



УДК 621.791.72.01

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА СТАЛЕЙ ТОЛЩИНОЙ ДО 60 мм С ПРОДОЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ЛУЧА

К. С. АКОПЬЯНЦ, В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, кандидаты техн. наук, чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО**,
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Оценена частота собственных колебаний жидкого металла сварочной ванны (десятки – сотни герц). Экспериментально достигнуто импульсное воздействие на ванну, обеспечивающее колебание луча от хвостовой части ванны к передней. Получены узкие сквозные швы с глубиной проплавления до 60 мм, шириной около 1 мм и коэффициентом формы шва 40.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, импульсное воздействие, развертка с пилообразными колебаниями, узкие швы

Отличительной особенностью электронно-лучевой сварки (ЭЛС) является получение узких швов «кинжальной» формы (глубина проплавления более чем в 10 раз превышает ширину шва). Чтобы еще больше увеличить проплавляющую способность луча, применяют различные технические приемы, в том числе основанные на импульсном динамическом воздействии на сварочную ванну. Производят импульсную модуляцию тока луча, подбирают частоту и форму развертки луча в сварочной ванне [1–3]. В работе [3] сообщается, что за счет импульсной модуляции тока на частоте 100 Гц и продольных колебаний луча получают швы более узкие и глубокие, чем обычно (хотя сварку производили в нижнем положении, по форме швы напоминают выполненные горизонтальным лучом). Однако в этой публикации не указывается, какую продольную развертку луча применяли, и не обсуждается, почему швы получаются более узкими.

Целью данной работы было исследование влияния импульсного воздействия на сварочную ванну при ЭЛС стали с продольными пилообразными колебаниями электронного луча. Приведем некоторые оценки, чтобы определить, с какой частотой следует воздействовать на сварочную ванну. Очевидно, наибольший эффект будет достигнут, если частота импульсного воздействия луча соответствует собственной частоте колебаний расплавленного металла в ванне. Для проведения оценок рассмотрим представленный на рис. 1 типичный вид «кинжального» проплавления при однопроходной ЭЛС стационарным электронным пучком без какого-либо импульсного воздействия на ванну. В проплавлении можно выделить две области: верхнюю расширенную часть ванны и нижнюю протяженную, в которой, как известно, в процессе сварки формируется парогазовый канал.

Сначала оценим частоту колебаний верхней части ванны без учета наличия в нижней части парогазового канала. Для упрощения считаем, что

верхняя часть сварочной ванны имеет цилиндрическую форму: глубина H , радиус $R = B/2$ (B – ширина ванны). В работе [4] показано, что первая (основная) частота колебаний жидкости в цилиндрическом сосуде (под действием силы поверхностного натяжения) определяется выражением

$$\omega^2 = \frac{\sigma}{\rho R^3} k^3 \text{th}(kh),$$

где ω – циклическая частота, равная $2\pi f$; f – частота колебаний ванны; σ – поверхностное натяжение; ρ – плотность; k – собственное число краевой задачи о колебаниях поверхности ($k = 1,841$); h – безразмерная глубина ванны ($h = H/R$). При ЭЛС обычно глубина намного пре-

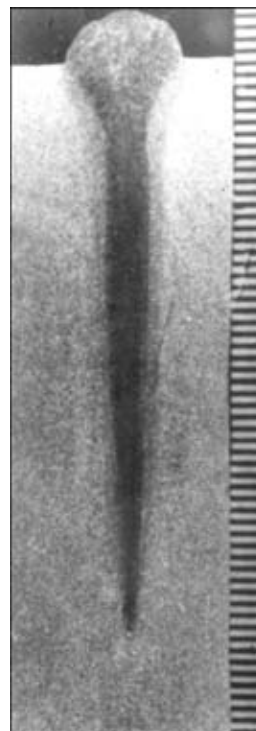


Рис. 1. Поперечный макрошлиф типичного проплавления стали 10X18N9T при однопроходной ЭЛС стационарным электронным пучком (без импульсного воздействия на ванну); $U_{\text{век}} = 60$ кВ, $I_{\text{в}} = 170$ мА, $v_{\text{св}} = 10$ м/ч; $h/B_{\text{ср}} = 16$

© К. С. Акопьянц, В. М. Нестеренков, О. К. Назаренко, 2002

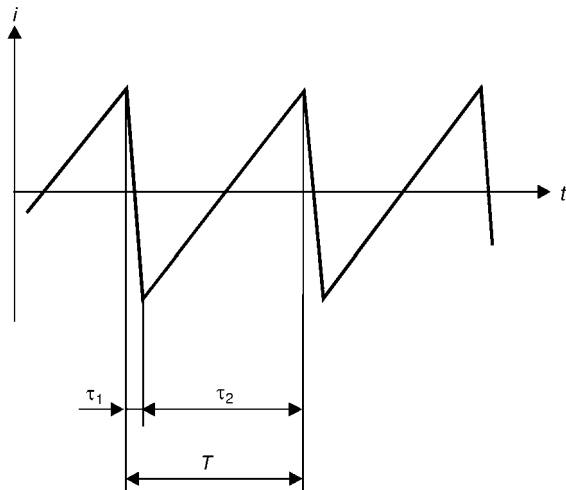


Рис. 2. пилообразная форма тока $i(t)$ в отклоняющей катушке; T — период развертки; τ_1 — время перебрасывания пучка в хвостовую часть ванны; τ_2 — время движения пучка в направлении от хвостовой части ванны в переднюю часть; t — текущее время

вышает ширину, т. е. $h \gg 1$; соответственно гиперболический тангенс $\text{th}(kh) \approx 1$.

