

ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ МАРОК 10X9МФБА И 10X12М

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, Л. А. КРАВЧУК, Ю. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, А. А. БОНДАРЕВ
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследовано влияние как режимов электронно-лучевой сварки жаропрочных сталей 10X12М и 10X9МФБА толщиной $\delta_m = 30$ мм без предварительного подогрева, так и пространственного расположения электронного пучка относительно свариваемой детали на формирование сварных швов и склонность к образованию трещин. Установлено, что при электронно-лучевой сварке указанных жаропрочных сталей без предварительного подогрева устранение трещин и протяженных полостей достигается при скорости сварки не более 3 мм/с. Воспроизводимость качественных швов и формирование узких и глубоких швов с параллельными стенками литой зоны возможно путем применения технологических разверток электронного пучка по кругу и эллиптической траектории, а также расположения фокуса электронного пучка на уровне 2/3 толщины образца. При разработке технологии электронно-лучевой сварки жаропрочных сталей может быть рекомендован к применению неразрушающий метод ультразвукового контроля. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, жаропрочные стали, электронный пучок, схема сварки, погонная энергия, скорость сварки, фокусировка, дефекты, срединные трещины, лицевой и обратный валики шва

При изготовлении таких ответственных узлов в энергомашиностроении, как корпуса барабанов, паропроводы, диафрагмы, роторы, диски, лопатки турбин и других высоконагруженных деталей, широко применяются жаропрочные стали мартенситно-ферритного класса. Относясь к категории ограниченно свариваемых сталей, они требуют обязательного подогрева при дуговой сварке, так как склонны к подкалке с образованием мартенситных структур и трещин, а также последующего отпуска после нее. Оптимальные свойства эти стали получают в результате двойной термообработки: нормализация + отпуск или закалка + отпуск и на сварку поступают обычно после окончательной термообработки.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС), термический цикл которой из-за низкого значения погонной энергии отличается высокими скоростями нагрева и охлаждения, а также малым временем нахождения металла при высоких температурах, начинает занимать прочные позиции в энергомашиностроении. По сравнению с дуговой сваркой при ЭЛС уменьшаются размеры околошовной зоны и зоны термического влияния, а также сдерживается развитие структурных изменений и деформаций, что позволяет повысить механические характеристики сварных соединений. Использование вакуума при ЭЛС идеально защищает расплавленный металл от взаимодействия с окружающей средой, что способствует повышению качества сварных соединений.

В настоящей работе исследовано влияние режимов ЭЛС жаропрочных сталей марок 10X12М и 10X9МФБА толщиной $\delta_m = 30$ мм без предварительного подогрева, а также пространственного расположения электронного пучка относительно свариваемой детали на формирование сварных швов и их склонность к образованию трещин. Необходимо отметить, что исследуемые стали (таблица) для получения умеренных уровней прочности основного металла поступали на сварку в различных термических состояниях:

— сплав 10X9МФБА подвергали процедуре нормализации + отпуск; при нормализации образцы нагревались до температуры 1040...1095 °С, затем следовала выдержка 72 мин и последующее охлаждение на воздухе; при отпуске образцы нагревались до температуры 770±10 °С, затем следовала выдержка 72 мин и последующее охлаждение на воздухе;

— сплав 10X12М подвергали процедуре закалки + отпуск; при закалке образцы нагревались до температуры 1050 °С с последующим охлаждением в масле; при отпуске образцы нагревались до температуры 720 °С с последующим охлаждением на воздухе.

