

**Е.С. Саломатова, В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Т.В. Ольшанская**  
**E.S. Salomatova, V.Ya. Belenkiy, D.N. Trushnikov, T.V. Olshanskaya**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
И МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНЫХ ШВОВ  
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ СТАЛИ 12Х18Н10Т  
С ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

**INVESTIGATION OF GEOMETRICAL CHARACTERISTICS  
AND THE MICROSTRUCTURE OF WELDS AT ELECTRON  
BEAM WELDING OF STEEL 12X18H10T  
WITH THE ELECTRON BEAM OSCILLATION**

Исследуется формирование сварных швов при электронно-лучевой сварке стали 12Х18Н10Т с использованием осциллирующего электронного пучка. Рассмотрено влияние фокусировки электронного пучка на геометрию зоны проплавления при сварке с осцилляцией пучка. Приведена микроструктура металла сварного шва при сварке осциллирующим и статическим электронным пучком.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, осцилляция электронного пучка, аустенитная нержавеющая сталь, геометрические характеристики, режимы сварки.

In article formation of weld at electron beam welding of steel 12X18H10T with an electron beam oscillation is investigated. Influence of focusing of an electronic beam on geometry melting zone at welding with an beam oscillation is discussed. The microstructure of metal of a welds is given when welding by an beam oscillation and static electronic beam.

**Keywords:** electron beam welding, electron beam oscillation, austenitic stainless steel, geometrical characteristics, welding modes.

Одной из характерных особенностей нагрева металла электронным пучком при электронно-лучевой сварке является преобразование кинетической энергии ускоренных электронов в тепловую энергию при их торможении. При этом формирование сварного шва в значительной степени зависит от характеристик источника тепла и параметров его теплового воздействия [1–3]. Для улучшения формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке

широко применяется осцилляция электронного пучка по различного вида траекториям [4–8]. Однако до настоящего времени отсутствуют конкретные рекомендации по выбору траектории и пространственно-временных характеристик осцилляции электронного пучка для получения качественных сварных швов с заданной геометрией и микроструктурой.

В настоящей работе приведены результаты исследования электронно-лучевой сварки аустенитной стали 12X18H10T с поперечной относительно свариваемого стыка осцилляцией электронного пучка.

При проведении экспериментов выполнялись сварочные проходы при различных параметрах сварки с использованием статического и осциллирующего электронного пучка. Конфигурация зон проплавления приведена на рис. 1.

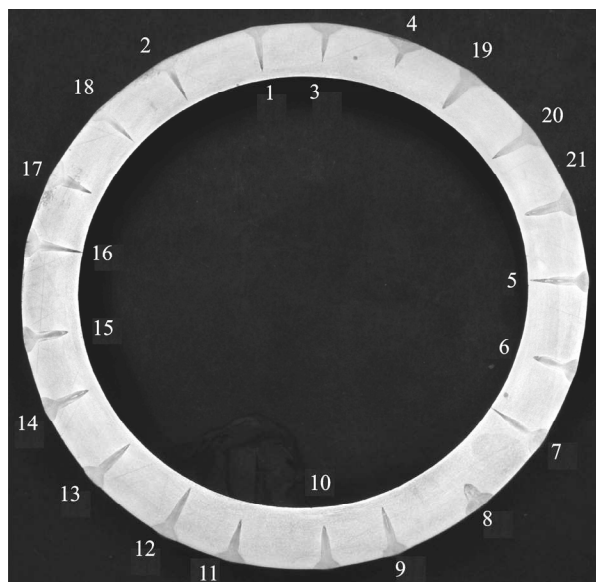


Рис. 1. Конфигурация зон проплавления металла электронным пучком при электронно-лучевой сварке стали 12X18H10T, выполненных на режимах 1–21

Был проведен анализ геометрических характеристик зон проплавления. Полученные данные приведены в табл. 1.

Значительный интерес представляет влияние поперечной осцилляции электронного пучка на геометрию зоны проплавления при сварке с острой фокусировкой электронного пучка, обеспечивающей максимальную глубину проплавления для заданных значений тока электронного пучка и рабочей дистанции сварки. В проводимых экспериментах значение тока острой фокусировки составляло 818 мА.

Таблица 1

## Геометрические характеристики зон проплавления

Номер наплавленного шва	Глубина проплавления, мм	Ширина проплавления, мм	Ширина корня шва, мм
1	9,40	4,85	1,71
2	10,51	5,97	1,73
3	8,51	6,74	1,55
4	6,98	7,17	1,34
5	9,93	4,56	2,01
6	7,79	4,59	2,37
7	11,60 (сквозное)	5,84	2,16
8	7,20	5,15	3,03
9	8,33	4,78	1,95
10	8,14	4,85	2,0
11	8,45	5,93	2,15
12	10,09	6,35	2,32
13	10,06	6,12	2,13
14	8,92	5,72	2,30
15	8,56	5,81	2,52
16	11,6 (сквозное)	6,47	2,35
17	10,05	7,44	2,57
18	9,86	5,80	1,50
19	9,43	5,60	2,11
20	9,41	5,61	2,59
21	10,57	6,04	2,26

На рис. 2 приведены средние значения глубины и ширины зоны проплавления при электронно-лучевой сварке статическим и осциллирующим электронным пучком.

