

УДК 621.791

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗВЕРТКИ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА НА ФОРМУ ШВА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛОКАЛЬНЫХ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 30ХГСА**

*А. П. СЛИВА, А. Ю. МАРЧЕНКОВ, Д. А. ЖГУТ, А. А. ПАНЬКИНА, В. М. МАТЮНИН*

Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Москва, Россия

UDC 621.791

## **INFLUENCE OF ELECTRON BEAM OSCILLATION PARAMETERS ON WELD SHAPE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 30KHGSA WELD LOCAL ZONES**

*A. P. SLIVA, A. YU. MARCHENKOV, D. A. ZHGUT, A. A. PANKINA, V. M. MATIUNIN*

**Аннотация.** В работе приводятся исследования влияния амплитуды и частоты развертки электронного луча типа «пила» на форму проплавления и механические свойства сварных швов из высокопрочной стали 30ХГСА. Показано, что развертка существенно влияет на формирование сварного шва и ее применение позволяет получать качественные сварные соединения со сквозным проплавлением без использования корневых подкладок. Установлено влияние развертки на механические свойства, в частности, получены сварные швы с повышенной пластичностью металла.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, механические свойства, кинетическое индентирование, сталь 30ХГСА, развертка электронного луча.

**Abstract.** The paper presents studies concerning the influence of the amplitude and frequency of the «saw» type electron beam oscillation on the penetration shape and the mechanical properties of welds made of high-strength steel 30KhGSA. It is shown that the oscillation significantly affects the formation of the weld and its use makes it possible to obtain high-quality welded joints with through penetration and without the use of root back-up plate. The effect on mechanical properties has also been established by obtaining welded joints with increased metal ductility.

**Keywords:** electron beam welding, mechanical properties, instrumented indentation, 30KhGSA steel, electron beam oscillation.

**Введение.** При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) параметры развертки электронного луча оказывают сильное влияние на форму проплавления сварного шва. Это отражается не только на структурно-фазовом состоянии металла, но и на его физико-механических свойствах. В данном случае особый интерес представляет исследование развертки электронного луча типа «пила». Управляя параметрами развертки электронного луча, можно сформировать сварной шов с усилением в его вершине и получить необходимый уровень механических свойств металла. Однако прочностные и пластические характеристики металла в различных локальных зонах сварного соединения могут существенно различаться [1–4], что необходимо учитывать при анализе работоспособности сварного соединения [5–6]. Для количественной оценки этих механических характеристик целесообразно использовать кинетическое (инструментальное)

индентирование с регистрацией диаграмм вдавливания, что позволяет получать информацию о распределении механических свойств металла по всему сварному соединению, включая основной металл, зону термического влияния, металл шва. В настоящее время кинетическое индентирование успешно развивается, появляются новые нормативные документы, методики и приборы для регистрации и обработки диаграмм вдавливания [7–10].

В статье изложены результаты исследований влияния параметров развертки электронного луча (амплитуда развертки, частота развертки) типа «пила» на форму проплавления и механические свойства металла сварного соединения в различных локальных зонах, выявленных кинетическим индентированием с использованием методик, разработанных в НИУ «МЭИ» авторами статьи.

**Методики проведения исследований.** Исследование влияния параметров развертки электронного луча на формирование сварных швов проводили на пластинах из высокопрочной стали 30ХГСА толщиной 22 мм. ЭЛС проводилась на установке для электронно-лучевой сварки АЭЛТК-344-12 с ускоряющим напряжением 60 кВ с применением развертки типа «пила» (рис. 1) и гарантированным сквозным проплавлением.

