



ВЛИЯНИЕ РАБОЧЕГО РАССТОЯНИЯ СВАРОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ НА ГЕОМЕТРИЮ СВАРНОГО ШВА

Чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО, В. И. ЗАГОРНИКОВ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Экспериментально исследована геометрия электронно-лучевых проплавлений в широком диапазоне рабочих расстояний пушка–изделие. Установлена слабая корреляция между расстоянием пушка–изделие и глубиной проплавления на металлах большой толщины. Возможность существенного увеличения рабочего расстояния без заметного изменения параметров проплавления объясняется соответствующим уменьшением угла сходимости пучка в области изделия.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, сварочная пушка, рабочее расстояние, глубина шва, фокусное пятно, угол сходимости пучка

До настоящего времени отсутствует международный стандарт на пространственные характеристики сварочного электронного пучка, несмотря на большой интерес к вопросу взаимосвязи параметров пучка и геометрии швов [1, 2]. В требованиях к сварочной электронной пушке достаточно часто оговариваются размеры фокусного пятна, т. е. минимального сечения пучка в плоскости свариваемого изделия. Считается, что небольшое пятно является основным условием формирования глубоких швов с минимальными поперечными размерами литой зоны, одновременно улучшается качество изображения зоны сварки во вторичных электронах. Поскольку размеры фокусного пятна прямо пропорциональны рабочему расстоянию сварочной пушки, многие операторы стремятся расположить ее как можно ближе к изделию, несмотря на увеличение при этом вероятности электрических пробоев в ускоряющем промежутке пушки из-за попадания паров металла и газов из сварочной ванны.

При электронно-лучевой сварке металлов малых толщин (до нескольких миллиметров), когда осуществляется поверхностный подвод тепловой энергии и кратер в сварочной ванне практически отсутствует, размеры минимального сечения пучка на поверхности изделия действительно определяют размеры литой зоны при прочих одинаковых условиях. Однако когда шов формируется в металле толщиной в десятки и даже сотни миллиметров, размеры фокусного пятна сами по себе уже не определяют размеры литой зоны и значительно более существенную роль играют пространственные характеристики так называемой фокусной глубины пучка или, другими словами, его перешейка, по всей длине которого усредненная

удельная плотность энергии в пучке практически постоянная. Чем протяженнее перешеек, тем легче сформировать шов максимальной глубины с практически параллельными боковыми стенками. Поэтому справедливо утверждать, что угол наклона боковых стенок литой зоны во многом определяется общей конфигурацией пучка в области перешейка.

Экспериментальное исследование геометрии электронно-лучевых проплавлений в широком диапазоне рабочих расстояний сварочной пушки, результаты которого обсуждаются ниже, выполнено в качестве этапа подготовки нормативных материалов по оборудованию и технологии электронно-лучевой сварки.

Методика экспериментов и полученные результаты. Для проведения экспериментов использовали энергоблок ЭЛА-60 с ускоряющим напряжением 60 кВ. Схема электронно-оптической системы приведена на рис. 1. Пушка снабжена таблеточным LaB_6 -катодом радиусом $r_{\text{кат}} = 1,5$ мм, рабочая температура $T_{\text{кат}} = 2000$ К. Середина немагнитного зазора фокусирующей электромагнитной линзы находится на расстоянии $a = 120$ мм от кроссовера пучка — минимального сечения пучка на выходе из эмиссионной системы. Внутренний диаметр линзы $D = 40$ мм, ширина немагнитного зазора $S = 18$ мм.

Поскольку поперечные размеры пучка существенно зависят от коэффициента сферической аберрации линзы, оценим его с помощью следующих соотношений, где увеличение линзы $M = b/a$ [3]:

$$\frac{C_{\text{сф}}}{S} = \left[\frac{a}{S} \right]^3 \left[1 + \frac{1}{M} \right] p(x) \left[\frac{1 + 1/M}{a/S} q(x) + 1 \right], \quad (1)$$