В результате получаем выражение для частоты колебаний верхней части сварочной ванны f_1 в зависимости от ее ширины B :

$$f_1 \approx 1,1 \left(\frac{\sigma}{\rho B^3} \right)^{0,5}$$

Например, для стали ($\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 1,5 \text{ Н/м}$) при ширине ванны $B = 5 \dots 10 \text{ мм}$ получаем частоту колебаний ванны $f_1 = 44 \dots 16 \text{ Гц}$.

Колебания верхней части сварочной ванны проявляются в образовании «чешуек» на поверхности шва. Проведенная оценка частоты находится в хорошем соответствии с измеренными значениями [1].

Теперь учтем, что в сварочной ванне по всей ее глубине формируется парогазовый канал. Как

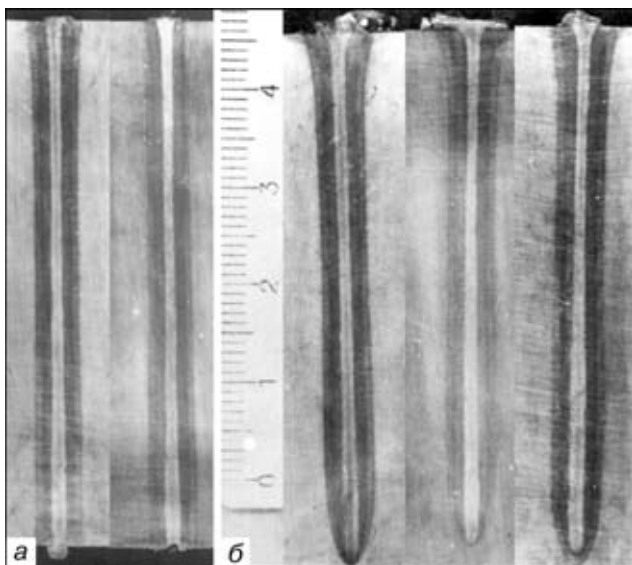


Рис. 3. Сквозное проплавление стали 12Х2Н4МД (а) ($\delta = 57 \text{ мм}$; $U_{\text{уск}} = 60 \text{ кВ}$, $I_{\text{в}} = 235 \text{ А}$, $v_{\text{св}} = 18 \text{ м/ч}$; продольные колебания пучка специальной формы; $f = 130 \text{ Гц}$, размер развертки 3 мм , $h/B_{\text{ср}} \approx 42$); несквозное проплавление (б) ($I_{\text{в}} = 215 \text{ А}$, $h/B_{\text{ср}} = 38$, остальные параметры, как на рис. 3, а)

было показано в статье [5], колебания поверхности канала относительно равновесного положения происходят на частоте

$$f_2 \approx 2,3 \left(\frac{\sigma}{\rho d_{\text{к}}^3} \right)^{0,5}$$

где $d_{\text{к}}$ — диаметр канала. Например, при $d_{\text{к}} = 1,5 \dots 2,5 \text{ мм}$ частота колебаний поверхности канала составляет $f_2 = 550 \dots 250 \text{ Гц}$.

Произведенные оценки позволяют установить, что диапазон частот колебаний жидкого металла в сварочной ванне при ЭЛС находится в пределах от десятков до сотен герц. Этому же диапазону должно соответствовать импульсное воздействие пучка на ванну.

Эксперименты производили с использованием для ЭЛС аппаратуры типа ЭЛА-60/60 (ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}} = 60 \text{ кВ}$, ток пучка $I_{\text{в}} = 1 \text{ А}$) в вакуумной камере УЛ-209 ($2,5 \times 2,5 \times 3,8 \text{ м}$, рабочий вакуум не хуже $5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$) с перемещаемой внутри камеры пушкой (оснащена дифференциальной откачкой, обеспечивающей вакуум в пушке не хуже $1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$). Была выбрана высокопрочная среднелегированная сталь толщиной $\delta = 57 \text{ мм}$. Сварку осуществляли при $v_{\text{св}} = 5 \text{ мм/с}$ (18 м/ч), токе пучка — до 250 А .

Импульсное динамическое воздействие на сварочную ванну производили посредством развертки луча.

