

## ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС ПРИ КОСМЕТИЧЕСКОМ ЗАГЛАЖИВАНИИ И РЕМОНТЕ ОБРАТНЫХ ВАЛИКОВ ШВА ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ

Л. А. КРАВЧУК, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены аппаратурные и технологические решения для косметического заглаживания и ремонта линейных обратных валиков шва длиной до 1200 мм внутри неповоротных протяженных трубчатых изделий прямоугольной формы с помощью системы преломления электронного пучка на  $90^\circ$ . Применительно к титановому сплаву VT20 получены параметры электронно-лучевого заглаживания, обеспечивающие формирование плавного перехода от основного металла к шву, гладкую поверхность расплавленного металла и исключение подрезов глубиной до 0,15 мм.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, сквозное проплавление, обратный валик шва, подрезы, электронный пучок, поворотная система, протяженные трубчатые изделия, рабочее расстояние, фокусировка, глубина и ширина проплавления, кратер

При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) со сквозным проплавлением неповоротных и поворотных стыков протяженных трубчатых изделий круглой, квадратной и прямоугольной формы в ряде случаев внутренняя поверхность является рабочей. Выполнить косметический проход или ремонт для устранения неровностей на поверхности обратного валика шва, небольших кратеров и подрезов по краям валика с помощью электронного пучка обычным способом не представляется возможным из-за ограниченности внутренних размеров изделия и затрудненного доступа к месту обработки.

Известен способ оплавления внутренней поверхности трубчатых изделий с помощью электронного пучка, отклоненного электрическим полем [1]. Использование медного отражателя, установленного на керамическом изоляторе, позволяет накопить заряд при попадании на него электронного пучка и создать поле между стенкой трубы и отражателем, с помощью которого пучок отклоняется по заданной траектории на внутреннюю поверхность оплаиваемой трубы. При управлении отклонением электронного пучка изменяются угол наклонной торцевой поверхности отражателя, расстояние между отражателем и оплаиваемой трубой, форма отражателя и регулировка параметров первичного электронного пучка. Недостатком данного способа оплавления является необходимость поддержания зазора между отражателем и внутренней поверхностью трубы не менее 3 мм, а также расположения стыка или обратного валика шва на глубине не более 110 мм.

Исследования по ремонту и косметическому заглаживанию обратных валиков шва производи-

ли на установке КЛ-138 конструкции Института электросварки им. Е. О. Патона с компьютерным управлением всеми параметрами и системами. Установка укомплектована энергетическим комплексом на базе ЭЛА-60/60 и электронно-лучевой пушкой, которая перемещается внутри вакуумной камеры по линейным координатам  $X, Y, Z$ , а также поворачивается вокруг оси  $Y-Y$  по координате  $QG$  на угол  $0 \dots 90^\circ$ . Вакуумная камера, имеющая внутренний размер  $4500 \times 3000 \times 3000$  мм и объем  $40,5 \text{ м}^3$ , откачивается в автоматическом режиме управления до рабочего вакуума  $2,66 \cdot 10^{-2}$  Па ( $2 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.) менее чем за 30 мин. Применение в процессе откачки криогенератора типа POLYCOLD позволило существенно уменьшить время откачки и количество влаги в вакуумной камере и стыке свариваемых кромок, что особенно важно при сварке титановых сплавов [2]. При ускоряющем напряжении  $U_{\text{уск}} = 60$  кВ диапазон тока электронного пучка  $I_{\text{п}} = 0 \dots 1000$  мА перекрывается с помощью двух оптик: 500 мА ( $I_{\text{п}} = 0 \dots 500$  мА) и 1000 мА ( $I_{\text{п}} = 0 \dots 1000$  мА). Точность позиционирования электронно-лучевой пушки по координатам составила не хуже 0,1 мм. Изображение места сварки во вторично-эмиссионных электронах, а также совмещение электронного пучка со стыком с погрешностью 0,1 мм выполняли с помощью системы РАСТР.

