



# ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ОДИНАРНЫМ И ДВОЙНЫМ ПРЕЛОМЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Л. А. КРАВЧУК, В. И. ЗАГОРНИКОВ, кандидаты техн. наук, И. А. КУЛЕШОВ, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены выбор энергетических и временных параметров электронного пучка при электронно-лучевой сварке труб с трубными досками теплообменных аппаратов из титана и возможность получения кольцевого шва путем одинарного и двойного преломления, а также вращения электронного пучка по стыку с помощью отклоняющей системы. Приведены схема сварки в общем вакууме и режимы, обеспечивающие формирование углового шва без уменьшения проходного сечения трубки диаметром до 40 мм, включая случай, когда трубки выступают над уровнем трубной доски.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, электронный пучок, теплообменный аппарат, труба и трубная доска, схема сварки, одинарное и двойное преломление, отклоняющая система, круговая и локальная развертка

В настоящее время промышленное применение нашли два принципиально различных технологических процесса электронно-лучевой сварки труб с трубными досками. Отличие между ними заключается в различной пространственно-временной ориентации электронного пучка относительно плоскости трубной доски [1, 2]. В случае одинарного преломления электронного пучка и вращения его по стыку с помощью отклоняющей системы относительно неподвижного изделия (рис. 1, а) имеет место зависимость между глубиной проплавления  $h_{пр}$ , расстоянием от плоскости фокусировки луча до изделия  $f_{л}$ , диаметром трубки  $D_{тр}$  и уходом преломленного пучка в корне шва от стыка трубка–трубная доска  $\Delta k$ :

$$\Delta k = \frac{D_{тр} h_{пр}}{2 f_{л}}$$

Из данной зависимости видно, что уход преломленного электронного пучка в корне шва от стыка трубка–трубная доска возрастает с увеличением значений  $D_{тр}$  и  $h_{пр}$  и уменьшается с возрастанием  $f_{л}$ . Выбрав фокусное расстояние  $f_{л} = 150$  мм и глубину проплавления  $h_{пр} = 3,5$  мм, получим данные об изменении ухода корня шва от стыка: при  $D_{тр} = 8$  мм  $\Delta k \approx 0,09$  мм, при  $D_{тр} = 16$  мм  $\Delta k \approx 0,18$  мм, при  $D_{тр} = 24$  мм  $\Delta k \approx 0,28$  мм.

При электронно-лучевой сварке трубок с толщиной стенки  $\delta = 1,0 \dots 1,5$  мм с трубными досками по схеме с одинарным преломлением электронного пучка (рис. 1, а) для обеспечения соотношения  $h_{пр}/\delta \geq 2$  необходимо уменьшать диаметр круговой развертки пучка  $d_{круг}$  с помощью отклоняющей системы на  $2\Delta k$ , чтобы совместить корень шва со стыком трубка–трубная доска. Этот технологический прием может привести к затеканию металла кольцевого сварного шва внутрь