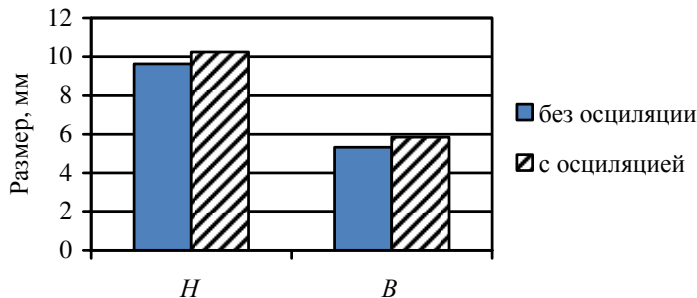


Рис. 2. Геометрические характеристики зоны проплавления при сварке с острой фокусировкой электронного пучка без осцилляции и с поперечной осцилляцией: *H* – среднее значение глубины проплавления; *B* – среднее значение ширины проплавления

При электронно-лучевой сварке с осцилляцией пучка глубина проплавления увеличилась на 6,3 %, а ширина увеличилась на 9,7 %.

Далее исследовалось влияние фокусировки электронного пучка на геометрию зоны проплавления (рис. 3, 4).

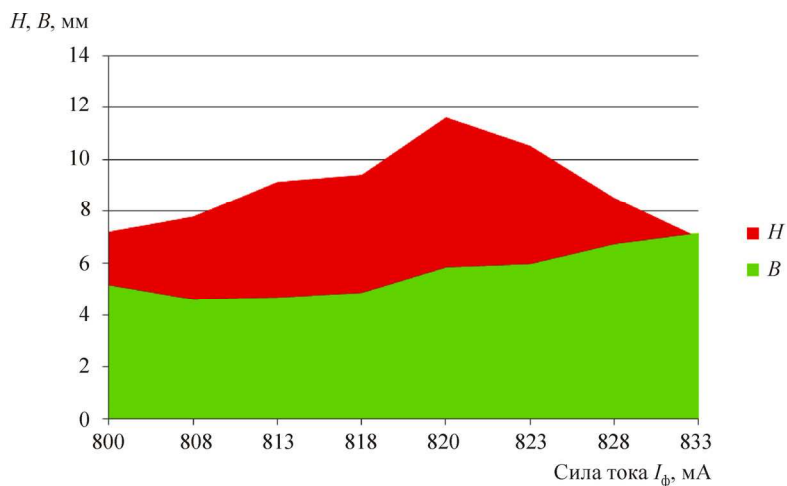


Рис. 3. Изменение геометрических характеристик зоны проплавления при изменении тока фокусировки без осцилляции электронного пучка

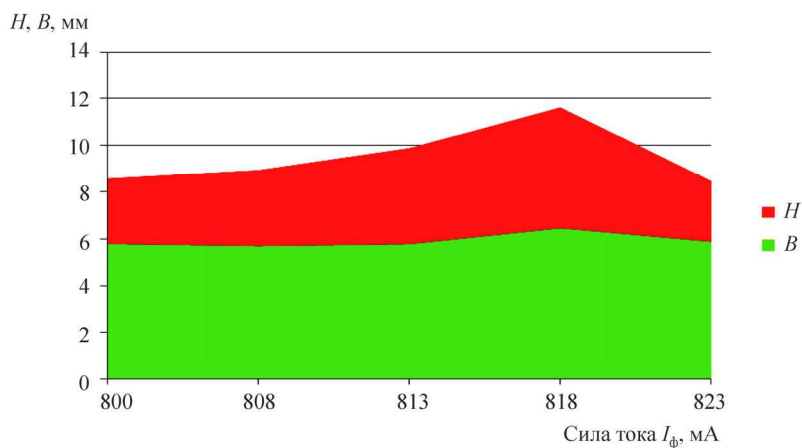


Рис. 4. Изменение геометрических характеристик при изменении тока фокусировки при поперечной осцилляции электронного пучка

На рис. 5 приведена геометрия зон проплавления, полученных при сварке с острой фокусировкой электронного пучка без осцилляции пучка и с поперечной осцилляцией пучка.