$$x = D/S, \quad (2)$$

$$q(x) = 0,26x - 0,25, \quad (3)$$

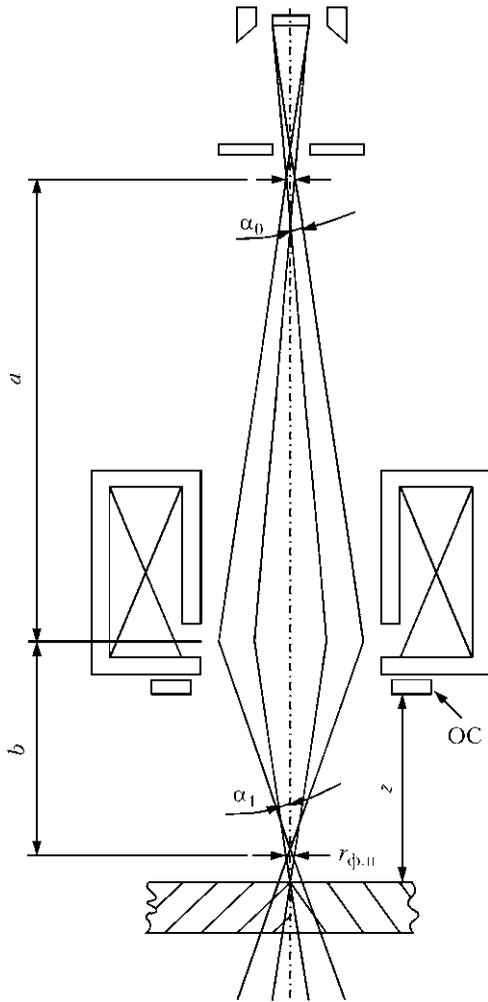


Рис. 1. Схема электронно-оптической системы пушки ЭЛА-60: a, b — расстояния от середины немагнитного зазора линзы до кроссовера и плоскости фокусировки соответственно; α_0, α_1 — половинные углы расходимости пучка после кроссовера и сходимости пучка выше перешейка соответственно; ОС — отклоняющая система; z — рабочее расстояние

$$p(x) = \frac{2,46}{x + 0,47} - 0,28. \quad (4)$$

Для $b = 100 \dots 600$ мм расчетные значения коэффициента сферической aberrации применяемой фокусирующей линзы $C_{сф}$ приведены на рис. 2.

При выполнении экспериментов использовали пластины низкоуглеродистой стали 09Г2С толщиной 65 мм и нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 8 мм. Плоскость фокусировки пучка располагалась ниже поверхности пластин на глубине соответственно около 32 и 4 мм, причем проплавления выполняли несквозными, а сами пластины устанавливали под углом около 10° к горизонту с целью возможно более точного нахождения максимальной глубины. Место расположения максимальной глубины проплавления определяли по расположению минимальной ширины литой зоны на поверхности пластин, где проводили вырезку участков для изготовления макрошлифов. Толстые пластины располагали на следу-

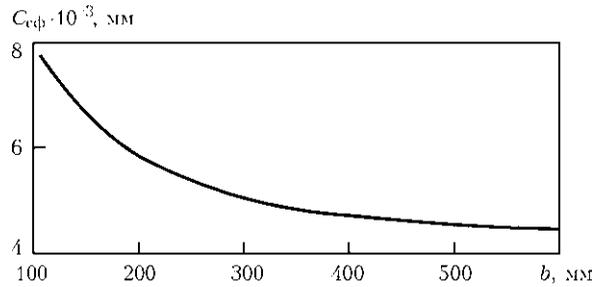


Рис. 2. Расчетная зависимость коэффициента сферической aberrации магнитной линзы пушки ЭЛА-60 от расстояния немагнитный зазор – плоскость фокусировки

ющих расстояниях от торца пушки: 20, 100, 220 и 470 мм, тонкие — на расстояниях 45, 125, 245 и 495 мм. В каждом случае рабочим расстоянием соответствуют значения $b = 120$ мм (увеличение линзы $M = 1$), 220 мм ($M = 1,7$), 320 мм ($M = 2,7$) и 570 мм ($M = 4,75$). Неизменными устанавливались скорость сварки 5 мм/с и мощность пучка 24 кВт для металла толщиной 65 мм, скорость сварки 25 мм/с и мощность пучка 4,8 кВт для металла толщиной 8 мм, $U_{уск}$ в обоих случаях составляло 60 кВ.

На рис. 3 приведены полученные результаты для различных расстояний до изделия.

Обсуждение результатов. Полученные экспериментальные данные однозначно указывают на слабую корреляцию глубины проплавления и расстояния до изделия. При мощности пучка 4,8 кВт наблюдается только сравнительно небольшое уменьшение глубины проплавления по мере увеличения расстояния от пушки до изделия с 45 до 495 мм.

В случае применения пучка мощностью 24 кВт в диапазоне расстояний до изделия 200...600 мм глубина проплавления практически постоянная. При минимальном расстоянии до изделия 20 мм, когда диаметр фокусного пятна минимален, глубина проплавления оказалась на 25 % меньше, чем при больших рабочих расстояниях.

Для объяснения полученных экспериментальных результатов выполним оценочные расчеты пространственных характеристик пучка в зависимости от его длины. При расчетах исходим из того, что поперечные размеры пучка определяются тепловыми скоростями электронов, сферической aberrацией и увеличением фокусирующей линзы. Благодаря высокой стабильности и малым пульсациям параметров питающих устройств, пренебрегаем влиянием хроматической aberrации магнитной линзы на поперечные размеры пучка. Можно также пренебречь влиянием объемного заряда пучка, поскольку уже вблизи анодного отверстия он скомпенсирован положительно заряженными ионами [4].