Сварку образцов выполняли на установке УЛ-209М с энергетическим агрегатом ЭЛА-60/30, в состав которого входит электронная пушка с металлическим катодом и короткофокусной оптикой с током электронного пучка $I_{п} = 0...500$ мА. Склонность к образованию трещин определяли на



Химические составы исследуемых жаропрочных сталей, мас. %*

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Nb	Cu	Ni	Прочие
10X9МФБА	0,07...0,13	0,15...0,55	0,27...0,63	7,90...9,60	—	0,80...1,10	0,16...0,27	0,05...0,11	≤ 0,25	≤ 0,43	S Г 0,010 P ≤ 0,020
10X12М	0,1...0,15	≤ 0,50	Г 0,60	11,5...13,0	—	0,30...0,60	—	—	Г 0,30	0,30...0,60	S ≤ 0,030 P ≤ 0,030

* Дополнительные исследования по спектральному анализу выявили газы, мас. %: у сплава 10X9МФБА [O₂] ≤ 0,0037; [N₂] ≤ 0,0386; [H₂] ≤ 0,0009, а у сплава 10X12М — [O₂] ≤ 0,0033; [N₂] ≤ 0,0310; [H₂] ≤ 0,0008.

стыковых образцах размером 200×100 мм толщиной $\delta_M = 30$ мм. Контроль фокусировки электронного пучка на поверхности образца производили по четкости изображения на мониторе системы наблюдения «РАСТР» [1] и параллельно по яркости свечения круговой развертки пучка диаметром $d_{\text{круг}} = 5$ мм с током пучка $I_{\text{п}} \cong 10$ мА на медной массивной пластине. Узкие глубокие швы с параллельными стенками литой зоны получали путем заглупления фокуса электронного пучка в глубь образца, а также разверткой пучка по кругу или эллипсу, что обеспечивало угол сходимости пучка $\leq 5 \cdot 10^{-2}$ рад при рабочем расстоянии от нижнего торца электронной пушки до образца $l_{\text{раб}} = 200 \dots 250$ мм [2, 3]. Наличие дефектов формирования сварного соединения выявляли неразрушающим методом ультразвукового контроля и последующими металлографическими исследованиями. Все образцы исследуемых жаропрочных сталей для устранения остаточной намагниченности подвергали дополнительному размагничиванию на специальном стенде и поступали на сварку с уровнем намагниченности не более 0,5 Гс.

Вначале с целью получения гарантированного формирования сварного шва на исследуемых жаропрочных сталях толщиной $\delta_M = 30$ мм были выполнены сквозные проплавления по сплошному металлу по схеме в нижнем положении (вертикальный электронный пучок) при перемещении электронной пушки вдоль координаты X–X или Y–Y. В результате при изменении в широком диапазоне тока пучка $I_{\text{п}}$, тока фокусировки $I_{\text{ф}}$ и скорости сварки $v_{\text{св}}$ не удавалось сформировать бездефектный сварной шов: на лицевом валике образовывались нерегулярные занижения и подрезы шва, на обратном валике — волнообразное нерегулярное провисание металла шва.

Для исключения дефектов формирования сварного шва при сквозном проплавлении образцов толщиной $\delta_M = 30$ мм по схеме в нижнем положении была применена технологическая подкладка из свариваемого материала толщиной 8 мм. Значение тока пучка $I_{\text{п}}$ подбирали таким образом, чтобы в процессе сварки на технологической подкладке получить отдельные точечные проплавления (проколы). Как показали результаты сквозных

проплавлений, при сварке с технологической подкладкой лицевой валик на обеих исследуемых сталях формируется регулярно, без занижений и подрезов.

Склонность жаропрочных сталей 10X12М и 10X9МФБА к образованию трещин исследовали, выполнив ряд сквозных проплавлений по сплошному металлу толщиной $\delta_M = 30$ мм, по схеме в нижнем положении с технологической подкладкой при скоростях сварки 3, 6, 9, 12 мм/с. Режим проплавления образцов для обеих исследуемых сталей на каждой выбранной скорости сварки $v_{\text{св}}$ не изменяли. Ток фокусировки $I_{\text{ф}}$ устанавливали таким образом, чтобы фокус электронного пучка находился ниже поверхности образца на уровне 2/3 толщины образца; для данного случая значение недофокусировки электронного пучка от значения тока фокусировки на поверхности образца соответствует $-\Delta I_{\text{ф}} = 15$ мА. При рабочем расстоянии $l_{\text{раб}} = 200$ мм технологическая развертка электронного пучка по кругу частотой $f_{\text{вр}} = 500$ Гц составила $d_{\text{круг}} = 1,5$ мм.

