

DOI: 10/15593/2224-9877/2017.2.11

УДК 621.791.722

С.В. Варушкин, В.Я. Беленький, Н.А. Зырянов, А.А. КылосовПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ОСЦИЛЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА КАК СРЕДСТВО
УЛУЧШЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОРНЯ СВАРНОГО ШВА
И ОБЛЕГЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ СКВОЗНОГО ПРОПЛАВЛЕНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ**

При электронно-лучевой сварке в качестве технологического приема, предотвращающего образование корневых дефектов в сварном шве (пикообразования, пустот и несплавлений в корневой части шва), широко применяется осцилляция электронного луча. Основными формами развертки электронного луча при этом являются: прямая линия вдоль стыка (продольная осцилляция), прямая линия поперек стыка (поперечная осцилляция), круговая и X-образная развертки. Другим действенным способом предотвращения корневых дефектов в сварном шве является сварка в режиме полного проплавления. Однако в этом случае требуется динамическая стабилизация режима проплавления в реальном времени, что обусловлено стохастическим характером процессов взаимодействия концентрированного электронного луча с материалом изделия. Осцилляция электронного луча способна снизить неравномерность обратного валика в продольном направлении. Целью данной работы являлось определение влияния осцилляции электронного луча на формирование корневой части шва при электронно-лучевой сварке. Кроме ранее упомянутых траекторий осцилляции электронного луча также исследовалась развертка по двум прямым линиям по обе стороны стыка. В качестве экспериментальных образцов при проведении исследований использовались цилиндрические образцы из нержавеющей стали аустенитного класса. Наружный диаметр образца был равен 160 мм, а толщина стенки составляла 10 мм. Глубина проплавления в процессе сварки стабилизировалась исходя из условия постоянства уровня сигнала рентгеновского излучения, измеряемого с обратной стороны изделия. После осуществления экспериментальных сварочных проходов были изготовлены продольные макрошлифы. Было установлено, что при электронно-лучевой сварке без осцилляции и с продольной осцилляцией электронного луча имеет место значительное образование пиков проплавления в корне шва, а использование X-образной и кольцевой разверток электронного луча при сварке приводит к некоторым особенностям формирования корневой части шва, описанным в статье.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, осцилляция электронного луча, полное проплавление, сквозное проплавление, обратный валик, корень шва, пик проплавления, пикообразование, продольный шлиф, кинжальное проплавление.

S.V. Varushkin, V.Ya. Belenkiy, N.A. Zyryanov, A.A. Kylosov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

OSCILLATION OF ELECTRON BEAM DURING ELECTRON BEAM WELDING FOR IMPROVING WELD ROOT AND EASYMENTING MELT-THROUGH MODE CONTROL

In electron beam welding, oscillation of the electron beam is popular used as technological tool for avoiding defects. The major forms of the electron beam deflection are straight line along the joint (longitude oscillation), straight line cross the joint (cross oscillation), circle, X-shape oscillation. The other good method for avoiding defects is a welding in penetration through mode. However, the necessary of dynamically stabilization in real time have been for this mode. It is due to stochastic character of the thermo physic processes in zone of electron beam and workpiece metal interaction. Oscillation of the electron beam can reduces of backside crown nonuniformity along the joint. The aim of this work is determination of the influence of electron beam oscillation on the weld root in electron beam welding. It must be noted that it was done in context of decreasing backside crown nonuniformity along the joint. In addition to aforementioned oscillation trajectory of the electron beam, the oscillation on two straight line along the joint is researched too. The cylindrical details of austenitic stainless steel are used as experimental workpieces for welding. Outside diameter of the details is 160 mm, and wall thickness is 10 mm. The penetration depth in welding process was stabilized by the condition that the level of X-ray signal from workpiece backside for each welding pass is constant. The longitudinal-section was executed after implementation of the experimental welding passes. In electron beam welding with longitudinal oscillation or without oscillation of the electron beam occurs significant formation of the penetration peaks in the root part. It should also be noted that X-shape or circle scanning by electron beam leads to some features of the root part formation, as described in the article.

