

УДК 621.791.722

С. В. Варушкин, Д. Н. Трушников, В. Я. Беленький, Г. Л. Пермяков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь

## ОСОБЕННОСТИ ПРОХОДЯЩЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ С ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*В данном тексте рассматривается влияние осцилляции электронного пучка на форму сварного шва в контексте контроля сквозного проплавления. В статье представлены результаты эксперимента электронно-лучевой сварки с осцилляцией пучка и одновременной записью проходящего рентгеновского излучения. Полученные сварные швы поделены на три категории: кинжальная форма, конусная форма, эллиптический корень. В заключение проведены обработка и сравнение сигналов проходящего рентгеновского излучения для случаев формирования швов с кинжальным проплавлением и эллиптическим корнем.*

*Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, полное проплавление, осцилляция, проходящее рентгеновское излучение.*

S. V. Varushkin, D. N. Trushnikov, V. Ya. Belenkiy, G. L. Permiakov

## CHARACTERISTICS OF X-RAYS PASSING THROUGH WORKPIECE METAL IN ELECTRON-BEAM WELDING WITH THE OSCILLATION OF ELECTRON BEAM

*The effect of electron beam oscillation on weld shape formation in the context of full-penetration mode control is considered in the paper. Experimental results of EBW with beam oscillation and simultaneous registration of passing X-rays are also presented. The received welds are divided into three shape-based types: dagger, taper and elliptical bottom. For the formation of welds with dagger shape and elliptical bottom shape data processing and comparison of passing X-rays signals are provided.*

*Keywords: electron beam welding, full penetration mode, oscillation, passing X-rays.*

### *Введение*

В сварных конструкциях, изготавливаемых с применением электронно-лучевой сварки (ЭЛС), широко используются сварные швы с полным проплавлением металла. Такие швы исключают появление специфических дефектов ЭЛС, имеющих место при неполном проплавлении металла, являются

более надежными, и во многих случаях обеспечивают более высокие прочностные характеристики сварных соединений [1].

В настоящее время разработаны и опробованы на практике методы контроля сквозного проплавления путем использования сигнала проходящего тока. Однако сигнал проходящего тока возникает только в момент сквозного проплавления, что делает невозможным плавное регулирование или регулирование процесса ЭЛС с недопроплавом. Кроме того, ведутся исследования возможности контроля режима полного проплавления с помощью датчиков, установленных над зоной сварки [3; 4].

При ЭЛС с полным проплавлением металла для качественного формирования обратного валика наиболее подходят швы с эллиптической формой корневой части сварного шва. При таком формировании шва информационный сигнал для системы регулирования может значительно отличаться от сигнала при формировании шва с малым радиусом корневой части шва. Целью данной работы являлся анализ геометрии зон проплавления в металле при различных видах динамического воздействия на электронный пучок и оценка параметров сигнала вторичного рентгеновского излучения, регистрируемого с обратной стороны свариваемого изделия при формировании сварного шва.

#### *Материалы и методы исследования*

Исследование проводилось на электронно-лучевой сварочной установке с энергетическим агрегатом ЭЛА-6ВЧ. В качестве образцов использовались цилиндрические образцы диаметром 160 мм и толщиной стенки 10 мм из стали 12Х18Н10Т. В процессе сварки производилась регистрация рентгеновского излучения с обратной стороны изделия. В качестве датчика рентгеновского излучения использовался сцинтилляционный детектор на основе монокристалла активированного йодистого цезия и кремниевый фотоэлектронный умножитель. Режимы ЭЛС представлены в табл. 1.

После каждого сварочного прохода производилось охлаждение образца. По окончании опытов были выполнены поперечные макрошлифы для каждого режима.

