



ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ,
СИСТЕМЫ, МАТЕРИАЛЫ И ПРИБОРЫ

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES,
MATERIALS, SYSTEMS, AND INSTRUMENTS

Статья поступила в редакцию 16.11.15. Ред. рег. № 2411

The article has entered in publishing office 16.11.15. Ed. reg. No. 2411

УДК 621.791.72

doi: 10.15518/isjaee.2015.21.030

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.П. Слива, В.К. Драгунов

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
111250 Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
Тел.: +7(495)362-77-22, +7(495)362-79-69; e-mail: slivaap@mpei.ru, DragunovVK@mpei.ru,

Заключение совета рецензентов: 19.11.15 Заключение совета экспертов: 22.11.15 Принято к публикации: 25.11.15

В статье описывается способ электронно-лучевой сварки в магнитном поле горизонтальным пучком на подъем сварных соединений большой толщины со сквозным проплавлением, позволяющий повысить качество формирования сварных швов большой толщины без применения подкладок за счет создания канала проплавления криволинейной формы и перераспределения сил, действующих на жидкий металл сварочной ванны. Приводится методика проведения экспериментов по сварке в магнитном поле, а также практические режимы ЭЛС стали ANSI 316 L(N) толщиной 40 мм с оценкой качества формирования швов. Показано, что создание канала проплавления криволинейной формы способствует расширению диапазона технологических режимов сварки, в котором обеспечивается стабильное формирование сварных соединений.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, сварка на подъем, магнитное поле, канал проплавления, сварочная ванна, аустенитная сталь.

ELECTRON BEAM WELDING METHOD IN THE MAGNETIC FIELD

A.P. Sliva, V.K. Dragunov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI)
14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
Tel.: +7(495)362-77-22, +7 495 362 77 22; e-mail: slivaap@mpei.ru; DragunovVK@mpei.ru,

Referred: 19.11.15 Expertise: 22.11.15 Accepted: 25.11.15

The paper presents the method of uphill electron beam welding in magnetic field for thick parts joining with a through-penetration without usage of runoff blocks in the root. Moreover, it shows the possibility of high-quality weld obtaining without vacuum cavities by reducing the hydrostatic pressure forces applied to the molten metal in the weld pool and the increase of surface tension forces. Experiment technique and EBW conditions of 40-mm thick welds of AISI 316 L(N) steel with the assessment of their quality are described. It is experimentally approved that usage of the proposed EBW method with the formation of the curve shaped channel penetration enhances the range of process conditions providing a stable quality of welded joints.

Keywords: electron beam welding, uphill welding, magnetic field, channel penetration, weld pool, austenite steel.



Виктор Карпович
Драгунов
Viktor K. Dragunov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии металлов» НИУ «МЭИ».

Образование: МЭИ (1982).

Область научных интересов: технологии и оборудование для обработки материалов концентрированными потоками энергий, электронно-лучевая сварка.

Публикации: более 100.

Information about the author: Dr. Sci. (engineering), professor, head of the “Technology of metals” department.

Education: MPEI (1982).

Research area: technology and equipment for concentrated energy flows processing of materials, electron beam welding.

Publications: more than 100.



Андрей Петрович
Слива
Andrey P. Sliva

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии металлов» НИУ «МЭИ».

Образование: МЭИ (2004).

Область научных интересов: технологии и оборудование для обработки материалов концентрированными потоками энергий, электронно-лучевая сварка.

Публикации: 35.

Information about the author: associate professor of the “Technology of metals” department.

Education: MPEI (2004).

Research area: technology and equipment for concentrated energy flows processing of materials, electron beam welding.

Publications: 35.

Введение

Сварные соединения металлов больших толщин находят широкое применение в различных отраслях промышленности, особенно в энергетическом машиностроении, а в последнее время и в водородной энергетике [1]. Одним из наиболее перспективных методов получения таких соединений является однопроходная электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Качество сварного шва и возможное появление дефектов при ЭЛС металлов больших толщин связывают со спецификой формирования швов в различных пространственных положениях и особенностями конструкции соединений [2–5]. Для предотвращения вытекания сварочной ванны со стороны корня шва ЭЛС в нижнем положении осуществляют при несквозном проплавлении или с применением корневых подкладок. Использование ускоряющих напряжений до 120–150 кВ приводит к уменьшению объема жидкой фазы сварочной ванны, однако в этом случае узкий канал затрудняет дегазацию сварочной ванны, вероятность схлопывания парогазового канала увеличивается, что повышает вероятность образования дефектов типа несплавов, вакуумных полостей [2].