Keywords: electron beam welding, oscillation of electron beam, full penetration, penetration-through, backside crown, weld root, penetration peak, peak-formation, longitudinal-section, knife fusion penetration.

Характерными дефектами при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) с глубоким проплавлением являются пикообразование в корне сварного шва и поперечное отклонение корня шва от плоскости стыка [1]. Снижение, а в ряде случаев и полное устранение таких дефектов достигается при использовании осцилляции электронного луча по различного вида траекториям [2–4]. В работе [5] применялась модуляция тока электронного луча и было отмечено ее положительное влияние на формирование корневой части шва.

В ряде случаев для повышения уровня механических характеристик шва применяется ЭЛС с полным проплавлением свариваемого металла [6–9].

ЭЛС с полным проплавлением может осуществляться как с технологической подкладкой, так и с удержанием сварочной ванны на весу. Последний вариант применяется с целью снижения трудоемкости

изготовления изделий и повышения энергоэффективности процесса сварки [1].

В канале проплавления, формируемом в металле электронным лучом при ЭЛС, протекают процессы, имеющие стохастический характер [10]. В связи с этим процесс ЭЛС с полным проплавлением и удержанием сварочной ванны на весу носит прерывистый характер: пики проплавления накладываются друг на друга, образуя обратный валик. Даже незначительное отклонение от такого режима проплавления приводит к провисанию сварочной ванны либо к формированию участков шва с неполным проплавлением, что, в свою очередь, снижает механические характеристики сварного шва, а также приводит к возникновению дополнительных концентраторов напряжений в металле [6, 11].

Стабилизация режима полного проплавления в большинстве случаев осуществляется с использованием в качестве контролируемого параметра среднего значения сквозного тока. Главным фактором для получения качественного обратного валика является правильный выбор постоянной времени цепи интегрирования и уровня значения проходящего тока относительно полного тока луча. Использование в качестве контролируемого параметра числа импульсов сквозного тока на 1 мм шва позволяет исключить проблемы, связанные с выбором уровня значений проходящего тока относительно полного тока луча и постоянной времени в цепи интегрирования. Однако точность регулирования в этом случае зависит от параметров входных фильтров измерительной системы и отношения величины сигнала к порогу его ограничения формирующим каскадом. Кроме того, в качестве контролируемого параметра может быть использовано усредненное значение продолжительности импульса сквозного тока, когда величина скажности делится на количество импульсов за единицу времени [12–15].

Уменьшение влияния на процесс ЭЛС с полным проплавлением отклонений от режима равномерного формирования обратного валика сварного шва можно обеспечить путем увеличения диаметра корневой части шва за счет снижения в ней плотности мощности электронного луча. Кроме того, осцилляция электронного луча в процессе ЭЛС позволяет стабилизировать колебательные процессы в канале проплавления [4], что оказывает положительное влияние на работу системы контроля сквозного проплавления.

Целью экспериментальных исследований являлось изучение влияния осцилляции электронного луча при сварке на формирование корневой части сварного шва при неполном и сквозном проплавлении металла.

Исследование проводилось на электронно-лучевой сварочной установке с энергетическим агрегатом ЭЛА-6ВЧ ($U_{\text{уск}} = 60$ кВ). В качестве образцов использовались цилиндрические образцы диаметром 160 мм и толщиной стенки 10 мм из стали 12Х18Н10Т. Сварка производилась с применением осцилляции электронного луча по различным траекториям. Для всех режимов скорость сварки составляла 5 мм/с, фокусировка электронного луча устанавливалась острой – обеспечивающей максимальную глубину проплавления для выбранного режима сварки. Значения тока электронного луча и вид осцилляции приведены в таблице.

Значения тока электронного луча и вид осцилляции при проведении исследований

№ п/п	$I_{\text{св}}$, мА	Вид осцилляции электронного луча *
1	40	Без осцилляции
2	45	Продольная осцилляция (амплитуда 1,6 мм, частота 810 Гц)
3	54	Кольцевая развертка (амплитуда 1,6 мм, частота 810 Гц)
4	55	X-образная развертка (амплитуда 1,6 мм, частота 810 Гц)
5	56	Формирование двух параллельных линий по обе стороны стыка, длина линий 1,6 мм (частота 810 Гц), расстояние между линиями 1 мм (частота переключения 8 кГц)

* Сигнал в катушках отклоняющей системы изменялся по линейному закону.

