

УДК 621.791.72

И.В. Ситников

I.V. Sitnikov

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ПРИМЕНЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

APPLICATION OF THE ELECTRON OSCILLATION BEAM AT ELECTRON BEAM WELDING

Описан технологический прием осцилляции электронного пучка при электронно-лучевой сварке. Рассмотрены способы реализации осцилляции, ее характеристики и влияние на формирование канала проплавления, свойства получаемых сварных соединений.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, осцилляция электронного пучка, траектории колебания электронного пучка, периодическое воздействие, электронный пучок.

The article describes the technological method – oscillation of the electron beam during electron beam welding. The methods of implementation of the oscillation, its characteristics and its influence on the formation of the penetration channel, properties of the resulting weld joints.

Keywords: electron-beam welding, oscillation of the electron beam trajectory oscillations of the electron beam, periodic action, electron beam.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) используется в различных областях промышленности. Область применения – от полностью автоматизированного высокопроизводительного и дешевого конвейерного производства деталей до штучных дорогих двигателей авиапромышленности. Для этих областей производств (и многих других) сварочные процессы должны соответствовать более жестким требованиям, которые становятся с годами все более распространенными. В связи с этим ЭЛС идеально подходит для отраслей с требованием высокого качества сварных швов и хорошего внешнего вида, что обусловлено возможностью адаптации к специфическим сварочным работам и производственному окружению [1–3].

ЭЛС относится к высококонцентрированным способам сварки. Плотность вводимой энергии может достигать 10^9 Вт/см². Близкими по концентрации энергии в зоне нагрева являются плазменная сварка и лазерная сварка.

ЭЛС обладает рядом преимуществ перед другими видами сварки. Среди них – защита сварочной ванны от влияния атмосферы вследствие проведения процесса в вакууме (10^{-2} Па), глубокие и узкие швы, минимальная зона термического влияния и др. ЭЛС обычно применяется при сварке особо ответственных и высоконагруженных узлов и деталей конструкций [4, 5]. ЭЛС может производиться как статичным пучком, так и с применением осцилляции электронного пучка.

Осцилляция – это колебательные движения. С помощью колебательных перемещений пучка появляется дополнительная возможность влиять на процесс сварки, а следовательно, и на образование шва. При этом пучок, обладающий неизменной удельной мощностью, последовательно воздействует на ряд точек в непосредственной окрестности центра сварки.

В электронно-лучевой установке осцилляция осуществляется за счет отклоняющей системы, которая представляет собой одну или две пары пространственно ориентированных катушек. При подаче на катушки постоянного тока получаем постоянное магнитное поле, которое будет отклонять электронный пучок на определенный постоянный угол. Если же подать на катушки переменный ток, то получим переменное магнитное поле, которое и создает колебания электронного пучка.

При достаточно малой частоте осцилляции пучка паровой канал следует за мгновенным положением места бомбардировки поверхности пучком. Если же частота более высокая, то происходит расширение парового канала. В результате осцилляции пучка усиливается дегазация металла ванны, что способствует уменьшению пористости шва.

Поскольку ванна жидкого металла представляет собой образование, склонное к колебаниям, эти колебания с помощью осцилляции пучка можно перевести в разряд вынужденных колебаний и тем самым воздействовать на прохождение фронта кристаллизации шва и на формирование корня и усиление шва. При соответствующем выборе частоты и амплитуды осцилляции можно добиться подавления дефекта в виде корневой пилены, достичь образования мелкочешуйчатого усиления шва, плавного формирования корня шва при сквозном проплаве, уменьшения величины зерна, уменьшения или полной ликвидации таких дефектов, как поры, раковины, трещины по центру шва.

В практике ЭЛС широко применяются устройства осцилляции пучка. Подобные устройства либо есть в составе современных энергоблоков, либо могут быть выполнены в качестве приставки и использованы со штатными отклоняющими катушками электронно-лучевых пушек.

Не следует забывать, что при неудачном выборе частоты осцилляции она может, наоборот, явиться возбудителем колебания расплава. Оптималь-

ные значения амплитуды и частоты колебаний определяются свойствами парового канала и слоя расплава, и их находят экспериментально.

Амплитуда осцилляции пучка при обычной сварке лежит в пределах 1–3 мм, а частота колебаний – в пределах 50–500 Гц.

Увеличение амплитуды колебаний поперек шва приводит в основном к расширению шва. При больших амплитудах можно получить швы с разделенными ваннами (рис. 1, 4).