ЭЛС горизонтальных и вертикальных швов со свободным формированием имеет ряд преимуществ. Горизонтальное положение сварочной ванны позво-

ляет улучшить условия формирования сварного соединения и интенсифицировать процесс удаления газов и паров металла из канала проплавления [6, 7]. Однако в данном случае также существует вероятность схлопывания канала проплавления; может нарушаться стабильность формирования сварного соединения в результате экранировки канала жидкой фазой; при вытеснении большого количества жидкого металла в корне шва и на лицевой поверхности металл не удерживается силами поверхностного натяжения и выплескивается из сварочной ванны. Все это является причиной образования вакуумных полостей и подрезов.

Многочисленные эксперименты по ЭЛС горизонтальным пучком сталей, титановых сплавов, сплавов алюминия и магния выявили, что качественное свободное формирование шва со сквозным проплавлением осуществимо в узких диапазонах режимов, при отклонении от которых появляются дефекты [6]. При этом решающее влияние на качество сварного шва оказывают гидродинамические процессы, происходящие в канале проплавления при ЭЛС, которые определяют поведение жидкой фазы в сварочной ванне.

Целью данной работы является повышение качества сварных соединений металлов больших толщин за счет изменения условий формирования сварных швов на основе анализа гидродинамических процессов в канале проплавления.

Теоретический анализ

Для разработки мероприятий по повышению стабильности формирования сварных соединений необходимо провести анализ сил, действующих на жидкий металл сварочной ванны, и условий, при которых происходит вытекание металла из нее.

Рассмотрим эти силы на упрощенной модели (рис. 1), в которой сделаны следующие допущения: канал проплавления представляет собой горизонтальный цилиндр, радиусы кривизны сварочной ванны с лицевой и корневой стороны канала равны между собой, причем второй радиус кривизны бесконечно велик.

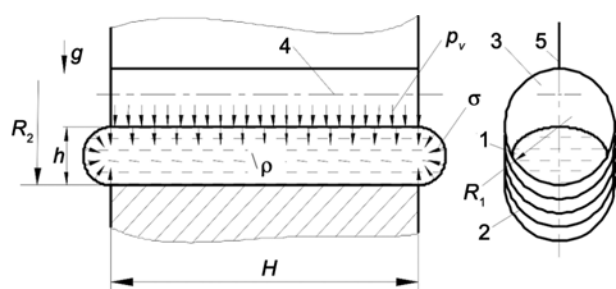


Рис. 1. Модель канала проплавления при ЭЛС горизонтальным пучком на подъем: 1 – сварочная ванна; 2 – сварной шов; 3 – пароголовый канал; 4 – ось пучка; 5 – стык
Fig. 1. Scheme for calculating the forces acting on the molten pool during uphill EBW: 1 – weld pool; 2 – weld; 3 – channel penetration; 4 – beam axis; 5 – joint

Рассмотрим равновесие жидкого металла сварочной ванны на границе канала проплавления. В этом случае на жидкий металл сварочной ванны действуют [8]: металлоstaticкое давление p_g , давление от сил поверхностного натяжения p_σ , давления реакции отдачи паров p_v . Суммарное давление, действующее на жидкий металл, запишем в виде [8]

$$p = p_\sigma - p_g - p_v = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \rho gh - p_v, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкого металла; g – ускорение свободного падения; h – глубина сварочной ванны, σ – коэффициент поверхностного натяжения, R_1, R_2 – радиусы кривизны канала проплавления.

Металлоstaticкое давление и давления реакции отдачи паров стремятся вытолкнуть расплав из канала, давление сил поверхностного натяжения удерживает сварочную ванну. Если $p \geq 0$, то расплав в канале проплавления удерживается и не происходит образования дефектов типа газовых полостей. Следовательно, для предотвращения образования дефектов необходимо уменьшать давления реакции отдачи паров и металлоstaticкое давление и увеличивать давление от сил поверхностного натяжения. Для последнего необходимо уменьшать главные радиусы кривизны поверхности канала и повышать

коэффициент поверхностного натяжения. Уменьшение радиуса канала R_1 может приводить к схлопыванию канала и повышению вероятности образования дефектов. Таким образом, наиболее приемлемым является изменение радиуса кривизны канала R_2 . Для этого электронный пучок должен входить в изделие под углом к горизонту и изменять направление движения в изделии, а канал проплавления должен иметь форму сегмента тора (рис. 2).