Для ремонта и косметического заглаживания линейных и кольцевых обратных валиков шва внутри трубчатых изделий длиной до 1200 мм, а также исключения трудоемкой механической обработки корневой части шва при сварке, которую выполняют с внешней стороны изделия, разработана система преломления электронного пучка на  $90^\circ$ , работающая по принципу воздействия на электронный пучок неоднородным магнитным полем путем изменения постоянного тока в катушке электромагнита. Как показано на рис. 1, поворотную систему устанавливают на торцевой повер-



Рис. 1. 90°-Поворотная система для ремонта и косметического заглаживания обратного валика шва

ности электронно-лучевой пушки. Она состоит из полой трубы требуемых диаметра и длины, а также водоохлаждаемой электромагнитной поворотной системы. Положение в пространстве поворотной системы выбирается таким образом, чтобы после преломления на 90° электронный пучок следовал строго вертикально вниз. Получение изображения стыка и обратного валика внутри трубчатых изделий, а также наведение электронного пучка выполняются с помощью отклоняющей системы, установленной перед поворотным электромагнитом, датчика вторично-эмиссионного сигнала и системы РАСТР. Отклоняющая система основной электронно-лучевой пушки при работе системы преломления электронно-лучевого пучка на 90° отсоединяется от системы РАСТР, ее используют для юстировки электронного пучка и его установки в промежутке между полюсными наконечниками электромагнита. Экспериментально определено, что конструкция системы преломления электронного пучка на 90° обеспечивает надежную и долговременную работу при токе пучка  $I_{\text{п}} = 0 \dots 100$  мА.

Ремонт и косметическое заглаживание линейных обратных валиков выполняли на пушке с оптикой 500 мА внутри трубчатых изделий прямоугольной формы длиной до 1200 мм, изготовленных из титанового сплава ВТ20, при перемещении системы преломления электронного пучка на 90° вдоль обратного валика. Выбор материала изделия обусловлен неравномерным формированием обратного валика шва с подрезами по краям, особенно характерными при сквозном проплавлении электронным пучком титановых сплавов толщиной более 6 мм [3].

Выбор оптимальных параметров (тока пучка  $I_{\text{п}}$ , скорости сварки  $v_{\text{св}}$ , тока фокусировки  $I_{\text{ф}}$  и рабочего расстояния  $l_{\text{раб}}$  от среза системы преломления электронного пучка на 90° до изделия) процесса электронно-лучевого заглаживания и ремонта осуществляли путем выполнения ряда

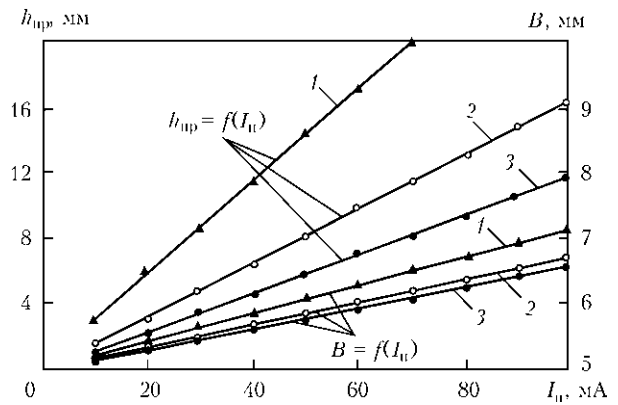


Рис. 2. Зависимость глубины  $h_{\text{пр}}$  и ширины  $B$  проплавления сплава ВТ20 от тока пучка при  $v_{\text{св}} = 3$  (1), 6 (2) и 10 (3) мм/с при  $U_{\text{уск}} = 60$  кВ,  $l_{\text{раб}} = 100$  мм

проплавлений на сплошном образце титанового сплава ВТ20 толщиной 17 мм.