Параметры режимов сварки

№ режима	U <sub>уск</sub> , кВ	I <sub>св</sub> , мА	V <sub>св</sub> , мм/с	Режим фокусировки	Осцилляция пучка
1	60	40	5	Острый фокус	безосц.
2	60	45	5	Острый фокус	продольная <sup>**</sup> 0,8 мм, 810 Гц
3	60	50	5	Острый фокус	поперечная <sup>**</sup> 0,8 мм, 810 Гц
4	60	54	5	Острый фокус	кольцевая развертка D = 0,8 мм, 810 Гц
5	60	44	5	Острый фокус	кольцевая развертка D = 0,5 мм, 810 Гц
6	60	48	5	Острый фокус	X-образная развертка <sup>*</sup> 0,8 мм, 810 Гц
7	60	44	5	Острый фокус	X-образная развертка <sup>*</sup> 0,5 мм, 810 Гц
8	60	55	5	Острый фокус	X-образная развертка <sup>**</sup> 0,8 мм, 810 Гц
9	60	49	5	Острый фокус	X-образная развертка <sup>**</sup> 0,5 мм, 810 Гц
10	60	56	5	Острый фокус	Развертка с формированием двух параллельных линий по обе стороны стыка <sup>**</sup> , длина линий 0,8 мм (810 Гц), расстояние между линиями 0,5 мм (8 кГц)
11	60	50	5	Острый фокус	прямоугольный растр <sup>**</sup> , длинна вдоль стыка 0,8 мм (810 Гц), ширина 0,5 мм (8 кГц)

<sup>\*</sup> Синусоидальное изменение сигнала в отклоняющей системе.

<sup>\*\*</sup> Линейное пилообразное изменение сигнала в отклоняющей системе.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена конфигурация поперечного сечения сварных швов, полученных при сварочных проходах с режимами, указанными в табл. 1. Эти швы можно условно разделить на 3 группы:

1. Швы с кинжальным проплавлением (№№ 1–3,5,7). Кроме шва, выполненного стационарным пучком, сюда можно отнести швы, полученные со следующими видами разверток: линейной продольной осцилляцией, X-образной и кольцевой развертками малой амплитудой.

2. Швы с конусной формой шва (№№ 6, 9). Швы, выполненные электронным пучком с разверткой по X-образной траектории и амплитудой отклонения 0,4 мм, отличаются широкой средней частью и узким корнем шва.

3. Швы с эллиптическим корнем шва (№№ 4, 10, 11). Таковую форму шва позволяют получить: кольцевая развертка, развертка с формированием двух параллельных линий по обе стороны стыка, а также прямоугольный растр с длинной стороной вдоль стыка.

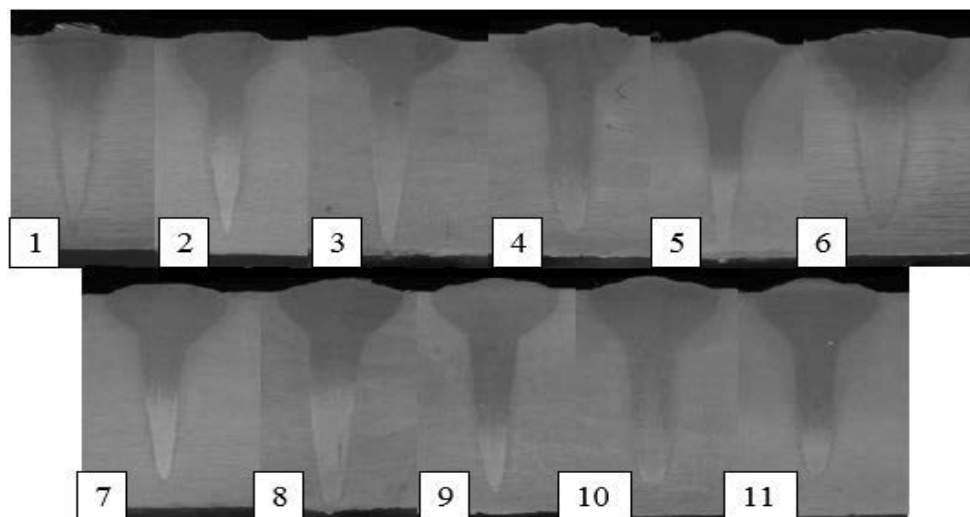


Рис. 1. Поперечные сечения швов  
(цифрами обозначены номера режимов, указанных в табл. 1)

Формирование кинжального проплавления обусловлено высокой концентрацией вводимой энергии. Швы конусной формы получаются вследствие того, что вводимая энергия частично распределена по области взаимодействия электронного пучка с металлом, но основная её часть находится в центре этой области. Корень шва эллиптической формы при ЭЛС достигается путем распределения вводимой энергии равномерно по области взаимодействия электронного пучка с металлом, либо по периферии этой области. Формирование шва с большим радиусом корня снижает вероятность появления корневых дефектов, приводит к повышению механических характеристик сварного шва [2].