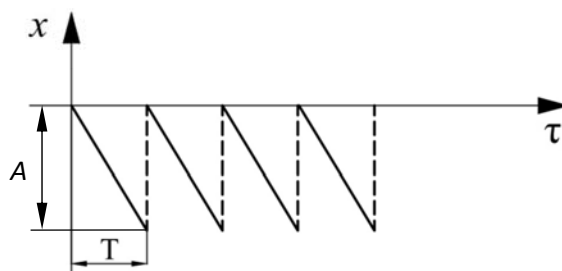


Рис. 1. Схема движения луча при развертке типа «пила» ( $T$  – период развертки,  $T = 1/f$ ;  $A$  – амплитуда развертки, мм;  $f$  – частота развертки;  $\tau$  – текущее время;  $x$  – ось вдоль направления перемещения луча)

Режимы сварки: ток луча  $I_n = 90$  мА; скорость сварки  $v_{св} = 15$  м/ч; ток «острой» фокусировки  $I_\phi = 757$  мА; рабочее расстояние  $L_{раб} = 150$  мм. Параметры развертки электронного луча сведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры разверток при сквозном проплавлении

| Номер шва | Амплитуда $A$ , мм | Частота $f$ , Гц | Средняя ширина шва $B_{ср}$ , мм | Усиление $\Delta F$ , мм <sup>2</sup> |
|-----------|--------------------|------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 0         | –                  | –                | 1,59                             | –2,36                                 |
| 1.1       | 1,2                | 25               | 1,98                             | –1,32                                 |
| 1.2       |                    | 31               | 2,03                             | 0,24                                  |
| 1.3       |                    | 37               | 2,34                             | –0,33                                 |
| 1.4       |                    | 44               | 2,11                             | –1,54                                 |
| 1.5       |                    | 50               | 1,57                             | –1,76                                 |
| 2.1       | 1,6                | 25               | 2,42                             | 3,40                                  |
| 2.2       |                    | 31               | 2,01                             | 1,16                                  |
| 2.3       |                    | 38               | 1,98                             | 0,15                                  |
| 2.4       |                    | 44               | 1,97                             | 3,96                                  |
| 2.5       |                    | 50               | 2,19                             | –0,31                                 |

Оценку формирования сварных швов выполняли по величине площади усиления  $F_y$  (или подреза  $F_n$ ) на лицевой поверхности. Если величина усиления  $\Delta F = F_y - F_n > 0$ , то такое формирование считается благоприятным (рис. 2, а).

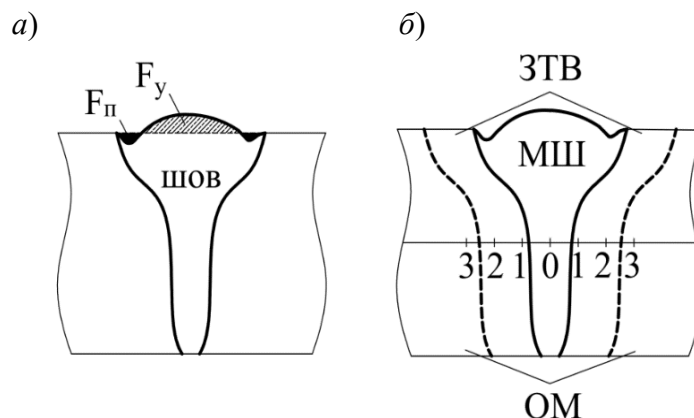


Рис. 2. Схема формирования сварного шва (а) и зон индентирования (б): ОМ – основной металл; ЗТВ – зона термического влияния; МШ – металл шва

Для оценки комплекса механических свойств металла в локальных зонах сварных соединений выполнено кинетическое индентирование на универсальной машине Instron 5982 в режиме сжатия с регистрацией диаграмм вдавливания: индентор сферический  $D = 2,5$  мм; скорость перемещения индентора – 0,5 мм/мин. Количественная оценка механических свойств выполнялась по методикам, основанным на связи кинетических диаграмм вдавливания «невосстановленная твердость по Бринеллю  $HB_t$  – относительная глубина невосстановленного отпечатка  $t/R$ » с диаграммами растяжения «напряжение  $\sigma$  – относительное удлинение  $\delta$ », разработанным в НИУ «МЭИ» [7].

**Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.** При ЭЛС с глубоким сквозным проплавлением металл сварочной ванны не удерживается силами поверхностного натяжения и значительный объем вытекает со стороны корня шва, в результате чего на поверхности шва образуются подрезы и занижения (рис. 3). Формирование таких дефектов характерно для многих способов сварки со сквозным проплавлением, когда объем сварочной ванны значителен. Для предотвращения вытекания металла из канала проплавления используют корневые подкладки либо увеличивают скорость сварки [11], если это возможно. Кроме того, перспективным способом является применение развертки электронного луча типа «пила», которая влияет на гидродинамические процессы и интенсифицирует перенос металла в хвостовую часть сварочной ванны. Эффективность такого способа показана на сплаве на основе алюминия АМг6 [12] и подтверждена математическим моделированием на стали 30ХГСА [13].