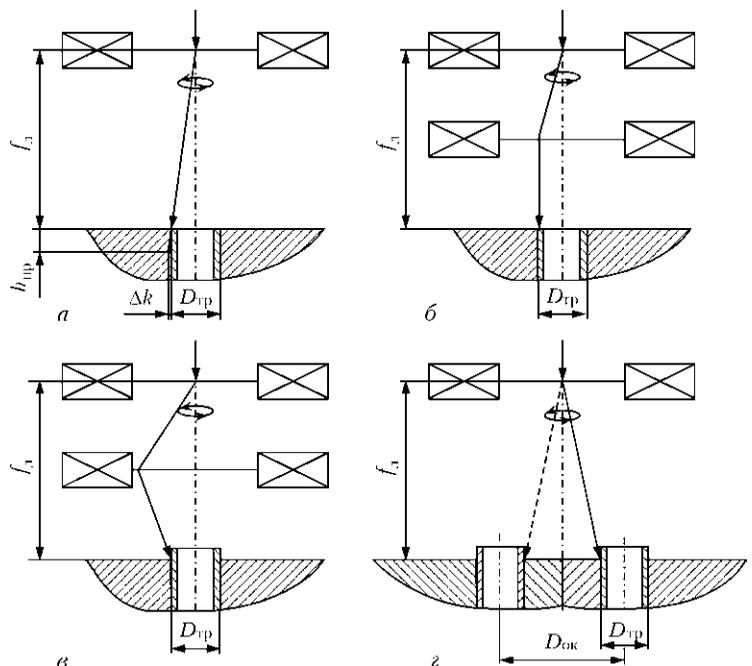


Рис. 1. Схема электронно-лучевой сварки трубок с трубными досками: а — одинарное преломление электронного пучка и вращения его по стыку; б — двойное преломление электронного пучка и вращения его по стыку перпендикулярно поверхности трубной доски; в — двойное преломление электронного пучка и вращения его по стыку при выступающих над поверхностью доски трубках; г — вращение электронного пучка с одинарным преломлением и одновременное перемещение его по координатам  $x$  и  $y$  по диаметру окружности  $D_{ок}$  смещенной трубки



трубки и уменьшению ее проходного сечения при эксплуатации теплообменных аппаратов недопустимо. Устранить наплыв металла внутрь трубки представляется возможным путем применения прецизионных электронно-лучевых пушек с ускоряющим напряжением  $U_{\text{уск}} = 60$  кВ и импульсного режима сварки [3], а также ограничения значения диаметра трубки  $D_{\text{тр}} \leq 8$  мм. Необходимо отметить, что точность попадания электронного пучка по кольцевому стыку трубка–трубная доска при однократном преломлении и вращении с помощью электромагнитной отклоняющей системы составила не более 0,05 мм.

При электронно-лучевой сварке трубок с трубными досками с двойным преломлением электронного пучка и вращением его с помощью отклоняющей системы перпендикулярно поверхности трубной доски (см. рис. 1, б) представляется возможность исключить  $\Delta k$  и устранить наплыв металла кольцевого сварного шва внутрь трубки диаметром  $D_{\text{тр}} > 8$  мм. Преимуществом этого технологического приема является защита ускоряющего промежутка электронно-лучевой пушки анод–катод от пробоев в процессе сварки.

Приведенная на рис. 1, в схема электронно-лучевой сварки трубок с трубными досками с двойным преломлением электронного пучка и вращением его относительно неподвижного изделия с помощью отклоняющей системы позволяет выполнять сварку трубок, выступающих над поверхностью трубной доски. После повторного преломления электронный пучок направляется на стык трубка–трубная доска под углом к поверхности трубной доски, но уже со смещением в ее сторону.

Проплавление сплошных образцов и сварку кольцевых стыков трубка–трубная доска соответственно из титановых сплавов ПТ-7М и ПТ-3В с двойным преломлением электронного пучка осуществляли на лабораторной установке с электронно-лучевой пушкой ЭЛА-60/15 и сферической оптикой Роговского [4], применение которой позволило существенно уменьшить влияние тока пучка на положение фокуса электронного пучка. В качестве отклоняющей системы применяли две пары совмещенных отклоняющих катушек, расположенных соосно одна под другой на расстоянии 100 мм. При внутреннем диаметре отверстия в катушках, равном 63 мм, суммарная высота отклоняющей системы составила 170 мм (рис. 2).

Контроль фокусировки электронного пучка на поверхности плоских образцов и трубной доски при двойном преломлении проверяли визуально по яркости свечения круговой развертки диаметром  $d_{\text{круг}} = 8$  мм с током электронного пучка  $I_{\text{п}} = 10$  мА на медной массивной пластине, расположенной ниже поверхности трубной доски на  $2/3$  глубины проплавления  $h_{\text{пр}}$ . Такой технологи-



Рис. 2. Внешний вид отклоняющей системы с двойным преломлением электронного пучка, установленной на электронно-лучевой пушке ЭЛА-60/15

ческий прием позволил получить на соединениях трубки из сплава ПТ-3В с толщиной стенки  $\delta = 1,5$  мм с трубной доской из сплава ПТ-7М отношение  $h_{\text{пр}}/\delta = 4$  без наплывов металла кольцевого сварного шва внутрь трубки.