Ток электронного луча выбирался исходя из условия равенства глубины проплавления для различных режимов. Для этой цели со стороны изделия, обратной воздействию электронного луча, был установлен датчик рентгеновского излучения, который представлял собой сцинтилляционный детектор на основе монокристалла йодистого цезия, активированного таллием, в паре с кремниевым фотоумножителем.

лем. В процессе сварки путем регулирования мощности электронного луча сигнал рентгеновского излучения поддерживался на одном уровне, независимо от режима сварки. Такой способ позволил получить приблизительно одинаковую глубину проплавления для всех режимов сварки.

На рисунке приведены продольные макрошлифы сварных швов, полученных при ЭЛС с использованием статического электронного луча, а также при осцилляции луча по различного вида траекториям. Из рисунка видно, что при ЭЛС статическим электронным лучом имеет место значительное пикообразование в корне сварного шва, которое присутствует и на швах, выполненных с использованием продольно осциллирующего луча. При развертке электронного луча с образованием двух параллельных линий по обеим сторонам стыка наблюдается существенное снижение пикообразования в корне шва.

При сварке с X-образной и круговой осцилляцией электронного луча также наблюдается существенное снижение пикообразования в корне шва. Однако отдельные пики проплавления имеют отклонение от оси шва. Такой эффект снижает взаимное перекрытие пиков проплавления, что при ЭЛС со сквозным проплавлением будет оказывать негативное влияние на формирование корневого валика шва.

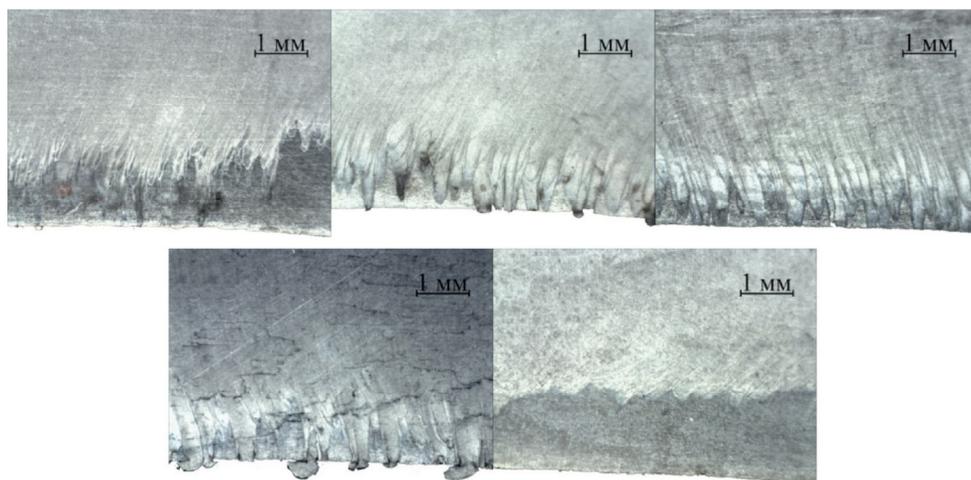


Рис. Продольные шлифы сварных швов при ЭЛС с различными видами развертки электронного луча

Из рисунка видно, что при осцилляции электронного луча пики проплавления по длине шва распределены более равномерно, чем при сварке статическим лучом. Такой характер формирования шва более предпочтителен для работы системы контроля сквозного проплавления по параметрам импульсов сквозного тока при ЭЛС.

Отсутствие отклонений пиков проплавления при ЭЛС с применением развертки электронного луча, образующей две линии вдоль шва, кроме снижения корневых дефектов способно привести к более качественному формированию корневого валика при ЭЛС с полным проплавлением. Также в ходе эксперимента была отмечена нестабильность перехода от режима частичного проплавления к режиму полного проплавления, что связано с увеличением объема сварочной ванны. При этом для равномерного формирования обратного валика сварного шва при полном проплавлении металла требуется использование систем автоматического регулирования глубины проплавления.