Ультразвуковой контроль и металлографические исследования сварных соединений на образцах толщиной $\delta_M = 30$ мм показали, что жаропрочная сталь 10X12М не склонна к образованию трещин при скорости сварки в диапазоне $v_{\text{св}} = 3 \dots 6$ мм/с; лишь при $v_{\text{св}} = 9$ и 12 мм/с примерно на половине глубины проплавления обнаружен макродефект в виде срединной трещины длиной около 3 мм и шириной 0,05 мм. Как видно из рис. 1, по мере повышения скорости сварки конфигурация сварного шва изменяется: ширина лицевого валика шва уменьшается, поперечное сечение из конического приближается к цилиндрическому. Лицевой валик шва на всех скоростях сварки формируется с превышением, подрезы по краям шва отсутствуют. Обнаруженная срединная трещина приведенных выше размеров была выявлена неразрушающим методом ультразвукового контроля.

В отличие от жаропрочной стали 10X12М совсем другие результаты по склонности к образованию трещин получены при ЭЛС образцов стали 10X9МФБА толщиной $\delta_M = 30$ мм по схеме в нижнем положении с технологической подкладкой. Как показали металлографические исследо-

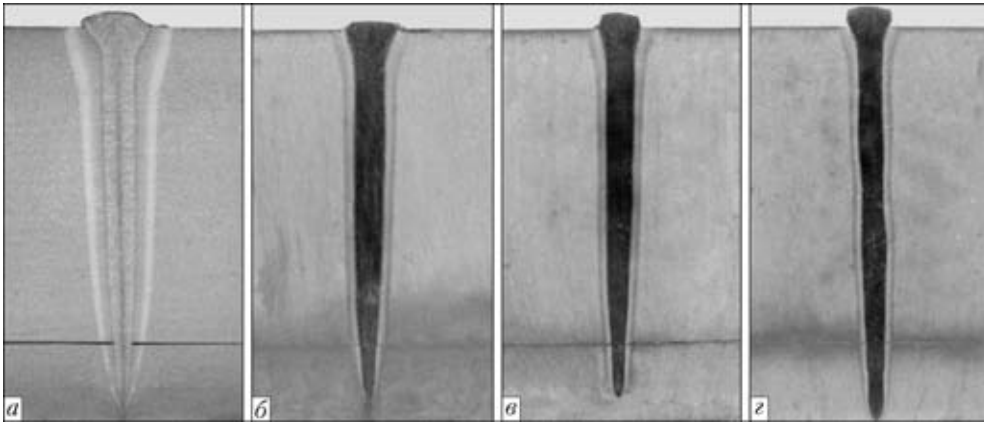


Рис. 1. Макроструктура ($\times 1,5$) сварных соединений сплава 10X12M толщиной $\delta_M = 30$ мм в нижнем положении ($U_{\text{вск}} = 60$ кВ, $I_{\text{ф}} = 630$ мА, $-\Delta I_{\text{ф}} = 15$ мА, $d_{\text{круг}} = 1,5$ мм, $l_{\text{раб}} = 200$ мм): а — $v_{\text{св}} = 3$ мм/с, $I_{\text{п}} = 128$ мА; б — $v_{\text{св}} = 6$ мм/с, $I_{\text{п}} = 184$ мА; в — $v_{\text{св}} = 9$ мм/с, $I_{\text{п}} = 236$ мА; з — $v_{\text{св}} = 12$ мм/с, $I_{\text{п}} = 310$ мА

вания сварных соединений, трещины отсутствуют на скорости сварки $v_{\text{св}} = 3$ мм/с (рис. 2, а); на скорости сварки $v_{\text{св}} = 6, 9$ и 12 мм/с обнаружены дефекты в виде срединных трещин, распространяющихся вертикально по оси шва от усиления к корню (рис. 2, б–з). Геометрические размеры срединных трещин в верхней и корневой части шва практически аналогичны дефектам на стали 10X12M.