Для исследования погонной энергии электронного пучка и ширины лицевого валика шва на сварных соединениях трубка–трубная доска проведена серия проплавлений электронным пучком с двойным преломлением на сплошных образцах из титанового сплава ПТ-3В при скорости сварки  $v_{\text{св}} = 5 \dots 25$  мм/с. При этом глубину проплавления удерживали постоянной на уровне  $h_{\text{пр}} = 7,5$  мм путем изменения тока пучка. Как показано на рис. 3, погонная энергия  $q/v_{\text{св}}$  и ширина лицевого валика шва  $B_1$  с увеличением скорости сварки резко уменьшаются, а начиная с  $v_{\text{св}} = 15$  мм/с практически стабилизируются. Минимальная ширина шва достигает  $B_1 = 1,85$  мм. Таким образом, в дальнейших исследованиях выбор скорости сварки соединений трубка–трубная доска осуществляют из условия  $v_{\text{св}} \geq 15$  мм/с. Необходимо отметить, что точность попадания электронного пучка по кольцевому стыку при двойном преломлении и вращении с помощью двух электромагнитных отклоняющих систем была не хуже, чем при однократном преломлении, и составила не более 0,05 мм.

При схеме сварки с двойным преломлением электронного пучка (см. рис. 1, б), когда после отклоняющей системы пучок направлен перпендикулярно поверхности трубной доски (параллельный перенос), необходимо исследовать влияние двойного преломления пучка на геометрию проплавления, а главным образом — на глубину проплавления  $h_{\text{пр}}$  и ширину лицевого валика шва  $B_1$ . Для решения этой задачи выполнена серия проплавлений на сплошном образце из титанового сплава ПТ-3В при диаметре круговой развертки

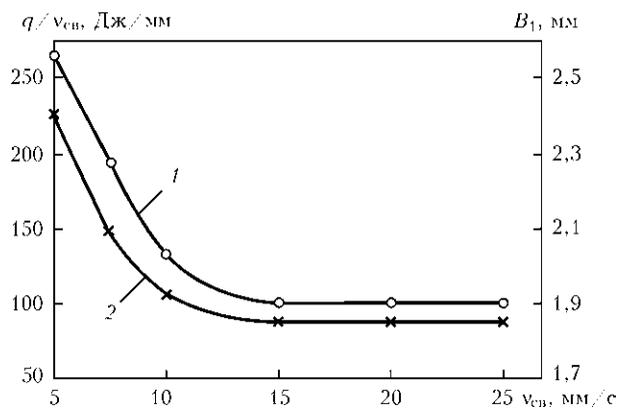


Рис. 3. Зависимость погонной энергии  $q/v_{sw}$  электронного пучка (1) и ширины лицевого валика шва  $B_1$  (2) от скорости сварки  $v_{sw}$  на режиме сварки:  $h_{пр} = 7,5 \text{ мм}$ ;  $U_{уск} = 60 \text{ кВ}$ ;  $I_{\phi} = 560 \text{ мА}$ ;  $d_{круг} = 10 \text{ мм}$ ;  $f_{л} = 200 \text{ мм}$

электронного пучка в плоскости трубной доски  $d_{круг} = 10...40 \text{ мм}$ . На поперечных шлифах проплавления (рис. 4) видно, что геометрия швов ( $h_{пр}$ ,  $B_1$ ), выполненных без преломления электронного пучка ( $d_{круг} = 0$ ) и с двойным преломлением ( $d_{круг} = 40 \text{ мм}$ ), практически не отличается. Можно сделать вывод, что схема электронно-лучевой сварки с двойным преломлением электронного пучка может быть рекомендована для промышленного применения при сварке трубок с трубными досками и диаметре трубки до 40 мм включительно.

