamma_{\text{cp}} = 70...85^\circ$ [1] расчет критической толщины жидкой пленки по формуле (13) дает значение $a_0 \approx 0,3$ мм, что близко к экспериментально определяемым [1].

Чтобы оценить амплитуду объемных волн расплава в условиях ЭЛС со сквозным проплавлением, необходимо определить скорость движения солитона по передней стенке канала проплавления. Эту скорость приближенно определим как отношение расстояния, проходимого волной от момента ее образования до выхода ее через нижнее отверстие канала, к периоду образования волн. Период волнообразования определяется по выражению

$$\tau = \frac{a_0}{v_{св}}.$$

Протяженность пути движения солитона по передней стенке канала проплавления примем равной толщине проплавления металла δ . Тогда скорость движения солитона:

$$v \approx \frac{v_{св} \delta}{a_0}. \quad (14)$$

С учетом формул (11)–(14) и тригонометрических преобразований, амплитуда объемной волны определяется выражением

$$A_m = \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \gamma_{ср})^{\frac{1}{6}}}{g^{\frac{1}{3}}} \left[v_{св} \delta \left(\frac{\operatorname{tg} \gamma_{ср}}{\operatorname{Re}_c v^2} \right)^{\frac{1}{6}} - 2 \left(\frac{\operatorname{tg} \gamma_{ср}}{\operatorname{Re}_c v^2} \right)^{-\frac{1}{3}} \right]. \quad (15)$$

Проведенный анализ позволил сделать вывод, что условием качественного формирования обратного валика шва является равенство диаметра сквозного отверстия в корневой части канала амплитуде объемных волн расплава на передней стенке. При этом достигшая корневой части канала объемная волна за счет действия сил поверхностного натяжения образует каплю, соприкасающуюся с твердым металлом по периметру отверстия в корневой части канала. Такие последовательно образующиеся в корневой части канала капли металла и формируют качественный обратный валик шва при ЭЛС со сквозным проплавлением. Если отверстие в корне канала меньше амплитуды объемной волны, то происходит формирование «ниточного» проплава. А если отверстие в корне канала больше амплитуды объемной волны, происходит вытекание металла и провисание корня шва. В обоих последних случаях формирование корня шва – неудовлетворительное.

Поскольку выражение для амплитуды объемной волны было получено ранее, необходимо оценить диаметр корневой части канала на срезе нижней поверхности свариваемого металла. Для этого воспользуемся полученными расчетными формулами для оценки геометрии передней стенки канала. Точное описание полной конфигурации канала проплавления в металле затруднительно, так как в формировании профиля задней стенки участвуют гидродинамические и капиллярные силы. Однако, как показывает скоростная рент-

генокиносъемка канала [9], форма канала достаточно осесимметрична, что позволяет для приближенных оценок диаметра канала в плоскости, совпадающей с нижней поверхностью свариваемого металла, рассматривать поверхность канала в виде параболоида вращения с образующей, совпадающей с профилем передней стенки канала. При этом диаметр нижнего отверстия в канале равен диаметру окружности, образуемой при пересечении параболоида и плоскости, совпадающей с нижней поверхностью свариваемого металла.

На рис. 4 приведена расчетная схема для приближенной оценки диаметра нижнего отверстия в канале проплавления.

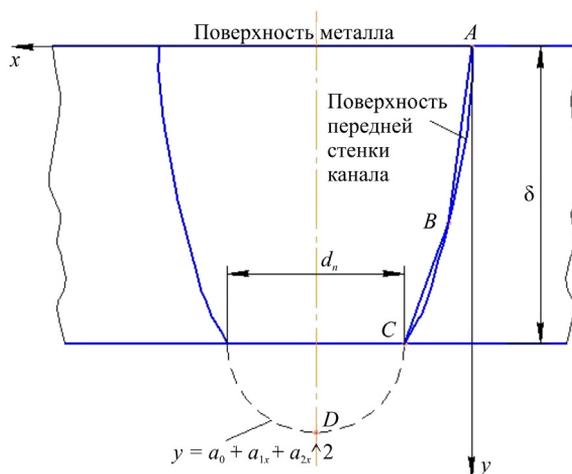


Рис. 4. Расчетная схема для определения диаметра нижнего отверстия в канале проплавления

Оценка производилась следующим образом. По методике, описанной выше, определялись длины и углы наклона отрезков ломаной линии, описывающей конфигурацию передней стенки канала. По координатам точек концов отрезков ломаной линии производилась аппроксимация образующей передней стенки канала кривой второго порядка с уравнением $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ методом наименьших квадратов. Далее определялись абсциссы точек пересечения этой кривой с плоскостью $y = \delta$ (δ – толщина проплавленного металла), т.е. с нижней поверхностью металла, по уравнению

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 = \delta. \quad (16)$$

Диаметр нижнего отверстия в канале d_n , согласно схеме, определяется разностью значений абсцисс этих точек, т.е. разностью корней уравнения (16):

$$d_n = x_1 - x_2 = a_2^{-1} (a_1^2 - 4a_2 [a_0 - \delta])^{1/2}.$$

При этом условием качественного формирования обратного валика сварного шва является равенство $d_n = A_m$, где амплитуда объемной волны расплава на передней стенке канала проплавления A_m определяется из выражения (15).

Сделаем следующие выводы:

1. Предложена динамическая модель процессов в канале проплавления при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением.
2. Получены выражения для оценки условий качественного формирования обратного валика сварного шва при сварке со сквозным проплавлением.

Статья подготовлена по результатам выполнения работ по гранту РФФИ-Урал (заявка № 11-08-96016, номер государственной регистрации НИР – 01201168147).

Список литературы

1. Углов А.А., Селищев С.В. Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии. – М.: Наука, 1987. – 149 с.
2. Лесков Г.И., Трунов Е.Н., Живага Л.И. Форма, размеры и устойчивость пародинамических каналов в металле при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1975. – № 6. – С. 13–16.
3. Миткевич Е.А., Локшин В.Е. Динамика формирования канала в условиях электронно-лучевой сварки // Автоматическая сварка. – 1980. – № 9. – С. 26–27.
4. Беленький В.Я. О формировании передней стенки канала проплавления в металле при электронно-лучевой сварке // Физика и химия обработки материалов. – 1987. – № 1. – С. 116–118.
5. Новиков А.А. Электронно-оптическая модель канала проплавления при электронно-лучевой сварке и обработке // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – № 1. – С. 43–48.
6. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Акопьянц К.С. Периодичность переноса металла при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1973. – № 8. – С. 75–76.
7. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. – М.: Наука, 2001. – 560 с.
8. Алешков Ю.З. Теория волн на поверхности тяжелой жидкости. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 196 с.
9. Weber C.M., Funk E.R., McMaster R.C. Penetration mechanisms of partial penetration electron beam welding // Welding Journal. – 1972. – № 2. – P. 90–94.

Получено 1.09.2011