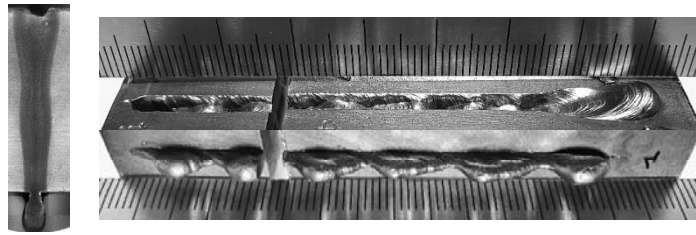


Рис. 3. Внешний вид поверхности и корня сварного шва без развертки электронного луча

При использовании такого метода формирование шва существенно зависит от амплитуды и частоты развертки. На рис. 4 приведены фотографии лицевой и корневой поверхности швов стали 30ХГСА для режимов развертки, указанных в табл. 1. Очевидно, что уже при частоте развертки 25 Гц для обеих амплитуд занижение в вершине шва и объем вытекающего со стороны корня металла существенно меньше, чем сварке без развертки (см. рис. 3). Вместе с тем наблюдается волнистость поверхности шва. На частоте 25 Гц расстояние между соседними горбами волн 10...15 мм для  $A = 1,2$  мм и 15...20 мм для  $A = 1,6$  мм.

| $f$ , Гц   | $A = 1,2$ мм<br>(1. ) | $A = 1,6$ мм<br>(2. ) |
|------------|-----------------------|-----------------------|
| 25<br>(.1) |                       |                       |
| 31<br>(.2) |                       |                       |
| 38<br>(.3) |                       |                       |
| 44<br>(.4) |                       |                       |
| 50<br>(.5) |                       |                       |

Рис. 4. Внешний вид сварных швов с поверхности и корня

С увеличением частоты характер формирования волнистости меняется. При  $f = 31$  Гц формирование шва стабильное и периодичности не выявляется, а объем вытекающего металла становится еще меньше. Также периодичность горбов сложно проследить на частотах 38 Гц, однако здесь формирование менее стабильно, и для  $A = 1,2$  мм объем вытекающего металла увеличивается, в то время как для  $A = 1,6$  мм продолжает сокращаться и имеет минимальное значение среди всех рассмотренных режимов развертки. При  $f = 44$  Гц восстанавливается четкая периодичность горбов, которая начинает совпадать с каплями металла, вытекающими с корня шва. При этом для  $A = 1,2$  мм горбы ниже, чем для  $A = 1,6$  мм, а объем вытекающего металла, соответственно, больше. На частоте развертки 50 Гц объем существенно увеличивается и формируется занижение в вершине шва для обеих амплитуд развертки.

Средняя ширина шва  $B_{ср}$  и усиление на лицевой поверхности  $\Delta F$  демонстрируют зависимость от частоты развертки (рис. 5).