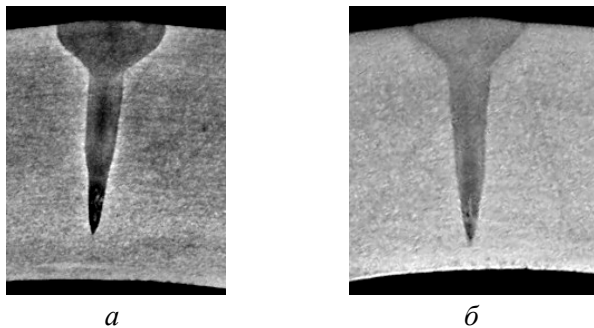


Рис. 5. Поперечное сечение сварочных швов: *а* – при острой фокусировке электронного пучка без осцилляции; *б* – при острой фокусировке электронного пучка с поперечной осцилляцией

На рис. 6 показана микроструктура швов, выполненных при сварке с острой фокусировкой электронного пучка без осцилляции и с поперечной осцилляцией пучка. Сварные швы имеют ярко выраженную дендритную структуру. Прослеживается резкая структурная разориентация по направлению осей роста кристаллов.

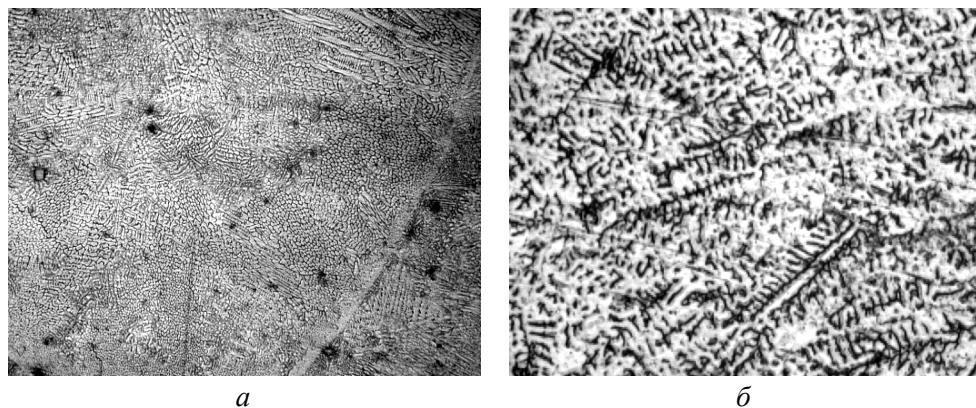


Рис. 6. Структура зон проплавления сварных швов: *а* – с применением поперечной осцилляции электронного пучка; *б* – без осцилляции пучка.  $\times 400$

При электронно-лучевой сварке с острой фокусировкой электронного пучка без осцилляции тела кристаллов расположены параллельно плоскости шлифа, а при поперечной осцилляции пучка рост кристаллов направлен перпендикулярно плоскости шва. Предположительно это связано с воздействием осциллирующего электронного пучка на фронт кристаллизации металла сварочной ванны.

## Список литературы

1. Динамическая модель электронно-лучевой сварки со сквозным проплавлением / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, А.Л. Пискунов, А.Н. Лялин // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2011. – Т. 13, № 3. – С. 72–84.

2. Язовских В.М., Беленький В.Я., Трушников Д.Н. Построение математических моделей сварки цилиндрических тел // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2012. – Т. 14, № 1. – С. 5–17.

3. Математическое моделирование сварочных процессов в пакете FEMLAB 3.0 / Р.А. Мусин, Д.Н. Трушников, В.А. Шкурихин, Ю.А. Путин // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2010. – Т. 12, № 4. – С. 7–16.

4. Model-based approach for investigation of electron beam welding of high-strength steel / E. Koleva, G. Mladenov, D.N. Trushnikov, V.Ya. Belenkiy // ELECTROTECHNIKA&ELECTRONIKA, Special issue: Papers from 10-th International Conference on Electron Beam Technologies – EBT-2012. – 2012. – № 5–6. – P. 115–118.

5. Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya. Development of a non-defect technology at electron beam welding // ELECTROTECHNIKA&ELECTRONIKA, Special issue: Papers from 10-th International Conference on Electron Beam Technologies – EBT-2012. – 2012. – № 5–6. – P. 99–103.

6. 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.

7. 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. – С. 47–50.

8. Получение бездефектных швов при электронно-лучевой сварке / В.Я. Беленький, В.М. Язовских, Л.Н. Кротов, Д.Н. Трушников // Наука – производству. – 2000. – № 5. – С. 42.

Получено 3.09.2012

**Саломатова Екатерина Сергеевна** – старший преподаватель, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: weld-katy@mail.ru).

**Беленький Владимир Яковлевич** – профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru).

**Трушников Дмитрий Николаевич** – доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: trdimitr@yandex.ru).

**Ольшанская Татьяна Васильевна** – доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tvo66@rambler.ru).

**Salomatova Ekaterina Sergeevna** – Senior Lecturer, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: weldkaty@mail.ru)

**Belenkiy Vladimir Ykovlevich** – Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru).

**Trushnikov Dmitriy Nikolaevich** – Assistant Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: trdimitr@yandex.ru).

**Olshanskaya Tatayna Vasilevna** – Assistant Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: tvo66@rambler.ru).