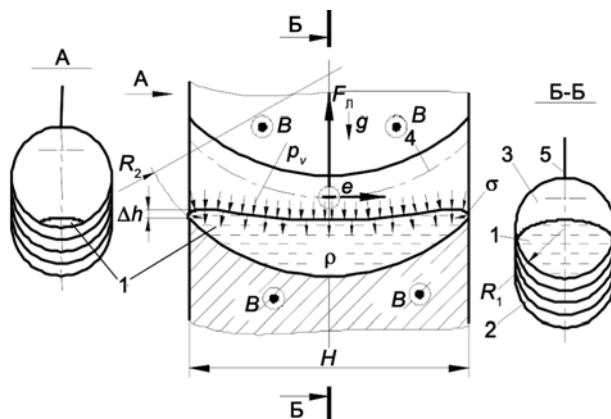


Рис. 2. Упрощенная модель канала проплавления при ЭЛС горизонтальным пучком на подъем в присутствии поперечного магнитного поля: 1 – сварочная ванна; 2 – сварной шов; 3 – пароголовый канал; 4 – ось пучка; 5 – стык
Fig. 2. Scheme forces acting on the molten pool during horizontal EBW in the magnetic field: 1 – weld pool; 2 – weld; 3 – channel penetration; 4 – beam axis; 5 – joint

В этом случае жидкий металл под действием сил тяжести будет стремиться к центру канала и значение металлоstaticкого давления можно снизить до величины, которой можно пренебречь, тогда (1) приобретает вид

$$p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - p_v. \quad (2)$$

Изменение траектории электронного пучка в канале проплавления возможно за счет создания в области действия электронного пучка поперечного локального магнитного поля [9]. Для его создания может использоваться магнитное поле рассеяния от ферромагнитного сердечника соленоида; магнитное поле от электрических токов, проходящих вдоль задней поверхности свариваемых изделий; магнитное поле в образце, который является элементом сердечника соленоида. Применимость того или иного способа зависит от конструкции свариваемых изделий и магнитных свойств материалов.

Методика эксперимента

Экспериментальные исследования влияния формы траектории электронного пучка и параметров режима сварки на формирование сварных соедине-

ний проводили на образцах из стали ANSI 316L(N) 40 мм на установке с энергетическим комплексом ЭЛА 60/60. Для создания криволинейной траектории электронов пучка использовали магнитное поле рассеяния от ферромагнитного сердечника соленоидов. Электронно-лучевую пушку устанавливали под углом к горизонту $\alpha = 10, 20, 30^\circ$ и располагали на расстоянии 400 мм от свариваемых образцов (рис. 3).

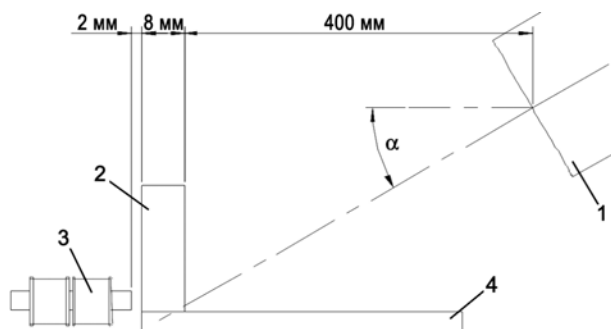


Рис. 3. Схема проведения экспериментов по сварке электронным пучком в магнитном поле:
1 – электронно-лучевая пушка; 2 – свариваемые детали;
3 – соленоид с ферромагнитным сердечником; 4 – стол
Fig. 3. The scheme of experiments on electron beam welding in a magnetic field:
1 – electron beam gun; 2 – welded parts;
3 – solenoid with a ferromagnetic core; 4 – the table

Сварку проводили со скоростью 10, 16, 20, 25 м/ч, при этом для каждой скорости, угла наклона пушки и силы тока в соленоиде подбирали такие значения силы тока фокусировки и силы тока пучка, которые позволяли получать гарантированное сквозное проплавление.