При электронно-лучевой сварке с одинарным и двойным преломлением электронного пучка получение сварных соединений трубка–трубная доска с минимальными (около 5 %) колебаниями глубины проплавления по длине шва достигается введением круговой локальной развертки со скоростью, превышающей скорость сварки [5]. Поперечные размеры корневой части шва в основном определяются диаметром круговой локальной развертки электронного пучка  $d_{лок}$ . Необходимо отметить, что этот технологический прием позволяет снизить требования к точности совмещения круговой развертки электронного пучка  $d_{круг}$  с кольцевым стыком до  $\pm 0,15 \text{ мм}$ . Серия проплавлений, выполненных на сплошном образце из титанового сплава ПТ-3В при изменении диаметра локальной развертки электронного пучка в диапазоне  $d_{лок} = 0...1,25 \text{ мм}$  с частотой локального вращения  $f_{лок} = 1000 \text{ Гц}$ , позволила установить изменение геометрических параметров шва ( $h_{пр}$ ,  $B_1$ ,  $B_{ср}$ ) и возможность выбора диаметра локальной развертки  $d_{лок}$  по ширине лицевого валика шва  $B_1$  и ширине средней части шва на половине глубины проплавления  $B_{ср}$ . Как показано на рис. 5, при диаметре локальной развертки  $d_{лок} = 0,5 \text{ мм}$  можно получить швы с шириной лицевого валика  $B_1 = 2 \text{ мм}$  и соотношением  $h_{пр}/\delta > 3$  при толщине стенки трубки  $\delta = 1,5 \text{ мм}$ . При этом затекание ме-

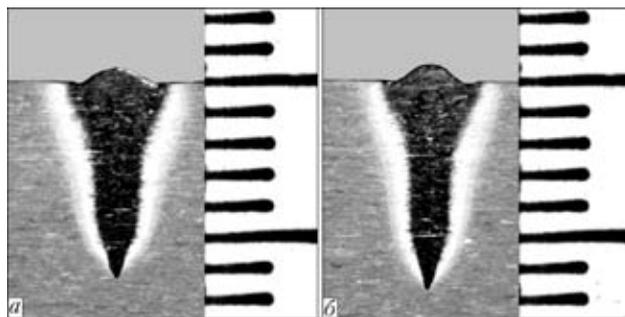


Рис. 4. Поперечные шлифы ( $\times 7$ ) проплавления на титановом сплаве ПТ-3В, полученные электронно-лучевой сваркой электронным пучком без преломления ( $d_{круг} = 0 \text{ мм}$ ) (а) и с двойным преломлением ( $d_{круг} = 40 \text{ мм}$ ) (б) на следующем режиме:  $U_{уск} = 60 \text{ кВ}$ ;  $I_{\pi} = 25 \text{ мА}$ ;  $v_{sw} = 15 \text{ мм/с}$ ;  $f_{л} = 200 \text{ мм}$

талла кольцевого сварного шва внутрь трубки исключается.

Влияние положения фокуса электронного пучка относительно поверхности трубной доски на глубину проплавления  $h_{пр}$  и ширину лицевого валика шва  $B_1$  с двойным преломлением пучка исследовали путем проведения серии проплавлений на титановом сплаве ПТ-3В при изменении тока фокусирующей линзы  $I_{\phi}$  от оптимального значения в меньшую и большую сторону примерно на 3 %. Оптимальное значение  $I_{\phi}$  обеспечивает максимальную глубину проплавления  $h_{пр}$  и минимальную ширину лицевого валика шва  $B_1$ . Как показано на рис. 6, максимальная глубина проплавления  $h_{пр} = 7,8 \text{ мм}$  соответствует току фокусировки  $I_{\phi} = 560 \text{ мА}$  и расположению фокуса электронного пучка ниже поверхности образца на 2/3 глубины проплавления. Введение круговой локальной развертки  $d_{лок} = 0,5 \text{ мм}$  приводит к уменьшению глубины проплавления в 1,47 раза при сохранении ширины лицевого валика  $B_1$ . Изменение значения тока фокусирующей линзы от оптимального на 0,9 % ( $\Delta I_{\phi} = 5 \text{ мА}$ ) приводит к уменьшению глубины проплавления на 0,6 ( $d_{лок} = 0$ ) и на 0,2 мм ( $d_{лок} = 0,5 \text{ мм}$ ). Таким образом, введение круговой локальной развертки электрон-