После проплавления на рабочем расстоянии  $l_{\text{раб}} = 100$  мм и приготовления поперечных макрошлифов получена экспериментальная зависимость глубины  $h_{\text{пр}} = f(I_{\text{п}})$  и ширины проплавления на поверхности образца  $B = f(I_{\text{п}})$  от значения тока пучка в диапазоне  $I_{\text{п}} = 10 \dots 100$  мА при скорости сварки  $v_{\text{св}} = 3, 6$  и 10 мм/с. Как показано на рис. 2, при  $v_{\text{св}} = 6$  мм/с и  $I_{\text{п}} = 20$  мА глубина проплавления  $h_{\text{пр}} \cong 2,5$  мм, а ширина  $B \cong 5,3$  мм. Такой режим рекомендован для косметического заглаживания обратного валика шва шириной 1...3 мм. При выполнении ремонта по устранению или уменьшению неравномерности формирования обратного валика по длине, а также небольших кратеров достаточно повысить ток пучка  $I_{\text{п}}$ .

В случае протяженных трубчатых изделий прямоугольной формы при изменении положения обратного валика по высоте, т. е. с изменением поперечного сечения по длине изделия, необходимо определить значение коэффициента  $K = \Delta l_{\text{раб}} / \Delta I_{\text{ф}}$ . Установлено, что для системы поворота электронного пучка на 90° длиной 1200 мм при изменении рабочего расстояния  $l_{\text{раб}}$  в диапазоне 100...200 мм коэффициент  $K = 20$  мм/мА, т. е. ток фокусирующей линзы электронно-лучевой пушки с оптикой 500 мА изменится на  $\Delta I_{\text{ф}} = 5$  мА при изменении рабочего расстояния на  $\Delta l_{\text{раб}} = 100$  мм. Такая слабая зависимость  $I_{\text{ф}} = f(l_{\text{раб}})$  свидетельствует о том, что в данном случае имеет место длиннофокусная система.

Отработку режимов косметического заглаживания обратных валиков швов с применением системы преломления электронного пучка на 90° производили на плоских образцах из титанового сплава ВТ20 толщиной 17 мм. Сварные швы и обратные валики предварительно были получены после выполнения сквозного проплавления на весу без подкладки титановых образцов горизонтальным электронным пучком на скорости сварки  $v_{\text{св}} = 30$  мм/с основной электронно-лучевой пушкой

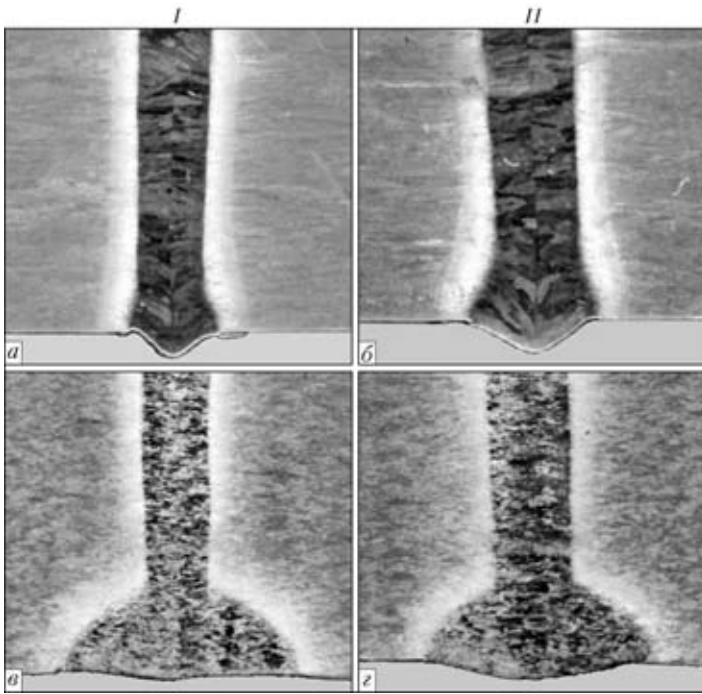


Рис. 3. Макроструктура ( $\times 27,5$ ) сварных соединений сплава VT20 и формирование обратных валиков шва шириной 1,2 (I) и 1,8 мм (II) до (а, б) и после (в, г) их косметического заглаживания