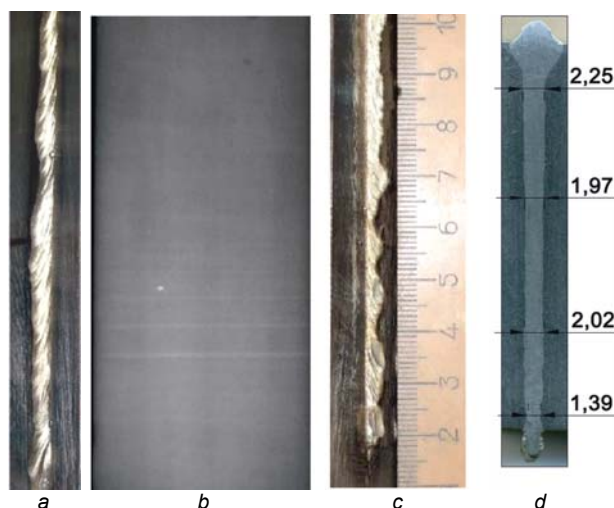


Рис. 4. Образец толщиной 40 мм из стали ANSI 316L(N):
а – внешний вид; б – рентгеновский снимок;
с – вид со стороны корня шва; д – макрошлиф
Fig. 4. The sample of weld 40 mm thick steel ANSI 316L(N):
а – face; б – an X-ray image;
с – as seen from the root of the weld; д – macrosection

В ходе экспериментов установили, что при углах наклона пушки 20 и 30° стабильное формирование сварных швов с минимальным количеством вытекающего из сварочной ванны металла наблюдается при скоростях сварки 10 и 16 м/ч. В данных условиях при индукции магнитного поля, соответствующей силе тока в соленоиде 1,0–1,4 А, достигается оптимальная форма сварочной ванны, которая способствует удержанию жидкого металла в канале проплавления (рис. 4).

При скорости выше 20 м/ч не удастся добиться качественного формирования сварного шва, при этом наблюдается либо интенсивное разбрызгивание жидкого металла из канала проплавления, либо выплески металла из канала с лицевой стороны шва. При сварке без наклона пушки и без магнитного поля на различных скоростях 10, 16, 20 м/ч наблюдается большое количество вытекшего металла из сварочной ванны.

Оценка результатов

Для оценки качества сварных швов проводили рентгенографический контроль сварных соединений и изготавливали макрошлифы, по которым определяли следующие параметры: площади поперечного сечения швов $S_{ш}$, среднюю ширину шва $B_{ср} = S_{ш}/H$, погонную энергию, наличие дефектов, их площадь и долю дефектов в процентах $\psi = S_d / (L_{ш} H) 100\%$, где S_d – площадь дефектов; $L_{ш}$ – длина шва.

Для комплексной оценки влияния параметров режима сварки на формирование швов построили зависимость относительной площади дефектов от угла наклона пушки и погонной энергии (рис. 5).

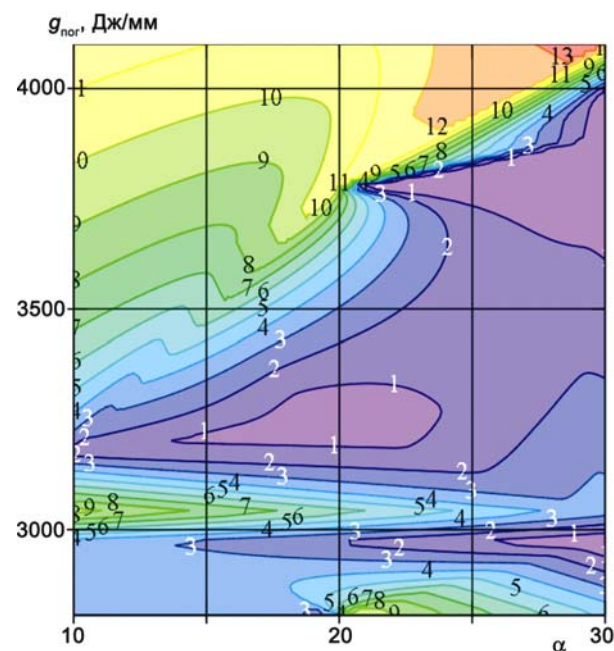


Рис. 5. Зависимость относительной площади дефектов ψ , %, от погонной энергии и угла наклона пушки
Fig. 5. Dependence of the relative area of the defects on the heat input and the angle of the gun

В результате установили, что с увеличением угла наклона пушки расширяется диапазон изменения погонной энергии, в котором наблюдается минимальная площадь дефектов. Например, при угле наклона 10° этот диапазон очень узок и составляет 3150–3200 кДж/м; при угле 20° – 3100–3500 кДж/м; при угле 30° – 2900–4000 кДж/м.