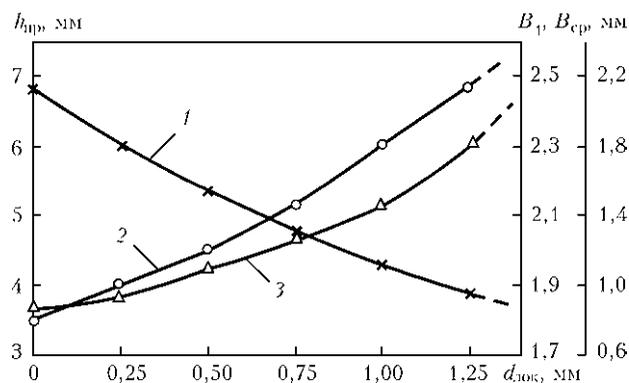


Рис. 5. Зависимость глубины проплавления  $h_{пр}$  (1), ширины лицевого валика шва  $B_1$  (2) и ширины средней части шва на половине глубины проплавления  $B_{ср}$  (3) от диаметра локальной развертки электронного пучка при  $U_{уск} = 60 \text{ кВ}$ ;  $I_{\pi} = 30 \text{ мА}$ ;  $v_{sw} = 15 \text{ мм/с}$ ;  $I_{\phi} = 560 \text{ мА}$ ;  $f_{л} = 200 \text{ мм}$ ;  $d_{круг} = 10 \text{ мм}$

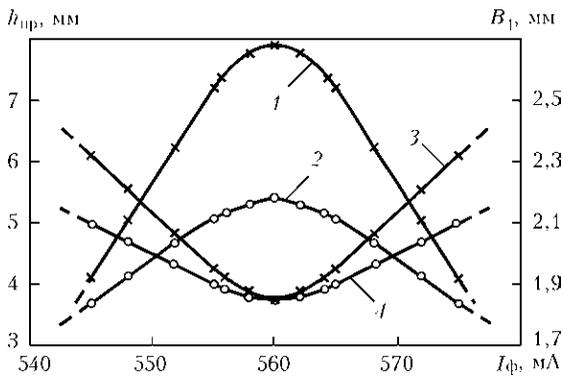


Рис. 6. Зависимость глубины проплавления  $h_{тр}$  (1, 2) и ширины лицевого валика шва  $B_1$  (3, 4) при  $d_{лок} = 0$  (1, 3) и 0,5 мм (2, 4) от тока фокусирующей линзы  $I_f$  при  $U_{уск} = 60$  кВ;  $I_{п} = 30$  мА;  $v_{св} = 15$  мм/с;  $f_{л} = 200$  мм;  $d_{круг} = 10$  мм

ного пучка позволяет существенно уменьшить зависимость глубины проплавления от тока фокусирующей линзы. Кроме того, как видно на поперечных шлифах проплавления (рис. 7), при электронно-лучевой сварке соединений трубка-трубная доска с двойным преломлением электронного пучка и круговой локальной разверткой имеет место увеличение поперечных размеров средней и корневой части шва примерно на значение  $d_{лок} = 0,5$  мм.

Электронно-лучевая сварка соединений трубка-трубная доска теплообменных аппаратов может быть выполнена в случае, если трубка диа-

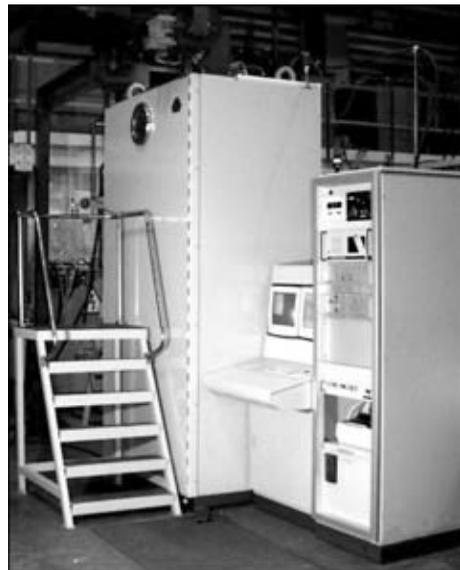


Рис. 8. Внешний вид специализированной установки УЛ-178М для электронно-лучевой сварки труб с трубными досками

метром  $D_{тр} \geq 40$  мм выступает над поверхностью трубной доски. Для осуществления этой операции необходимо электронный пучок после первого преломления отклонить таким образом, чтобы в плоскости повторного преломления он разворачивался в круг диаметром  $d_{круг} > D_{тр}$ . После повторного преломления с помощью отклоняющей системы электронный пучок направляется под углом к оси трубки (см. рис. 1, в). Попадание корня