установки КЛ-138 без системы преломления электронного пучка на  $90^\circ$  поворота при движении пушки в горизонтальной плоскости [4]. Путем изменения амплитуды поперечных колебаний электронного пучка по пилообразному закону удалось сформировать бездефектные лицевые валики шва и обратные валики с небольшими подрезами и без подрезов шириной 1,2...2,0 мм и высотой 0,5...0,8 мм. Как показано на рис. 3, косметический проход по обратным валикам швов шириной 1,2 мм (рис. 3, а, в) и 1,8 мм (рис. 3, б, г) на подобранном режиме ( $U_{\text{уск}} = 60$  кВ,  $I_{\text{п}} = 20$  мА,  $v_{\text{св}} = 6$  мм/с,  $l_{\text{раб}} = 100$  мм) позволил сформировать корневую часть шва с плавными переходами от основного металла ко шву, получить гладкую поверхность без капель расплавленного металла и устранить небольшие подрезы глубиной до 0,15 мм. Высота обоих обратных валиков уменьшилась и составила не более 0,4 мм, а глубина проплавления со стороны корня шва — 2,5 мм, что согласуется с результатами, приведенными на рис. 2.

Given are hardware and technological solutions for cosmetic smoothing and repair of linear back beads of up to 1200 mm long welds inside extended position tubular parts of a rectangular shape obtained by using the system for refraction of the electron beam by  $90^\circ$ . Parameters of electron beam smoothing for titanium alloy VT20 were determined, providing formation of a smooth transition from the base metal to weld, smooth surface of molten metal and elimination of undercuts down to 0.15 mm deep.

Полученные результаты реализованы при косметическом заглаживании обратного валика шва на протяженном трубчатом изделии прямоугольной формы сложной конфигурации с расположением обратного валика на нижней поверхности. При движении системы поворота электронного пучка на  $90^\circ$  вдоль обратного валика  $l_{\text{раб}} = 100...250$  мм. При составлении компьютерной программы управления косметическим заглаживанием все параметры электронного пучка сохраняются постоянными, кроме тока фокусировки  $I_{\text{ф}}$ . Такой прием позволил получить практически постоянную ширину проплавления по всей длине изделия, которая составила  $B \cong \cong 5,3$  мм.

Исследования по косметическому заглаживанию линейных обратных валиков шва в полной мере могут быть применены при ЭЛС со сквозным проплавлением поворотных стыков протяженных трубчатых изделий круглой формы. В этом случае задача заглаживания упрощается, так как рабочее расстояние сохраняется постоянным. При выполнении ЭЛС протяженных изделий из тугоплавких материалов с глубиной проплавления  $h_{\text{пр}} \leq 6$  мм, например, таких, как волноводы и резонаторы [5], применение системы преломления электронного пучка на  $90^\circ$  является единственным возможным вариантом косметического заглаживания обратного валика шва с образованием гладкой поверхности без подрезов.

1. Боровик В. М., Фролов О. В., Шубин Ф. В. Оплавление внутренней поверхности цилиндрических образцов отклоненным пучком // Материалы XI Всесоюз. науч.-техн. конф. по электронно-лучевой сварке ( г. Николаев, 1–3 окт. 1991 г.). — Л.: Судостроение, 1991. — С. 73–74.
2. Назаренко О. К. Сокращение времени откатки крупногабаритных вакуумных камер электронно-лучевых сварочных установок // Автомат. сварка. — 2008. — № 3. — С. 54–55.
3. Нудельман Я. Б., Задерий Б. А. Формирование швов при электронно-лучевой сварке сплавов титана толщиной до 25 мм // Там же. — 1988. — № 5. — С. 29–30.
4. Кравчук Л. А. Устранение подрезов при ЭЛС со сквозным и несквозным проплавлением // Там же. — 2010. — № 6. — С. 26–29.
5. Жданевич М. Л. Деформации резонаторов при электронно-лучевой сварке // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Электроннолучевая сварка в машиностроении» (г. Николаев сент. 1989 г.). — Николаев, 1989. — С. 41–42.

Поступила в редакцию 27.12.2011