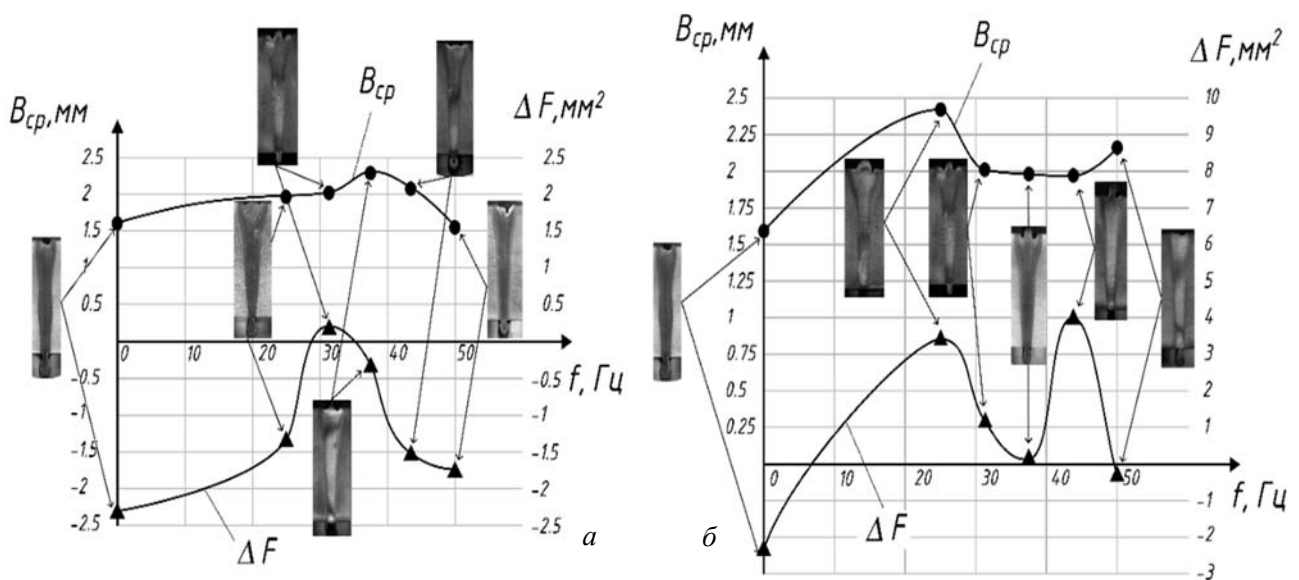


Рис. 5. Зависимости  $B_{ср}$  и  $\Delta F$  от частоты развертки  $f$  для амплитуды  $A$  1,2 мм (а) и 1,6 мм (б)

Максимум  $\Delta F$  для  $A = 1,2$  мм соответствует  $f = 31$  Гц, что подтверждается качественной оценкой объема вытекающего металла с корня шва. При сварке без развертки и при  $f = 50$  Гц площадь занижения максимальна и также соответствует наблюдаемому объему вытекающего металла с корня шва. Для  $A = 1,2$  мм на графиках наблюдается провал усиления  $\Delta F$  для частот  $f$ , равных 31 и 38 Гц, однако качественная оценка формирования поверхности и корня шва не подтверждает этой тенденции: в этой области частот должен быть максимум усиления. Такая зависимость, по-видимому, связана с неудачным расположением оцениваемых сечений – в начале сварного шва, поэтому требует уточнения.

Для всех сварных швов наблюдается в разной степени неравномерное распределение механических свойств в различных зонах сварных соединений (рис. 6). В металле шва предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и временное сопротивление  $\sigma_B$  резко увеличиваются для всех параметров развертки (достигает 1600 МПа). Одновременно понижается пластичность, характеризуемая относительным равномерным удлинением  $\delta_p$  до 2 %...3 % при режимах сварки без развертки. Это делает сварное соединение склонным к хрупкому разрушению, несмотря на высокую прочность металла шва. При этом сварные швы с разверткой электронного луча 1.3 и 2.4 имеют более высокие значения пластичности – около 4 % и 6 % соответственно и существенно меньшие значения  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$ .