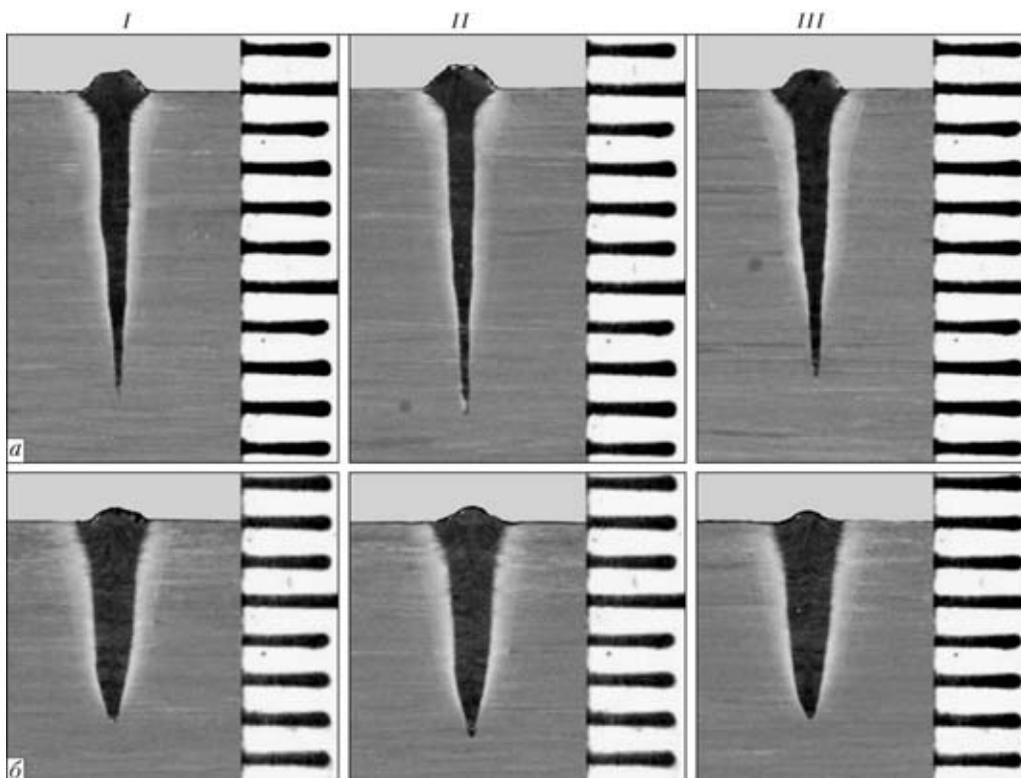


Рис. 7. Поперечные шлифы ( $\times 5$ ) проплавления на титановом сплаве ПТ-3В, полученные электронно-лучевой сваркой с двойным преломлением электронного пучка без локальной развертки ( $d_{лок} = 0$ ) (а) и с круговой локальной разверткой ( $d_{лок} = 0,5$  мм) (б) при  $I_f = 558$  (I), 560 (II) и 562 мА (III) на следующем режиме:  $U_{уск} = 60$  кВ;  $I_{п} = 30$  мА;  $v_{св} = 15$  мм/с;  $d_{круг} = 10$  мм;  $f_{л} = 200$  мм

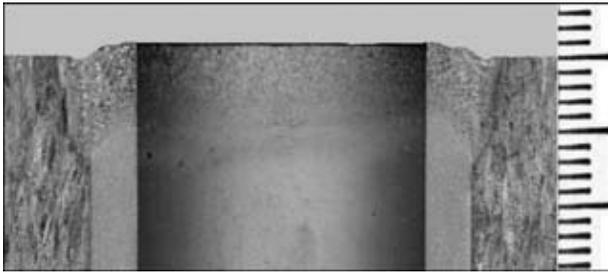


Рис. 9. Макрошлиф ( $\times 3$ ) сварного соединения выступающей трубки ( $D_{\text{тп}} = 27$  мм с толщиной стенки  $\delta = 3$  мм) с трубной доской, полученного электронным пучком с одинарным преломлением и перемещением трубки по координатам  $x$  и  $y$  по диаметру ее окружности, на следующем режиме сварки:  $U_{\text{уск}} = 60$  кВ;  $I_{\text{п}} = 30$  мА;  $v_{\text{св}} = 15$  мм/с;  $f_{\text{л}} = 200$  мм

шва на стыке трубка–трубная доска обеспечивается путем смещения электронного пучка в сторону трубной доски.

