

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА НА ОБРАЗОВАНИЕ КОРНЕВЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ЭЛС

Ю. И. СТАТЫВКА, инж., В. А. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук (Восточноукр. нац. ун-т, г. Луганск)

Рассмотрено влияние геометрических параметров электронного луча на неравномерность глубины проплавления в случае сварки с внешним возмущением и без него. Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: электроно-лучевая сварка, парогазовый канал, неравномерность глубины проплавления, вероятностная модель, фокусировка пучка, развертка пучка

Электроно-лучевая сварка (ЭЛС) благодаря своему уникальному свойству однопроходного глубокого проплавления является перспективным способом соединения материалов [1, 2], несмотря на проблемы с обеспечением стабильности формирования сварного шва, в частности глубины проплавления.

В теории ЭЛС разработаны математические модели глубокого проплавления металла и образования парогазового канала [3–8]. В то же время в современных публикациях при описании процессов образования корневых дефектов не учитывается ряд важных факторов. Обычно изучают устойчивость парогазового канала к тем или иным возмущениям и не ставят задачу оценки амплитуды колебаний глубины проплавления (корневых дефектов) в зависимости от параметров технологического процесса. Так, авторы работ [9–12], исходя из теоретического рассмотрения задачи, приводят соотношения, позволяющие выбрать оптимальную частоту круговой развертки электронного луча, но зависимости для оценки амплитуды колебаний глубины проплавления, частоты и вероятности образования корневых и других характерных дефектов глубокого проплавления определяют из экспериментальных результатов. Авторы работы [13] предлагают математическую модель для оценки амплитуды колебаний глубины проплавления в случае сварки с вибрационным воздействием на сварочную ванну, но лишь при условии, что выбрана оптимальная частота такого воздействия.

Поэтому задача разработки математических моделей процесса образования корневых дефектов остается актуальной.

В работе [14] исследовали проблему экранирования конического электронного пучка равномерно распределенными вдоль его оси возмущениями расплава. Получены соотношения для плотности распределения и математического ожидания амплитуды проекций возмущений на плоскость минимального сечения пучка в зависимости от его геометрии и глубины проплавления.

Рассмотрим вопрос о неравномерности глубины проплавления при экранировании конического электронного пучка (рис. 1). На рисунке R_0 обозначен минимальный радиус электронного пучка; A — амплитуда экранирующего элемента; ξ — проекция экранирующего элемента на плоскость минимального сечения пучка; b — глубина минимального сечения пучка; l — расстояние от минимального сечения пучка до его фокальной плоскости; h и r — координаты экранирующего элемента.

Найдем проекцию амплитуды экранирующего элемента A на плоскость минимального сечения пучка. Из геометрических соотношений очевидно, что

$$\xi = \frac{Al}{l + |b - h|}. \quad (1)$$

С целью моделирования более широкого класса ситуаций предположим, что возмущения расплава, экранирующие электронный пучок, распределены по глубине с плотностью бета-распределения $H(h)$ [15]:

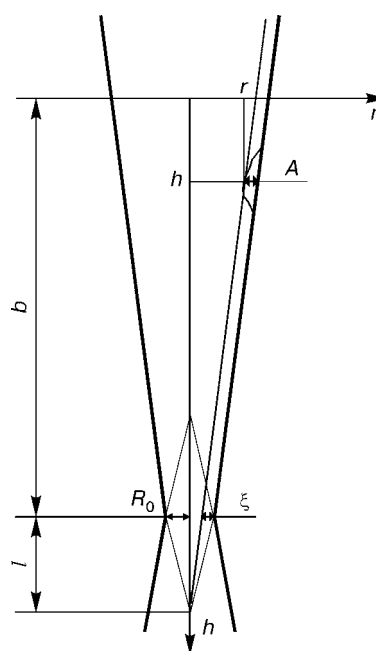


Рис. 1. Схема экранирования электронного луча расплавом в парогазовом канале

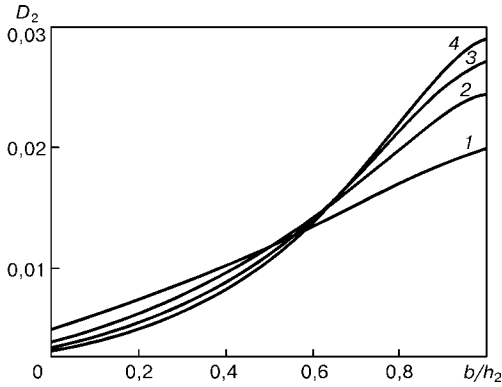


Рис. 2. Зависимость $D_2(b, h_2)$ при $\gamma = 0,01$ рад и различных α и β : 1 — $\alpha = 1, \beta = 1$; 2 — $\alpha = 2, \beta = 1$; 3 — $\alpha = 3, \beta = 1$; 4 — $\alpha = 4, \beta = 1$

$$H(h) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{h - h_1}{h_2 - h_1}\right)^{\alpha - 1} \left(1 - \frac{h - h_1}{h_2 - h_1}\right)^{\beta - 1}, \quad (2)$$

где Γ — гамма-функция; α, β — параметры бета-распределения; h_1, h_2 — интервалы глубин, где происходит экранирование. С помощью выражения (2) при $\alpha \geq 1, \beta \geq 1$ удобно моделировать распределение экранирующих элементов на отрезке $[h_1, h_2]$ по глубине парогазового канала: равномерное при $\alpha = \beta = 1$, сосредоточенное большей частью в корневой, верхней или средней части канала соответственно при $\alpha < \beta, \alpha > \beta$ и $\alpha = \beta$.

Если возмущения амплитудой $A = \text{const}$ распределены по высоте с плотностью $H(h)$, то математическое ожидание m_2 квадрата проекции амплитуды на плоскость минимального сечения пучка, пропорциональное экранируемой энергии, можно найти как

$$m_2 = \int_{h_1}^{h_2} \xi^2 H(h) dh. \quad (3)$$

При $h_1 = 0$ с учетом уравнений (1) и (2) находим

$$m_2 = \frac{lA^2(lh_2 + 2h_2b - 2b^2)}{(l+b)(l+h_2-b)h_2}.$$

Можно считать, что в одном акте экранирования электронный луч перекрывается диском радиуса $\sqrt{m_2}$ в плоскости минимального сечения.

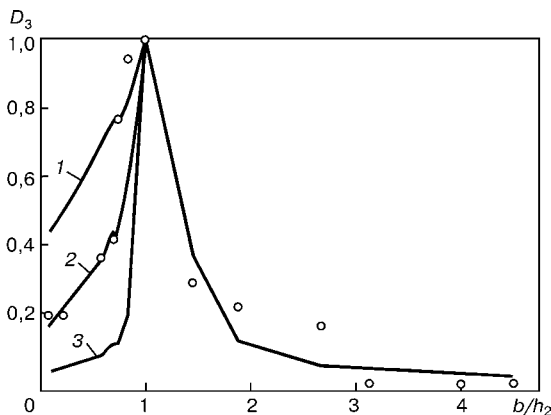


Рис. 3. Сравнение расчетных данных с экспериментальными [16]

Экранирование пучка возмущениями расплава происходит на различной глубине [3, 5, 6], но существенные изменения фронта плавления — только в корневой части парогазового канала. Найдем отношение m_2 , пропорциональное экранируемой возмущениями мощности пучка, к квадрату радиуса идеального электронного пучка R_n на глубине h_2 . Из рис. 1 следует, что

$$R_n = R_0(l + |h_2 - b|)/l.$$

На рис. 2 показана зависимость

$$D_2 = \frac{m_2}{R_n^2} \text{ от } b/h_2.$$

Величину D_2 можно интерпретировать как долю площади пучка в корневой части парогазового канала, пропорциональную его энергии, которая экранирована возмущениями расплава. При всех $b \leq h_2$ величина D_2 достигает наибольшего значения при $b/h_2 = 1$ независимо от параметров распределения возмущений по глубине проплавления.