Принимая за радиус пучка расстояние от оси пучка до линии окружности, где плотность тока уменьшается в $e = 2,718$ раз по отношению к



плотности тока на оси пучка, согласно Ленгмюру получаем

$$r_{кр} = r_{кат} \left\{ \frac{T}{11600 U_{уск}} \right\}^{0,5} \frac{1}{\alpha_0} \quad (5)$$

Если кроссовер пучка проектируется на плоскость свариваемого изделия магнитной линзой, свободной от сферической aberrации, то радиус пучка на изделии равен

$$r_1 = M r_{кр} = r_{кат} \left\{ \frac{T}{11600 U_{уск}} \right\}^{0,5} \frac{1}{\alpha_1} \quad (6)$$

Если электроны не имеют тепловых скоростей, но линза характеризуется сферической aberrацией, радиус пучка на изделии равен

$$r_2 = (M + 1)^4 C_{сф} \alpha_1^3 \quad (7)$$

В реальном случае радиус фокального пятна можно представить следующим образом:

$$r_{ф.п} = (r_1^2 + r_2^2)^{0,5} \quad (8)$$

Отсюда получено [5]

$$\alpha_1 = 0,87 \frac{1}{M + 1} \frac{r_{кат}^{0,25} (T/11600)^{0,125}}{C_{сф}^{0,25} U_{уск}^{0,125}} \quad (9)$$

$$r_{ф.п} = 1,33(M + 1) \frac{r_{кат}^{0,75} C_{сф}^{0,25} (T/11600)^{0,375}}{U_{уск}^{0,375}} \quad (10)$$