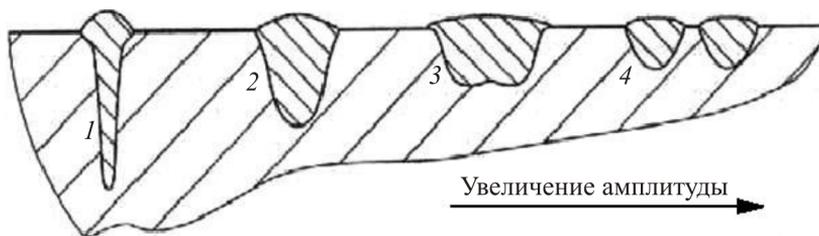


Рис. 1. Изменение характера проплавления (1–4) при увеличении амплитуды осцилляции электронного пучка

Увеличение амплитуды вдоль шва увеличивает время пребывания материала в расплавленном состоянии и меняет форму шва (рис. 2).

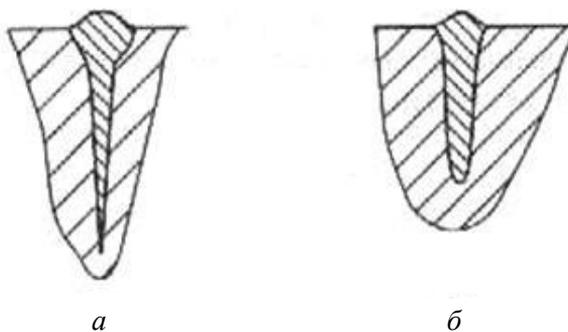


Рис. 2. Форма проплавления шва без осцилляции пучка (а) и при продольной осцилляции (б)

В любом варианте осцилляции проплавляющая способность луча падает, и для сохранения требуемой глубины проплавления необходимо увеличивать ток луча [6].

Характер колебаний луча может быть различным, но наиболее часто применяются круговые, поперечные, продольные, X-образные. ЭЛС с вращением электронного пучка по круговой траектории позволяет добиться существенного уменьшения образования дефекта в виде корневой пилы, однако ввиду того, что плотность мощности в центральной части зоны нагрева мала,

использование круговых колебаний приводит к значительному уменьшению глубины проплавления по сравнению со сваркой неподвижным пучком. Использование продольных или поперечных колебаний пучка относительно стыка с целью устранения дефекта в виде корневой пилы также не позволяет добиться желаемых результатов.

Дефект в виде корневой пилы в корне сварного шва существенно уменьшается при X-образных колебаниях электронного пучка в процессе ЭЛС (рис. 3). При этом уменьшение глубины проплавления незначительно по сравнению с результатом широко применяемых на практике круговых колебаний пучка.

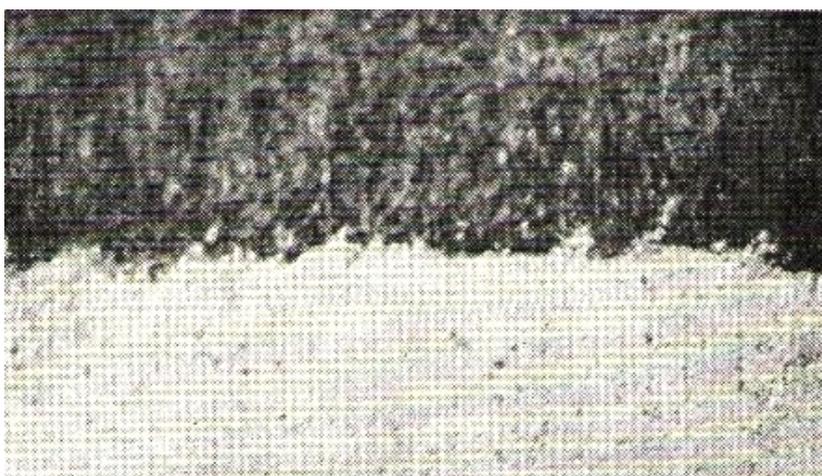
*a**б*

Рис. 3. Продольные макрошлифы ($\times 2$) корневой части швов, полученных:
a – без колебаний пучка; *б* – с колебаниями по X-образной траектории

Колебания электронного пучка по X-образной траектории целесообразно производить при оптимальной фокусировке, обеспечивающей при заданных режимах сварки максимальную глубину проплавления (рис. 4, 5). Такая фокусировка может быть установлена по максимальному значению амплитуды колебаний переменной составляющей спектра тока в цепи свариваемого изделия или коллектора с частотой в диапазоне 3–15 кГц как при неподвижном, так и при осциллирующем пучке [7–11].