Таким образом, полученные теоретические зависимости хорошо описывают известный из экспериментальных исследований факт наибольших колебаний глубины проплавления при острой (кинжальной) форме проплавления, получаемой, как правило, при расположении плоскости минимального сечения электронного луча в корневой части шва [3, 6, 16].

Для сравнения с экспериментальными данными работ [3, 16] использовали величину

$$D_3 = \frac{D_2(b, h_2)}{D_2(b = h_2, h_2)}.$$

На рис. 3 представлена зависимость D_3 от b/h_2 при равномерном распределении экранирующих элементов расплава по глубине парогазового канала ($\alpha = \beta = 1$) для значений угла сходимости γ пучка, равных 0,01; 0,03 и 0,05 рад (соответственно кривые 1–3). Точки — экспериментальные данные для титанового сплава ВТ6 [3, 16], построенные как зависимость $\Delta h_1/\Delta h_{b=h_2}$ от b/h_2 . Значения D_3 вычисляли для экспериментальных данных b и h_2 при $R_0 = 0,7$ мм и неизменных амплитудах A возмущений во всех экспериментах. Приведенные дан-

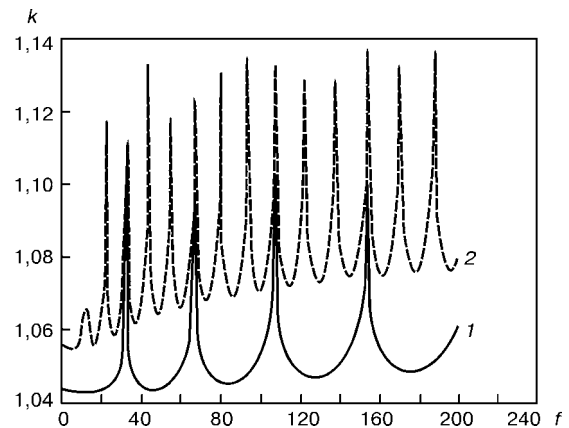


Рис. 4. Зависимость коэффициента стабильности от частоты развертки f для $h_2 = 10$ (1), 30 (2) мм при $R_{\text{scan}} = 0,5$ мм

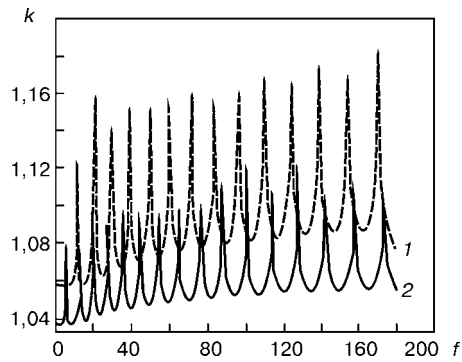


Рис. 5. Зависимость коэффициента стабильности от частоты развертки f для $R_{scan} = 0,3$ (1) и $0,7$ (2) мм при $h_2 = 30$ мм

ные иллюстрируют качественное совпадение расчетных и экспериментальных значений.

Определяемая из формулы (3) величина m_2 может быть использована и при моделировании образования корневых дефектов в случае сварки с внешним воздействием на сварочную ванну.

Пусть q — средняя удельная мощность пучка. Тогда величину $q\pi t_2$ можно использовать в качестве m_Δ — математического ожидания уменьшения мощности пучка в корне пароголового канала в одном событии экранирования в рамках вероятностной модели формирования корня шва [17], основанной на схеме дробового процесса. На рис. 4 и 5 приведены характерные для этой модели результаты в случае использования $m_\Delta = q\pi t_2$ при сварке с круговой разверткой электронного пучка радиусом R_{scan} . В качестве показателя, характеризующего неравномерность глубины проплавления, принят

коэффициент стабильности шва $k = \frac{h_{max}}{h_{max} - \Delta h}$, где

h_{max} — наибольшая глубина проплавления в корневых дефектах; Δh высота корневого дефекта. Расчет выполнен для алюминия. Видно, что увеличение глубины проплавления или уменьшение амплитуды развертки луча приводит к возрастанию амплитуды корневых дефектов и более плотному расположению собственных частот колебаний жидкого металла в сварочной ванне. Расчет выполнен при $A = 0,1R_0$, $b = 0,3h_2$, $R_0 = 1$ мм, $\gamma = 0,01$ рад при указанных радиусе развертки луча R_{scan} и максимальной глубине проплавления h_2 . Толщина расплава на передней стенке сварочной ванны была принята равной 0,5 мм.