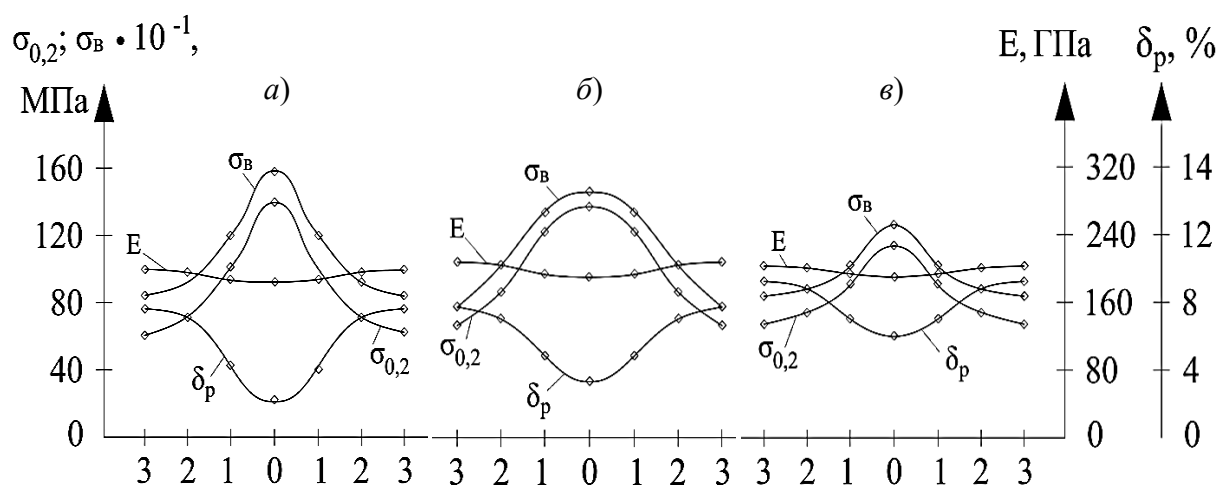


Рис. 6. Распределения механических свойств металла в контрольных точках сварных соединений, полученных ЭЛС на режимах 0 (а), 1.3 (б), 2.4 (в)

**Выводы.** Исследования влияния развертки электронного луча на формирование сварного шва из высокопрочной стали 30ХГСА показали, что, варьируя амплитуду и частоту развертки, можно изменять форму проплавления, ширину и усиление шва. Это дает возможность получать качественные сварные соединения без формирования дефектов типа занижений в вершине шва со сквозным проплавлением без применения корневых подкладок.

Установлено, что развертка луча типа «пила» с частотой 38 Гц и амплитудой 1,6 мм позволяет повысить относительное равномерное удлинение металла шва  $\delta_p$  до 6 %.

*Исследование проведено в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № FSWF-2020-0023.*

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effect of Electron Beam Welding on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy / S. Thakare [ et al.] // Proceedings of the 23rd IFHTSE Congress. – 2016. – P. 18–21.
2. **Dzioba, I.** The Material Properties of Different Zones of Joints Welded Using a Laser / I. Dzioba, T. Pala, R. Pała // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 874. – P. 3–8.
3. Investigation of the physical and mechanical properties in different zones of the welded nitrogen-containing austenitic steel under elastoplastic deformation / E. Putilova [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785, № 1. – P. 040051.
4. **Oktadinata, H.** Microstructure and hardness profile of dissimilar lap joint of type 304 stainless steel to SS400 carbon steel / H. Oktadinata, A. Ganda Putra // Metal Indonesia. – 2019. – Vol. 41, № 2. – P. 46–53.
5. Structure and properties of carbon steel to duplex stainless steel submerged arc welds / N. A. Pherson [et al.] // Materials science and technology. – 2003. – Vol. 19, № 2. – P. 219–226.
6. **Rekik, W.** Identification of the Weakest Metallurgical Zone on Fracture Behavior of an Undermatched Welded Joint / W. Rekik, O. Ancelet, C. Gardin // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 3491–3500.
7. **Матюнин, В. М.** Индентирование в диагностике механических свойств материалов / В. М. Матюнин. – Москва: МЭИ, 2015. – 288 с.
8. **Oliver, W. C.** Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of materials research. – 2004. – Vol. 19, № 1. – P. 3–20.
9. **Ogar, P.** Energy approach to determine mechanical properties of materials from the kinetic diagram of spherical indentation / P. Ogar, V. Kushnarev, I. Kobzova // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 19. – P. 2342–2346.
10. Evaluation of Young's modulus of construction materials by instrumented indentation using a ball indenter / V. M. Matyunin [et al.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. – Т. 87, № 8. – С. 64–68.
11. Влияние скорости сварки на свободное формирование шва при ЭЛС со сквозным проплавлением / Е. В. Терентьев [и др.] // Сварочное производство. – 2014. – № 2. – С. 25–29.
12. EBW of aluminium alloys with application of electron beam oscillation / A. P. Sliva [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1089 (1). – P. 012056.
13. Physical Understanding of Active Control of Beam Scanning in Preventing Top Concavity in Electron Beam Welding / M. Luo [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 2022. – Vol. 53 (9). – P. 3369–3380.

E-mail: slivaap@mpei.ru.