Выводы

Установлено, что при ЭЛС на подъем в поперечном магнитном поле сварочная ванна находится в равновесии, когда давление в парогазовом канале равно давлению от сил поверхностного натяжения, при этом гидростатическое давление не влияет на стабильность формирования сварных соединений. С

увеличением угла наклона пушки и кривизны канала проплавления расширяется диапазон изменения погонной энергии, в котором наблюдается стабильное бездефектное формирование швов за счет значительного снижения гидростатического давления на жидкий металл сварочной ванны и увеличения поверхностного натяжения.

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Соглашения от 28 ноября 2014 г. № 14.577.21.0148.

Уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (проекта): RFMEFI57714X0148.

Список литературы

1. Чертов В.М., Глезер А.М., Татарников О.В., Сарбаев Б.С. Экономичность и безопасность в одном баллоне // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. 2004. № 10. С. 5-7.
2. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. Электронно-лучевая сварка. Киев: Наукова думка, 1987.
3. Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Киев: «Экотехнология», 2004.
4. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978.
5. Wei P.S., Chao T.C. Prediction of pore size in high power density beam welding // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. No. 79. P. 223-232.
6. Хохловский А.С., Мартынов В.Н., Ястребов М.М., Грабар А.В., Хисматулин Н.И. Электронно-лучевая сварка – перспективная технология изготовления конструкций // Тематический обзор. 1991. № 5. С. 24.
7. Лесков Г.И., Живага Л.И. Формирование швов при ЭЛС стальных большой толщины в различных пространственных положениях // Автоматическая сварка. 1980. № 10. С. 1-5.
8. Мартынов В.Н. Разработка технологии электронно-лучевой сварки горизонтальным пучком крупногабаритных корпусных деталей из сталей и титановых сплавов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1988.
9. Патент 2298465 RU C1, МПК B23K 15/00 B23K 28/02. Способ сварки / Голубчик Р.М., Драгунов В.К., Слива А.П., Самолетов А.И. (РФ); МЭИ (РФ); 2005133499/02 // Бюл. 2007. № 13.

References

1. Čertov V.M., Glezer A.M., Tatarnikov O.V., Sarbaev B.S. Èkonomičnost' i bezopasnost' v odnom bal-lone // Meždunarodnyj naučnyj žurnal «Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ» (ISJAE) 2004. № 10. S. 5-7.
2. Nazarenko O.K., Kajdalov A.A., Kovbasenko S.N. i dr. Èlektronno-lučevaâ svarka. Kiev: Naukova dumka, 1987.
3. Kajdalov A.A. Èlektronno-lučevaâ svarka i smežnye tehnologii. Kiev: «Èkotehnologiâ», 2004.
4. Rykalin N.N., Zuev I.V., Uglov A.A. Osnovy èlek-tronno-lučevoj obrabotki materialov. M.: Mašino-stroenie, 1978.
5. Wei P.S., Chao T.C. Prediction of pore size in high power density beam welding // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. No. 79. P. 223-232.
6. Hohlovskij A.S., Martynov V.N., Åstrebov M.M., Grabar A.V., Hismatulin N.I. Èlektronno-lučevaâ svarka – perspektivnaâ tehnologiâ izgotovleniâ konstrukcij // Tematičeskij obzor. 1991. № 5. S. 24.
7. Leskov G.I., Živaga L.I. Formirovanie švov pri ÈLS staley bol'šoj tolšiny v različnyh prostranstvennyh položeniâh // Avtomatičeskaâ svarka. 1980. № 10. S. 1-5.
8. Martynov V.N. Razrabotka tehnologii èlektronno-lučevoj svarki gorizont'al'nym pučkom krupnoga-baritnyh korpusnyh detalej iz staley i titanovyh splavov: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. M., 1988.
9. Patent 2298465 RU S1, MPK V23K 15/00 V23K 28/02. Sposob svarki / Golubčik R.M., Dragunov V.K., Sliva A.P., Samoletov A.I. (RF); MÈI (RF); 2005133499/02 // Bùl. 2007. № 13.

Транслитерация по ISO 9:1995