Таким образом, на основании полученных результатов по сквозному проплавлению образцов толщиной $\delta_M = 30$ мм можно заключить, что с повышением скорости сварки возрастает склонность к образованию трещин на исследуемых жаропрочных сталях 10X9МФБА и 10X12M, а это в свою очередь подтверждает объяснение, что с увеличением скорости сварки происходит повышение как сварочных напряжений, так и темпа нарастания внутренних деформаций при сварке. Иными словами, при увеличении скорости сварки происходит более быстрая кристаллизация металла шва, что приводит к повышению темпа нарастания деформаций [4, 5]. Поэтому с большой достоверностью можно рекомендовать для практического

применения при ЭЛС жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА толщиной $\delta_M = 30$ мм скорость сварки не более $v_{\text{св}} = 3$ мм/с.

По результатам сквозных проплавлений образцов жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА толщиной $\delta_M = 30$ мм по схеме в нижнем положении с технологической подкладкой (рис. 1, 2) были построены зависимости погонной энергии при ЭЛС и ширины лицевого валика шва от скорости сварки. Как показано на рис. 3, при увеличении скорости сварки в диапазоне $v_{\text{св}} = 3 \dots 12$ мм/с значения погонной энергии q/v и ширины лицевого валика шва B уменьшаются нелинейно по гиперболическому закону $(1/v_{\text{св}})^{1/3}$: $q/v = 2,56$ кДж/мм и $B = 5,8$ мм при $v_{\text{св}} = 3$ мм/с до $q/v = 1,55$ кДж/мм и $B = 3,5$ мм при $v_{\text{св}} = 12$ мм/с, т. е. в 1,66 раза. При скорости сварки $v_{\text{св}} = 6$ мм/с значение погонной энергии составило 1,84 кДж/мм, а ширина лицевого валика шва — $B = 4,5$ мм.

Можно отказаться от технологических подкладок, обеспечив бездефектное формирование сварного шва при сквозном проплавлении, при переходе на схему ЭЛС горизонтальным электронным пучком и перемещении электронной пушки в гори-

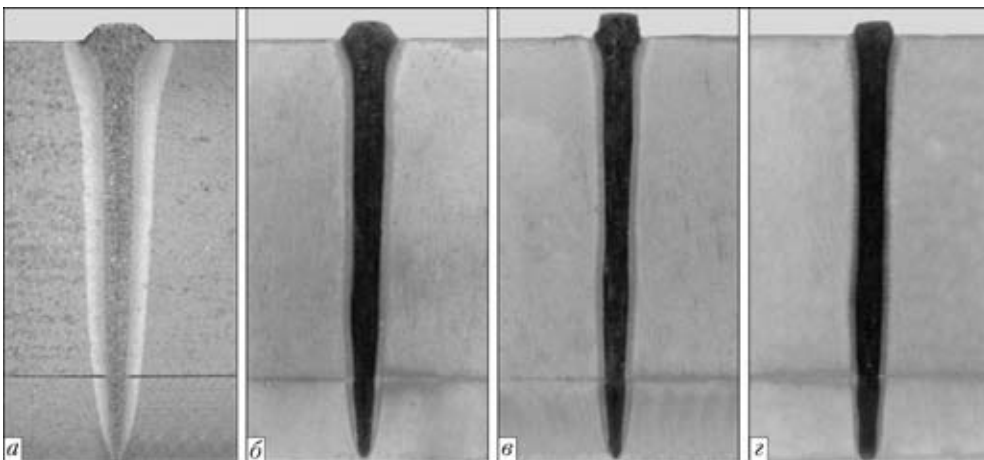


Рис. 2. Макроструктура ($\times 1,5$) сварных соединений сплава 10X9МФБА толщиной $\delta_M = 30$ мм в нижнем положении ($U_{\text{вск}} = 60$ кВ, $I_{\text{ф}} = 630$ мА, $-\Delta I_{\text{ф}} = 15$ мА, $d_{\text{круг}} = 1,5$ мм, $l_{\text{раб}} = 200$ мм): а — $v_{\text{св}} = 3$ мм/с, $I_{\text{п}} = 128$ мА; б — $v_{\text{св}} = 6$ мм/с, $I_{\text{п}} = 184$ мА; в — $v_{\text{св}} = 9$ мм/с, $I_{\text{п}} = 236$ мА; з — $v_{\text{св}} = 12$ мм/с, $I_{\text{п}} = 310$ мА