Анализ геометрических размеров поперечных сечений сварных швов (табл. 2) и сопоставление их с параметрами режима сварки показали наличие обратной зависимости между радиусом корня шва и проплавляющей

способность электронного пучка (в качестве параметра использовалось удельный ток сварки на 1 мм проплавленной глубины).

Таблица 2

Геометрические размеры поперечных сечений сварных швов

№шва	H, мм	H2, мм	B, мм	B2, мм	I <sub>св</sub> /H, мА/мм	r, мм
1	9,32	0,55	3,71	1,13	4,29	0,07
2	9,10	0,35	3,74	1,36	4,95	0,07
3	10,46	0,54	5,37	1,55	4,78	0,20
4	9,60	0,54	5,03	1,76	5,63	0,44
5	10,16	0,62	4,34	1,29	4,33	0,12
6	8,71	0,44	5,02	1,70	5,51	0,30
7	8,59	0,41	4,84	1,37	5,12	0,18
8	10,65	0,62	5,35	1,86	5,16	0,30
9	8,73	0,52	4,97	1,42	5,61	0,19
10	9,16	0,58	5,45	1,77	6,11	0,62
11	8,24	0,59	4,85	1,51	6,07	0,37

где H – глубина шва, H2 – высота валика, B – ширина шва на поверхности, B2 – ширина шва на половине глубины шва, r – радиус корня шва.

Наиболее благоприятными для формирования шва с большим радиусом корневой части являются режимы ЭЛС с распределением мощности по периферии области взаимодействия луча с металлом. При снижении проплавляющей способности на 40 % такие режимы могут увеличить радиус корня более чем в 8 раз (режим 10).

На рис. 2 приведены результаты обработки сигнала рентгеновского излучения, измеренного с обратной стороны изделия, с использованием метода синхронного накопления для режимов 2 и 10. Как видно из графиков, при формировании шва с малым радиусом корневой части существует отчетливый пик сигнала в положении -0,2 мм относительно центра осцилляции пучка, и это положение соответствует воздействию пучка в корневой части шва. При формировании шва с большим радиусом корневой части наблюдается увеличение уровня сигнала практически на всей отрицательной области относительно центра осцилляции.

Кроме того, наблюдаются несколько пиков сигнала, что может быть объяснено колебаниями расплавленного металла в корне шва вследствие его

большого объема. Для качественного автоматического регулирования процесса сквозного проплавления при ЭЛС необходимо учитывать данный характер сигнала.

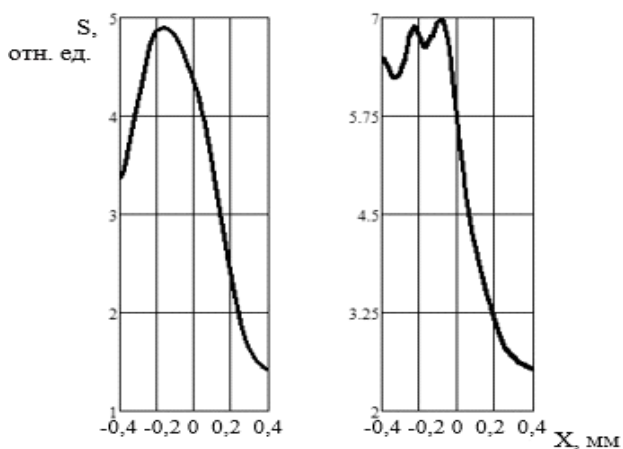


Рис. 2. Результаты обработки сигнала рентгеновского излучения (слева – режим №2, справа – режим №10)

### *Список литературы*

1. Получение бездефектных швов при электронно-лучевой сварке / В. Я. Беленький [и др.] // Наука – производству. – 2000. – № 5. – С. 42.
2. Замков В. Н., Шевелев А. Д., Хрипков К. С. Выбор режимов ЭЛС титана средней и большой толщины // Автоматическая сварка. – 1993. – № 1. – С. 50–52.
3. Трушников Д. Н., Беленький В. Я. Исследование формирования сигнала вторичного тока в плазме при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка // Сварочное производство. – 2012. – № 11. – С. 9–13.
4. Trushnikov D. N., Belenki'y V. Y., Portnov N. S., Mladenov G. M. Secondary-emission signal for weld formation monitoring and control in eletron beam welding (ebw) // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2012. – Т. 43. № 10. – P. 892–897.