С учетом данных работы [3] и выполненных оценок частот собственных колебаний металла в ванне (десятки — сотни герц) частоту развертки луча выбрали равной 130 Гц , что соответствует примерно середине частотного диапазона собственных колебаний; при этом также обеспечивалось отсутствие биений с частотой электросети.

Развертка луча имела форму продольных колебаний вдоль направления сварки. Питание отклоняющей катушки осуществлялось от специального генератора током пилообразной формы (рис. 2). При развертке с продольными колебаниями получаются узкие швы [1] в отличие, например, от сварки с поперечными колебаниями или с круговой разверткой.

Размер развертки (двойная амплитуда) составлял 3 мм , что примерно в 2 раза превышает диаметр парогазового канала, существующего при сварке статическим лучом. Влияние развертки пучка в этом случае должно быть заметным.

Существенной особенностью сварки был выбор направления движения луча при развертке: по направлению сварки или против.

В случае, когда пучок импульсно перебрасывается в направлении хвостовой части сварочной ванны, а потом в течение почти всего периода развертки движется в переднюю часть, швы получаются наиболее узкими и глубокими. Схема движения пучка в этом случае представлена на рис. 2, а образующиеся проплавления — на рис. 3.

Наряду с получением узких сквозных швов (ширина расплавленной зоны примерно 1 мм (рис. 3, а) следует также отметить образование закругления



в корне на несквозных швах (рис. 3, б), что способствует предотвращению корневых дефектов.

Форму выполненных швов численно можно оценить следующим образом. Делим изображение проплавления (например на рис. 3, а) на десять участков по глубине и производим замеры ширины шва на разной глубине: $B_1(0,1h)$, $B_2(0,2h)$, ..., $B_9(0,9h)$.

Определяем среднее значение ширины шва

$$B_{cp} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 B_i$$

среднеквадратичное отклонение ширины шва

$$\Delta B_{cp} = \frac{1}{9} \sqrt{\sum_{i=1}^9 (B_i - B_{cp})^2}$$

разность между значениями B_{max} и B_{min}

$$\Delta B_{max} = B_{max} - B_{min}$$

коэффициент формы шва $k = h/B_{cp}$.

Для сквозного проплавления (рис. 3, а, слева) получаем среднюю ширину шва (проплавления) $B_{cp} = 1,35$ мм, среднеквадратичное отклонение ширины шва $\Delta B_{cp} = 0,16$ мм, разность между максимальным и минимальным значениями ширины $\Delta B_{max} = 0,4$ мм, коэффициент формы шва $k = 42$. Для несквозного проплавления (рис. 3, б, слева) $B_{cp} = 1,42$ мм, $\Delta B_{cp} = 0,13$ мм, $\Delta B_{max} = 0,35$ мм, $h = 54$ мм, $k = 38$.

В качестве сравнения приведем значения этих же показателей для проплавления, представлен-

ного на рис. 1: $B_{cp} = 3,1$ мм, $\Delta B_{cp} = 0,8$ мм, $\Delta B_{max} = 2,2$ мм, $h_{cp} = 49$ мм, $k = 16$.

Как видно из оценок, проплавления, представленные на рис. 3, по сравнению с таковыми, полученными при ЭЛС статическим лучом (см. рис. 1), получаются более узкими, равномерными по глубине и со сравнительно большим коэффициентом формы. Получение таких узких швов объясняется импульсным динамическим воздействием на жидкий металл в хвостовой части сварочной ванны, в результате чего он вытесняется. Тем самым открывается доступ электронному лучу ко дну сварочной ванны и происходит ее проплавление на большую глубину. В результате увеличивается глубина парогазового канала, по которому проходит луч. Соответственно возрастает глубина сварочной ванны и уменьшается ее ширина, но объем металла ванны остается тот же.

Таким образом, благодаря применению описанного технологического приема можно получать более узкие и глубокие швы.

1. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
2. *Ohmine M., Hiramoto S., Jamane J.* Fundamental study on the pulsed electron beam welding. — S. 1., [1983]. — 13 p. (Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-348-83).
3. *Schulze K.-R., Fritz D., Reindl G.* Je dicker, je lieber — Elektronenstrahlschweißen im Vacuum // *Praktiker.* — 1996. — № 6. — S. 250-254.
4. *Гидромеханика невесомости.* — М.: Наука, 1976. — 504 с.
5. *Акопянц К. С., Емченко-Рыбко А. В.* Контроль глубины проплавления и фокусировки электронного пучка по частоте пульсаций ионного тока при сварке // *Автомат. сварка.* — 1981. — № 9. — С. 28-32.

Frequency of natural oscillations of molten metal of the weld pool (10...100 Hz) has been estimated. The pulsed effect on the pool, ensuring oscillation of the beam from the tailing part of the pool to its leading part, has been achieved. Narrow through-penetration welds have been made with a penetration depth of up to 60 mm, width of about 1 mm and weld shape factor of 40.

Поступила в редакцию 04.11.2001