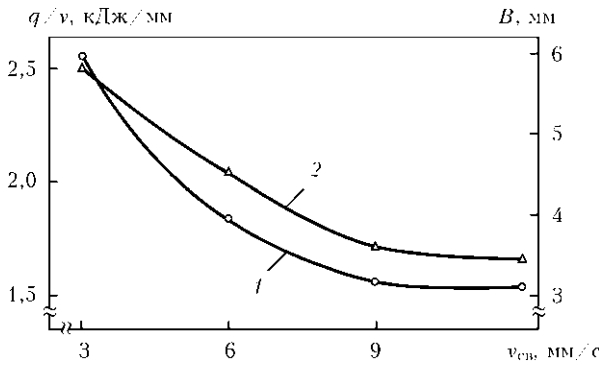


Рис. 3. Зависимость погонной энергии (1) и ширины лицевого валика шва (2) от скорости сварки жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА толщиной $\delta_M = 30$ мм в нижнем положении при $U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $-\Delta I_{\phi} = 15$ мА, $d_{\text{круг}} = 1,5$ мм, $l_{\text{раб}} = 200$ мм

горизонтальной плоскости по координате X-X или Y-Y. Этот прием оказался наиболее надежным и эффективным, позволяющим исключить корневые дефекты, свести к минимуму угловые деформации, уменьшить вероятность образования пор и протяженных полостей благодаря улучшению условий дегазации металла сварочной ванны.

Первые сквозные проплавления образцов жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА толщиной $\delta_M = 30$ мм горизонтальным электронным пучком

показали, что направление силы тяжести жидкого металла сварочной ванны не существенно влияет на выбор мощности электронного пучка по сравнению с аналогичными режимами сварки в нижнем положении. В связи с этим и с учетом рекомендаций [6] были выполнены сквозные проплавления образцов исследуемых жаропрочных сталей толщиной 30 мм с гарантированным формированием лицевого и обратного валиков шва при различных положениях фокуса электронного пучка относительно поверхности образца. Как показано на рис. 4 и 5, лицевые и обратные валики швов на обеих жаропрочных сталях формируются стабильно и регулярно без занижений и вытекания металла шва во всем диапазоне недофокусировки $-\Delta I_{\phi} = 13...25$ мА (фокус электронного пучка заглублен внутрь образца), подрезов и видимых дефектов не наблюдается. Следует отметить, что при сварке жаропрочной стали 10X12M имеет место сильное разбрызгивание металла шва с лицевой стороны в отличие от жаропрочной стали 10X9МФБА, где процесс ЭЛС идет значительно спокойнее.

По результатам сквозных проплавлений образцов жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА толщиной $\delta_M = 30$ мм горизонтальным электрон-