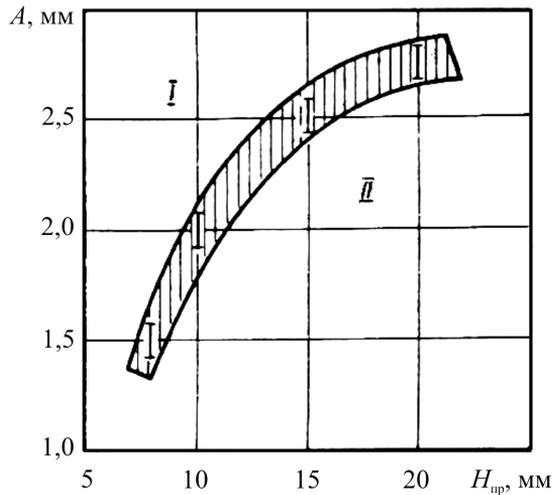


Рис. 4. Зависимость оптимальной амплитуды колебаний пучка по X-образной траектории от глубины проплавления $H_{пр}$:
I – бездефектный шов; II – шов с дефектом в виде корневой пилы

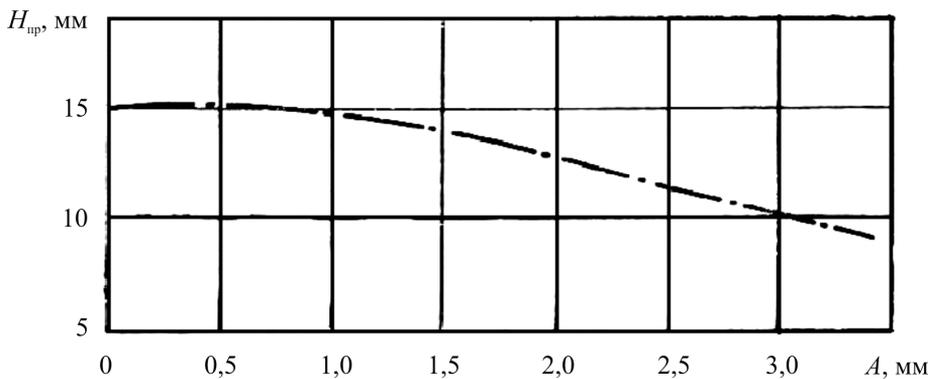


Рис. 5. Зависимость глубины проплавления от амплитуды колебаний электронного пучка по X-образной траектории [5]

Таким образом, при осцилляции электронного пучка возможно получение качественных сварных соединений.

Список литературы

1. Schubert G. Electron beam welding – Process, applications and equipment // *Welding in the World*. – 2009. – Iss. 53. – P. 283–288.
2. Электронно-лучевая сварка высокопрочных сталей с бронзой с использованием динамического позиционирования электронного пучка / В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов, Т.В. Ольшанская, А.А. Абдуллин, Г.М. Младенов, Е.Г. Колева, С.И. Быков // *Сварка и диагностика*. – 2014. – № 1. – С. 48–49.
3. Технология сборки и испытаний космических аппаратов: учебник для вузов / И.Т. Беляков [и др.]; под общ. ред. И.Т. Белякова, И.А. Зернова. – М.: Машиностроение, 1990. – 325 с.
4. Основы технологии электронно-лучевой и диффузионной сварки / С.И. Глазов [и др.]; под общ. науч. ред. О.С. Сироткина, С.В. Чуклинова. – Рыбинск, 2001. – 288 с.
5. Беленький В.Я. Развертка электронного пучка по X-образной траектории как средство уменьшения дефектов в корне шва при электронно-лучевой сварке // *Автоматическая сварка*. – 1986. – № 9. – С. 35–37.
6. Влияние осцилляции электронного пучка на формирование структуры и свойства сварного шва / Т.В. Ольшанская, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Г.М. Младенов // *Сварочное производство*. – 2012. – № 11. – С. 13–18.
7. Modeling of electron-beam welding to determine the weld joints parameters of dissimilar materials / G.L. Permyakov, T.V. Olshanskaya, V.Y. Belenkiy, D.N. Trushnikov, L.N. Krotov // *Life Science Journal*. – 2014. – Vol. 11, no. 4. – P. 300–307.
8. Особенности получения качественных сварных швов при электронно-лучевой сварке высокопрочных сталей большой толщины / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Г.М. Младенов, Т.В. Ольшанская // *Автоматическая сварка*. – 2012. – № 2 (706). – С. 47–50.
9. Исследование геометрических характеристик и микроструктуры сварных швов при электронно-лучевой сварке стали 12X18H10T с осцилляцией электронного пучка / Е.С. Саломатова, В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Т.В. Ольшанская // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2012. – Т. 14, № 3. – С. 36–42.
10. Язовских В.М., Ольшанская Т.В. Расчет формы шва и направления роста кристаллов при электронно-лучевой сварке в системе Mathcad // *Вест-*

ник Пермского государственного технического университета. Механика и технология материалов и конструкций. – 2000. – № 3. – С. 156.

11. Особенности кристаллизации металла шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / В.М. Язовских, Т.В. Ольшанская, Р.А. Мусин, В.Я. Беленький // Сварочное производство. – 1999. – № 1. – С. 3.

Получено 10.04.2015

Ситников Илья Владимирович – студент, ПНИПУ, МТФ, гр. ТСП-11-1,
e-mail: www.sitya@mail.ru.