Выводы

1. Разработана методика аналитической оценки доли энергии электронного луча, экранируемой возмущениями расплава в пароголовом канале, позволяющая оценить неравномерность глубины проплавления.

The effect of electron beam geometric parameters on non-uniformity of penetration depth in case of welding at external action and without it is considered. The theoretical results have a good correlation with experimental data.

2. В рамках вероятностной модели образования корневых дефектов на основе схемы дробового процесса получены зависимости для определения неравномерности глубины проплавления, учитывающие фокусировку, радиус и частоту круговой развертки электронного луча.

1. Патон Б. Е. Проблемы сварки на рубеже веков // Автомат. сварка. — 1999. — № 1. — С. 4–14.
2. Патон Б. Е. Современные электронно-лучевые технологии Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины // Там же. — 2001. — № 2. — С. 3–8.
3. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев и др. — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с.
5. Лесков Г. И., Трунов Е. Н., Живага Л. И. Форма, размеры и устойчивость парадинамических каналов в металле при электронно-лучевой сварке // Автомат. сварка. — 1976. — № 6. — С. 13–17.
6. Лесков Г. И., Живага Л. И. Плавление металла большой толщины при сварке коническим электронным пучком // Там же. — 1978. — № 4. — С. 11–14.
7. Ольшанский Н. А., Гурураджа Г. Д. Определение глубины проплавления при электронно-лучевой сварке // Там же. — 1972. — № 8. — С. 11–12.
8. Точилкин В. А. К модели пароголового канала при лучевой сварке // Материалы VIII Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке. — М.: Моск. энерг. ин-т, 1983. — С. 118–123.
9. Шилов Г. А., Акопьянц К. С., Касаткин О. Г. Влияние частоты и диаметра круговой развертки электронного луча на проплавление металла при ЭЛС // Автомат. сварка. — 1983. — № 8. — С. 25–28.
10. Акопьянц К. С. Предотвращение образования корневых дефектов при электронно-лучевой сварке // Там же. — 1984. — № 6. — С. 59–61.
11. Акопьянц К. С., Шилов Г. А. Влияние круговой развертки электронного луча на предотвращение корневых дефектов при сварке // Междунар. конф. по электронно-лучевым технологиям (Варна, 26 мая – 2 июня 1985 г.). — София: Институт по электроника, 1985. — С. 229–234.
12. Шилов Г. А., Акопьянц К. С., Ковбасенко С. Н. Выбор оптимальных фокусировки и развертки луча при ЭЛС сталей толщиной до 130 мм // Материалы VIII Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке. — М.: Моск. энерг. ин-т, 1983. — С. 97–101.
13. Шевченко А. В., Насер М. Модель процесса формирования сварного шва при ЭЛС с глубинным проплавлением // Луган. машиностроит. ин-т. — Луганск, 1992. — 12 с. — Деп. в УкрИНТЭИ 11.03.92, № 328-Укр. 92.
14. Стативка Ю. Г., Шевченко В. О. Экранивание конического пучка збуреннями розплаву при ЕПЗ // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту. — 2000. — № 5. — С. 224–229.
15. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королюк, Н. И. Петренко, А. В. Скороход и др. — М.: Наука, 1985. — 640 с.
16. Влияние фокусировки электронного пучка на стабильность глубины шва при сварке сплавов АМг6 и ВТ6 / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, В. Е. Локшин, А. А. Бондарев // Автомат. сварка. — 1975. — № 2. — С. 72–73.
17. Стативка Ю. Г., Шевченко В. О. Математичне моделювання процесу формування зварного шва при ЕПЗ // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту. — 2000. — № 9. — С. 202–208.

Поступила в редакцию 17.05.2001