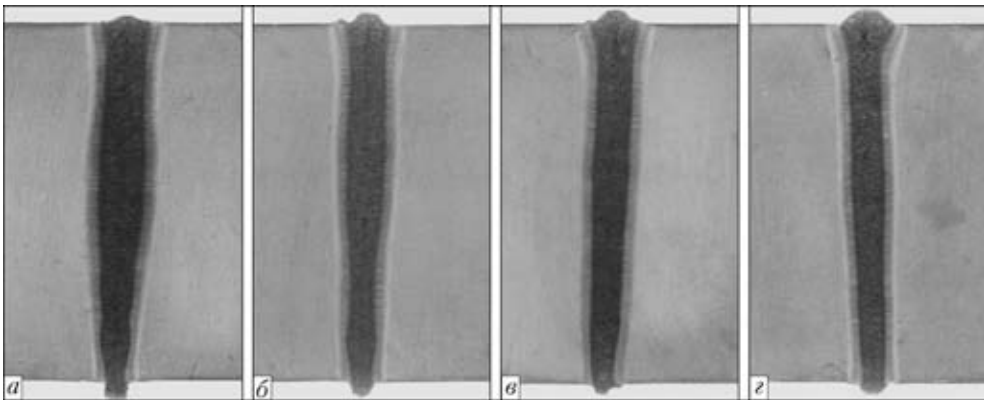


Рис. 4. Макроструктура ($\times 2$) сварных соединений сплава 10X12M толщиной $\delta_M = 30$ мм при сварке горизонтальным пучком ($U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $I_{\text{п}} = 198$ мА, $v_{\text{св}} = 61$ мм/с, $d_{\text{круг}} = 1,5$ мм/с, $l_{\text{раб}} = 200$ мм): а-г — соответственно $-\Delta I_{\phi} = 25, 21, 17, 13$ мА

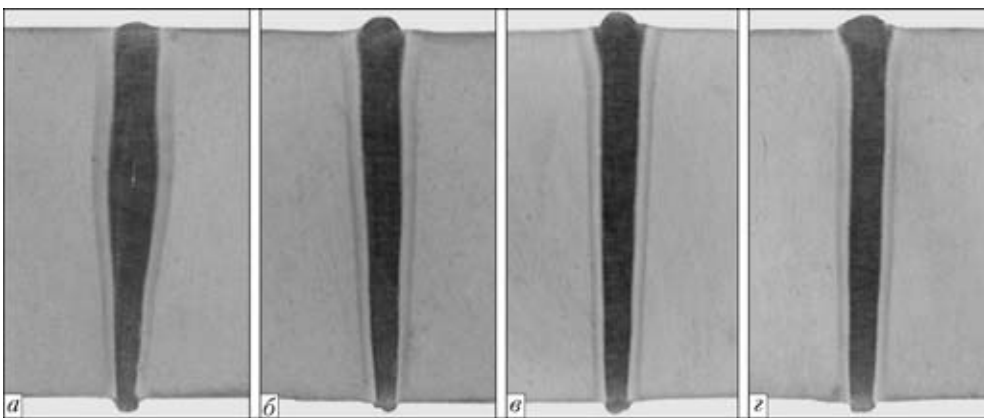


Рис. 5. Макроструктура ($\times 2$) сварных соединений сплава 10X9МФБА толщиной $\delta_M = 30$ мм при сварке горизонтальным пучком ($U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $I_{\text{п}} = 198$ мА, $v_{\text{св}} = 6$ мм/с, $d_{\text{круг}} = 1,5$ мм/с, $l_{\text{раб}} = 200$ мм): а-г — соответственно $-\Delta I_{\phi} = 25, 21, 17, 13$ мА

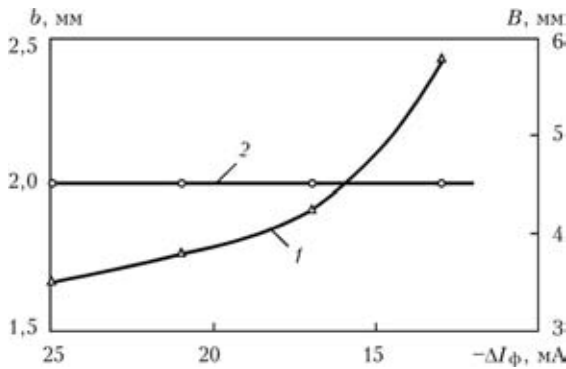


Рис. 6. Зависимость ширины лицевого (1) и обратного (2) валиков шва от заглупления фокуса электронного пучка при ЭЛС горизонтальным пучком жаростойких сталей 10X12M и 10X9МФБА толщиной $\delta_m = 30$ мм ($U_{\text{вск}} = 60$ кВ, $I_{\text{п}} = 198$ мА, $v_{\text{св}} = 6$ мм/с, $d_{\text{круг}} = 1,5$ мм, $l_{\text{раб}} = 200$ мм)