Список литературы

1. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
2. 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.
3. Effect of electron beam oscillations on the formation of the structure and properties of the welded joint / T.V. Ol'shanskaya, D.N. Trushnikov, V.Y. Belen'kii, G.M. Mladenov // Welding International. – 2013. – Vol. 27, iss. 11. – P. 881–885.
4. Ольшанская Т.В., Саломатова Е.С. Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 169–186.
5. Язовских В.М., Трушников Д.Н., Беленький В.Я. Механизм вторично-эмиссионных процессов при электронно-лучевой сварке с модуляцией электронного пучка // Сварочное производство. – 2004. – № 4. – С. 21–27.
6. Валяев И.Г., Жидков И.А., Квак В.Л. Двухпроходная ЭЛС стыковых соединений на весу // Сварочное производство. – 1990. – № 5. – С. 24–25.
7. Исследование сварных соединений разнородных сталей деталей магнитопровода, выполненных ЭЛС / А.Л. Гончаров, А.П. Слива, М.А. Портнов, Е.В. Терентьев, М.С. Грибков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 74–87.

8. Болдарев Е.А., Пашкин А.Н., Богданов В.В. Изготовление буровых долот с применением ЭЛС // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 91–92.

9. Процесс изготовления вакуумных камер для проекта FAIR с использованием электронно-лучевой сварки / А.М. Медведев, А.М. Семенов, Ю.И. Семенов, М.М. Сизов, А.А. Старостенко, А.С. Цыганов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 3. – С. 135–145.

10. Углов А.А., Селищев С.В. Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии. – М.: Наука, 1987. – 149 с.

11. Терентьев Е.В., Слива А.П. Выбор минимально допустимой скорости сварки при ЭЛС со сквозным проплавлением // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 40–47.

12. Устройство управления фокусировкой и глубиной проплавления по собственному рентгеновскому излучению при ЭЛС с модуляцией уровня фокусировки / В.Я. Браверман, Д.А. Скурихин, С.Г. Баякин, В.Ф. Шабанов, В.В. Башенко // Сварочное производство. – 1997. – № 1. – С. 16.

13. Управление электронно-лучевой сваркой / В.Д. Лаптенко, А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин, В.Я. Браверман. – Красноярск: САА, 2000. – 234 с.

14. Development of back current controller for improvement of back bead formation in electron beam welding / T. Shida, H. Okamura, S. Kokura, H. Kita. – Tokyo: Hitachi, 1984. – 26 p.

15. Способ электронно-лучевой сварки: пат. 2532626 Рос. Федерация: МПК В23К15/02 / Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Лялин А.Н., Пискунов А.Л., Щавлев В.Е.; заявитель и патентообладатель Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – № 2013113445/02; заявл. 26.03.13; опубл. 10.11.14, Бюл. № 31. – 10 с.

References

1. Rykalin N.N., Zuev I.V., Uglov A.A. Osnovy elektronno-luchevoi obrabotki materialov [Bases of electron beam processing of materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 239 p.

2. Belen'kii V.Ia., Trushnikov D.N., Mladenov G.M., Ol'shanskaia T.V. Osobennosti polucheniia kachestvennykh svarnykh shvov pri elektronno-luchevoi svarke vysokoprochnykh staley bol'shoi tolshchiny [Features of receiving qualitative welded seams at electron beam welding high-strength staly big thickness]. *Avtomaticheskaya svarka*, 2012, no. 2(706), 47–50 pp.

3. Ol'shanskaya T.V., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Y., Mladenov G.M. Effect of electron beam oscillations on the formation of the structure and properties of the welded joint. *Welding International*, 2013, vol. 27, iss. 11, 881–885 pp.

4. Ol'shanskaia T.V., Salomatova E.S. Obzor sovremennykh sposobov upravleniia elektronnyim luchom pri elektronno-luchevoi svarke [The review of modern ways of management of an electronic beam at electron beam welding]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 4, 169–186 pp.