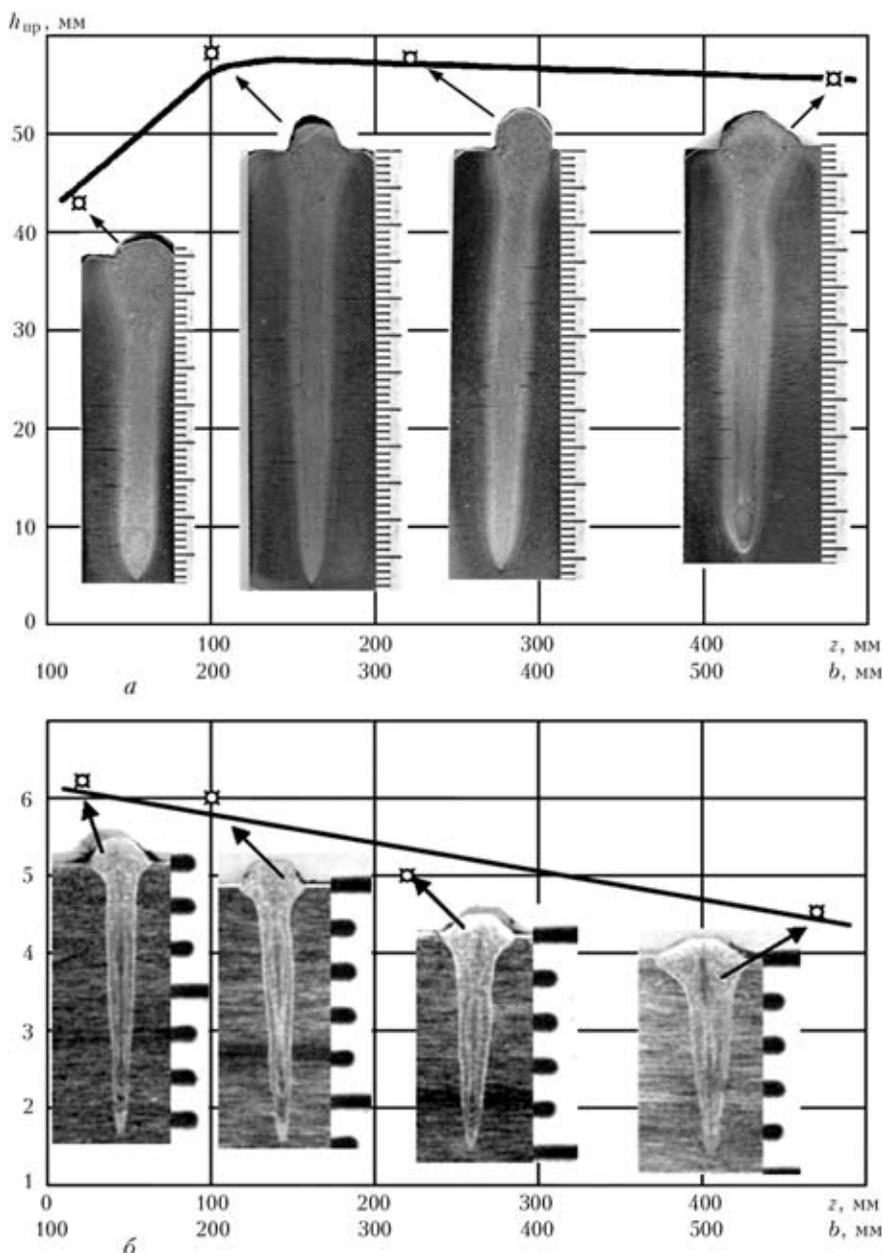


Рис. 3. Изменение глубины проплавления и макрошлифы поперечных сечений при различных расстояниях до изделия для стали 09Г2С ($w_{II} = 24$ кВт) (а) и 12Х18Н10Т (48 кВт) (б)

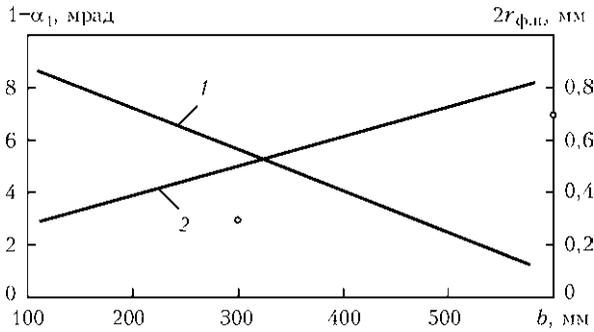


Рис. 4. Расчетные зависимости половинного угла сходимости (1) и радиуса фокусного пятна (2) для различных расстояний b

Результаты оценок радиуса и половинного угла сходимости пучка в плоскости изделия, удаленного от пушки на различные расстояния, приведены на рис. 4.

Как следует из рис. 4, при увеличении расстояния от середины немагнитного зазора пушки до изделия практически в 5 раз (от 120 до 570 мм) радиус фокусного пятна увеличивается в 3 раза. Однако благодаря уменьшению угла сходимости пучка возрастает протяженность перешейка пучка и соответственно незначительно меняется глубина и геометрия литой зоны формируемых проплавлений.

Некоторое уменьшение глубины проплавления при предельно малом рабочем расстоянии можно объяснить тем, что значение половинного угла сходимости пучка 10^{-2} рад является для условий эксперимента критическим, поскольку протяженность перешейка оказывается недостаточной для формирования более глубокого проплавления.

Выводы

1. Если при электронно-лучевой сварке металлов толщиной до 3...4 мм геометрические размеры проплавления определяются радиусом поперечного сечения маломощного пучка электронов, то при сварке металлов больших толщин пучком соответственно большей мощности глубина литой зоны зависит от протяженности перешейка пучка, которая определяется углом сходимости пучка на изделии.

2. Протяженность перешейка пучка, формируемого конкретной сварочной пушкой, незначительно изменяется в достаточно широком диапазоне расстояний до изделия, поэтому глубина литой зоны оказывается практически неизменной.

3. Для наиболее широко применяемых сварочных пушек типа ЭЛА-60 мощностью 10...60 кВт рекомендуемое оптимальное расстояние торце пушки—изделие составляет 150...200 мм с учетом необходимости хорошего отображения зоны стыка во вторичных электронах.

1. Menhard C., Loewer T. The electron beam geometry — definition, measurement and significance for the welding process // *Welding and Cutting*. — 2009. — № 8, № 3. — P. 138–142.
2. Mladenov G., Koleva E. Evaluation and some applications of the electron beam emittance // *Proc. of 7th Intern. conf. on beam technology*, 17–19 Apr. 2007, Halle, Germany. — P. 85–92, publ. by SLV/DVS.
3. Дер-Шварц Г. В. К расчету сферической аберрации осесимметричных магнитных линз // *Радиотехника и электроника*. — 1971. — № 7. — С. 1305–1306.
4. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
5. Bas E. B., Cremosnik G., Lerch H. Beitrag zum problem der erzeugung des elektronenstrahles fuer schmelzen // *Verdampfen, Schweissen und Bohren mit Elektronenstrahlen: Schweizer Archiv fur angewandte Wissenschaft und Technik*. — 1962. — S. 112–121.

Geometry of electron beam penetrations over a wide range of gun to workpiece distances was experimentally studied. A weak correlation was established between the gun to workpiece distance and penetration depth on thick metals. The possibility of substantially increasing the gun to workpiece distance without a marked change in the penetration parameters is attributable to a corresponding decrease in the convergence angle of the beam within a workpiece region.

Поступила в редакцию 16.12.2009