В случае, когда трубка выступает над поверхностью трубной доски, можно применить схему сварки, при которой смещенная относительно оси пушки трубка на расстояние  $(D_{\text{тр}}/2 + \Delta k)$  перемещается по координатам  $x$  и  $y$  по диаметру окружности  $D_{\text{ок}}$  с одновременным вращением электронного пучка с одинарным преломлением для попадания по стыку трубка–трубная доска (см. рис. 1,  $\varepsilon$ ). Такая схема сварки реализована на специализированной установке УЛ-178М (рис. 8), разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона. Двухуровневая многопроцессорная автоматизированная система управления CNC+PLC позволяет перемещать по программе теплообменный аппарат внутри вакуумной камеры по координатам  $x$  и  $y$  и управлять мощностью, фокусировкой и отклонением электронного пучка. Как показано на рис. 9, при электронно-лучевой сварке трубки диаметром  $D_{\text{тр}} = 27$  мм с толщиной стенки 3 мм из сплава ПТ-7М с трубной доской из сплава ПТ-3В для совмещения корня шва со стыком трубка–трубная доска угол отклонения электронного пучка от вертикальной оси составил  $4^{\circ}30'$ , а его смещение в сторону трубной доски —  $\Delta k = 0,3$  мм.

The paper deals with selection of energy and time parameters of the electron beam in electron beam welding of tubes to tubesheets of heat exchangers from titanium and possibility of producing a circumferential weld by single and double refraction and electron beam rotation around the butt by the deflecting system. Given is the schematic of welding in general vacuum and modes ensuring weld formation without reducing the flow area of a tube of up to 40 mm diameter, including the case with tube protrusion above the tubesheet level.

## Выводы

1. Электронно-лучевая сварка соединений трубка–трубная доска из титановых сплавов с двойным преломлением электронного пучка и вращением по стыку с помощью отклоняющей системы при неподвижном изделии обеспечивает формирование сварного шва без изменения геометрии проплавления до диаметра трубки  $D_{\text{тр}} = 40$  мм включительно.

2. Минимальные значения погонной энергии электронного пучка и ширины лицевого валика шва обеспечиваются при скорости сварки  $v_{\text{св}} \geq 15$  мм/с.

3. Применение круговой локальной развертки электронного пучка при двойном преломлении позволяет уменьшить колебания глубины проплавления по длине шва, увеличить поперечные размеры средней и корневой его части и уменьшить зависимость глубины проплавления от тока фокусирующей линзы.

4. Двойное преломление электронного пучка и вращение его по стыку трубка–трубная доска с помощью отклоняющей системы при неподвижном положении изделия позволяет выполнять электронно-лучевую сварку в случае, если трубка выступает над поверхностью трубной доски.

5. При таком положении трубки электронно-лучевую сварку можно осуществить путем программно перемещения трубки по координатам  $x$  и  $y$  по окружности с одновременным вращением отклоненного электронного пучка по стыку.

1. *Goussain J. C., Penven Y.* Essais d'application industrielle du soudage par F.E. pour l'assemblage des tubes sur plaques tubulaires // Soudage et techniques connexes. — 1979. — № 1/2. — С. 29–42.
2. *Трунов Е. Н.* Требования к оборудованию для электронно-лучевой сварки теплообменных аппаратов // Автомат. сварка. — 1981. — № 10. — С. 58–60.
3. *Кравчук Л. А.* Импульсная электронно-лучевая сварка трубок с трубными досками из титана // Там же. — 1978. — № 6. — С. 53–56.
4. *Lawrence G. S.* Some improvements in beam quality for high voltage beam welders // Electron and ion beam science and technology: 5th Intern. conf., Houston, Texas, 1972. — P. 354–371.
5. *Кравчук Л. А., Изумнов В. П.* Электронно-лучевая сварка тонкостенных труб малого диаметра с трубными досками // Автомат. сварка. — 1988. — № 8. — С. 50–52, 60.

Поступила в редакцию 08.07.2010