5. Iazovskikh V.M., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ia. Mekhanizm vtorichno-emissionnykh protsessov pri elektronno-luchevoi svarke s moduliatsiei elektronного puchka [The mechanism of secondary and emissive processes in case of electron beam bonding with modulation of an electron beam]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 4, 21–27 pp.

6. Valiaev I.G., Zhidkov I.A., Kvak V.L. Dvukhprokhodnaia Elektronno-luchevaia Svarka stykovykh soedinenii na vesu [Two-pass electron beam welding of butt connections on weight]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1990, no. 5, 24–25 pp.

7. Goncharov A.L., Sliva A.P., Portnov M.A., Terent'ev E.V., Gribkov M.S. Issledovanie svarnykh soedinenii raznorodnykh stalei detalei magnitoprovoda, vypolnennykh Elektronno-luchevoi svarkoi [Research of welded connections diverse staly the details of a magnetic conductor executed by electron beam welding]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie*, 2013, vol. 15, no. 4, 74–87 pp.

8. Boldarev E.A., Pashkin A.N., Bogdanov V.V. Izgotovlenie burovykh dolot s primeneniem Elektronno-luchevaia Svarka [Production of boring chisels with application by electron beam welding]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2014, vol. 1, no. 10, 91–92 pp.

9. Medvedev A.M., Semenov A.M., Semenov Iu.I., Sizov, A.A. Starostenko M.M., Tsyganov A.S. Protsess izgotovleniia vakuurnykh kamer dlia proekta FAIR s ispol'zovaniem elektronno-luchevoi svarki [Process of manufacture of vacuum chambers for the FAIR project with electron beam bonding use]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 3, 135–145 pp.

10. Uglov A.A., Selishchev S.V. Avtokolebatel'nye protsessy pri vozdeistvii kontsentrirrovannykh potokov energii [Self-oscillatory processes at influence of the concentrated energy streams]. Moscow: Nauka, 1987, 149 p.

11. Terent'ev E.V., Sliva A.P. Vyor minimal'no dopustimoi skorosti svarki pri Elektronno-luchevaia Svarka so skvoznym proplavleniem [The choice of minimum admissible speed of welding at electron beam welding with through pro-melting]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2013, vol. 15, no. 4, 40–47 pp.

12. Braverman V.Ia., Skurikhin D.A., Baiakin S.G., Shabanov V.F., Bashenko V.V. Ustroistvo upravleniia fokusirovki i glubinoi proplavleniia po sobstvennomu rentgenovskomu izlucheniiu pri Elektronno-luchevaia Svarka s moduliatsiei urovnia fokusirovki [The control unit focusing and depth of a proplavleniye on own X-ray radiation in case of electron beam bonding with modulation of level of focusing]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 1, 16 p.

13. Laptinok V.D., Murygin A.V., Seregin Iu.N., Braverman V.Ia. Upravlenie elektronno-luchevoi svarkoi [Management of electron beam welding]. Krasnoiar'sk: Sankt-Peterburgskaia Astrologicheskaiia Akademiia, 2000, 234 p.

14. Shida T., Okamura H., Kokura S., Kita H. Development of back current controller for improvement of back bead formation in electron beam welding. Tokio: Hitachi, 1984, 26 p.

15. Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ia., Lialin A.N., Piskunov A.L., Shchavlev V.E. Sposob elektronno-luchevoi svarki [Way of electron beam welding]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2532626 (2013).

Получено 5.05.2017

Об авторах

Варушкин Степан Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: stepan.varushkin@mail.ru.

Беленький Владимир Яковлевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: belenkiy@pstu.ru.

Зырянов Николай Анатольевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: zyryanov-nikolai@mail.ru.

Кылов Александр Алексеевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sahka-85@mail.ru.

About the authors

Stepan V. Varushkin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: stepan.varushkin@mail.ru

Vladimir Ya. Belenkiy (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: belenkiy@pstu.ru.

Nikolai A. Zyryanov (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: zyryanov-nikolai@mail.ru

Aleksandr A. Kylov (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sahka-85@mail.ru.