ным пучком и на основе анализа поперечных макрошлифов сварных соединений, приведенных на рис. 4, 5, были построены зависимости ширины лицевого и обратного валиков от заглупления фокуса электронного пучка внутрь образца $-\Delta I_{\phi}$ при $q/v = 1,98$ кДж/мм. Как показано на рис. 6, ширина обратного валика шва во всем диапазоне $-\Delta I_{\phi} = 13...25$ мА остается практически постоянной и составляет $b \cong 2$ мм, в то время как ширина лицевого валика шва с увеличением заглупления фокуса электронного пучка внутрь образца уменьшается нелинейно: до $-\Delta I_{\phi} = 17$ мА идет резкое уменьшение B , затем до $-\Delta I_{\phi} = 25$ мА уменьшение параметра B замедляется.

Металлографические исследования, проведенные на сварных соединениях жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА толщиной $\delta_m = 30$ мм при ЭЛС горизонтальным электронным пучком, позволили установить, что положение фокуса пучка относительно поверхности образца влияет не только на форму сварного шва, но и может привести к образованию трещин. Как показано на рис. 4, а и 5, а, при большом заглуплении фокуса электронного пучка в глубь образца в области половины глубины проплавления на обеих жаропрочных сталях образуются локальные уширения шва и срединные трещины в них длиной до

10 мм. С уменьшением тока недофокусировки $-\Delta I_{\phi}$ локальные уширения шва устраняются, а при $-\Delta I_{\phi} = (13...17)$ мА форма шва из конической приближается к цилиндрической.

Выводы

1. Формирование швов со сквозным проплавлением жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА толщиной $\delta_m = 30$ мм достигается при переходе на схему ЭЛС горизонтальным электронным пучком и перемещением электронной пушки в горизонтальной плоскости.

2. При ЭЛС жаропрочных сталей 10X12M и 10X9МФБА толщиной $\delta_m = 30$ мм без предварительного подогрева устранение трещин достигается при скорости сварки не более 3 мм/с.

3. Применение технологических разверток электронного пучка по круговой и эллиптической траектории и расположение фокуса электронного пучка на уровне 2/3 толщины образца обеспечивает воспроизводимость качественных швов, а также формирование узких и глубоких швов с параллельными стенками литой зоны.

1. *Наблюдение* процесса электронно-лучевой сварки и автоматическое слежение за стыком / О. К. Назаренко, В. И. Шаповал, Г. А. Лоскутов и др. // Автомат. сварка. 1993. — № 5. — С. 35–38.
2. *Sayegh G.* State of the art of high energy density beam welding: Houdremont lecture. — Tokyo: IW, 1986. — 41 p.
3. *Fritz D.* Electron beam welding of today // II Междунар. конф. по электронно-лучевым технологиям «ЭЛТ-88», Варна, 31 мая – 4 июня 1988 г. — Варна, 1988. — С. 1048–1063.
4. *Морочко В. П., Сорокин Л. И., Зорин Н. Я.* Влияние режима электронно-лучевой сварки на форму шва и свойства сварных соединений жаропрочных сплавов толщиной 10...15 мм // Свароч. пр-во. — 1975. — № 6. — С. 32–36.
5. *Effects of welding parameters and prevention of defects in deep penetration EBW of heavy section steel* / T. Shida, H. Kita, H. Okamura, Y. Kawada. — S.l., S.a. — (Intern. Inst. of Welding; IW-IV-239–78).
6. *Исследование заглупления фокуса луча в образцах из титана на стабильность формирования шва при ЭЛС* / В. Р. Петренко, Н. А. Ольшанский, А. П. Лопатко, Г. С. Расплетин // Докл. II Всесоюз. конф. «Актуальные проблемы сварки цветных металлов». — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 223–226.

Поступила в редакцию 25.03.2013