



ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ МАГНИТОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, д-р техн. наук, **Л. А. КРАВЧУК**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен выбор энергетических и временных параметров электронного пучка при электронно-лучевой сварке плоской измерительной камеры магнитопневматического газоанализатора из коррозионностойкой нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Приведены схема сварки в общем вакууме, сварочно-сборочное устройство и режимы, обеспечивающие формирование нахлесточных и кольцевых швов с допустимыми искажениями геометрических размеров газового канала и герметичности.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, нержавеющая сталь, нахлесточное соединение 0,2+1,0 мм, погонная энергия сварки, сборочно-сварочное приспособление, схема сварки, герметичность, деформации

В 1970 г. фирма «SIEMENS» (ФРГ) начала серийно выпускать магнитопневматический газоанализатор типа ОХУМАТ [1], в состав которого входит плоская измерительная камера из коррозионностойкой нержавеющей стали. Она состоит из основания с пазами в виде листа толщиной $S = 1,0$ мм размером 164×52 мм, верхней и нижней пластин из фольги толщиной $S = 0,2$ мм, двух штенгелей и двух ниппелей (рис. 1). Конструктивные особенности камеры заключаются в том, что штенгели и ниппели приваривают к верхней пластине кольцевыми швами, а верхнюю и нижнюю пластины — к основанию линейными нахлесточными швами. При разработке технологии электронно-лучевой сварки измерительной камеры отечественного газоанализатора, применяемого для атомных электростанций, необходимо учитывать, что искажение геометрических размеров газового канала в виде волнистостей, провисания и выпучивания верхней и нижней пластин допускается не более 0,1 мм, а спад давления на уровне $0,59 \cdot 10^3$ Па за 30 мин не допускается совсем.

Сварку применительно к измерительной камере производят для герметизации внутреннего объема и установки ниппелей и штенгелей. Как показано на рис. 1, продольные и поперечные линейные швы выполнены с отступом от края пазов примерно на 1 мм. Швы проходят по всей длине изделия и пересекаются, благодаря чему увеличивается жесткость конструкции и исключаются закругления. Поскольку ширина швов на прототипе составила 0,23...0,25 мм, можно предположить, что в данном случае применили электронно-лучевую или лазерную сварку.

По условиям работы измерительная камера газоанализатора должна быть немагнитной, коррозионностойкой и вакуумно-плотной.

Этим требованиям может соответствовать аустенитная хромоникелевая тонколистовая сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632–72). Однако ее пониженная теплопроводность и высокий коэффициент линейного расширения обуславливают усиленное коробление свариваемых конструкций и узлов. Для обеспечения минимальных послесварочных деформаций и стойкости против образования кристаллизационных трещин, а следовательно, уменьшения перегрева металла околошовной зоны, необходимо выбирать режим с наименьшей погонной энергией [2].

Как показано в работе [3], при электронно-лучевой сварке непрерывным электронным пуч-

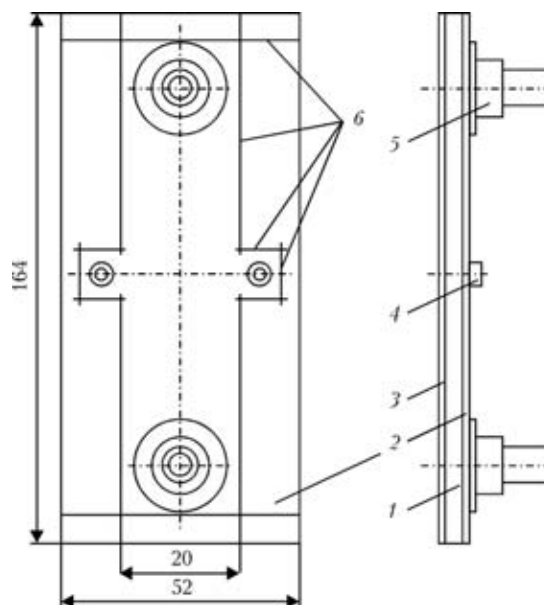


Рис. 1. Схема измерительной камеры магнитопневматического газоанализатора типа ОХУМАТ: 1 — основание; 2 — верхняя пластина; 3 — нижняя пластина; 4 — ниппель; 5 — штенгель; 6 — нахлесточные сварные швы

ком листов из ковара и стали 12X18H10T толщиной 0,3 мм погонная энергия $q/v = \eta_{\text{и}} U_{\text{уск}} I_{\text{п}} / v_{\text{св}}$ [Дж/м] (где $\eta_{\text{и}}$ — КПД электронного нагрева, для стали 12X18H10T он равен 0,8; $U_{\text{уск}}$ — ускоряющее напряжение, кВ; $I_{\text{п}}$ — ток электронного пучка, мА; $v_{\text{св}}$ — скорость сварки, м/с) в диапазоне ускоряющего напряжения 20...70 кВ сохраняется постоянной. Исследование характера зависимостей $q/v = f(v_{\text{св}})$ и $B = f(v_{\text{св}})$ показало, что при $U_{\text{уск}} = 60$ кВ минимальная погонная энергия достигается при скорости сварки $v_{\text{св}} = 40$ мм/с, а ширина шва $B = 0,25$ мм. Для нахлесточного соединения тонкая пластина-основание 0,2 + 1,0 мм из стали 12X18H10T значение электронного пучка на изделие, обеспечивающее глубину проплавления $h_{\text{пр}} = 0,3$ мм, составило $I_{\text{п}} = 2,1$ мА. Погонная энергия сварки на режиме $U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $I_{\text{п}} = 2,1$ мА, $v_{\text{св}} = 40$ мм/с равнялась $q/v = 2,52$ кДж/м.

Отработку режимов электронно-лучевой сварки нахлесточных соединений тонкая пластина-основание 0,2 + 1,0 мм из стали 12X18H10T производили на лабораторной установке ОБ-1803 с модернизированной электронно-лучевой колонной ПЛ-102*. Электронная пушка триодного типа с прямонакальным термокатодом из вольфрамовой проволоки марки ВР-20 диаметром 0,27 мм совместно с электромагнитными юстировочной системой и фокусирующей линзой обеспечивают формирование на поверхности свариваемого изделия пятна нагрева диаметром 0,05...0,30 мм и электронного пучка с током $I_{\text{п}} = 0...15$ мА [4]. Расположенная под фокусирующей линзой отклоняющая система при подключении к системе управления СУ-241 [5] обеспечивает отклонение и перемещение электронного пучка по кольцевому стыку неподвижного изделия (ниппель или штенгель) с заданной скоростью. Вакуумная камера с двухкоординатным рабочим столом позволяет выполнять загрузку и сварку в нижнем положении одновременно четырех измерительных камер в сборочно-сварочном приспособлении при разрежении $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Рабочее расстояние составляет $l_{\text{раб}} = 105$ мм.

Контроль фокусировки электронного пучка на поверхности нахлесточного соединения тонкая пластина-основание из нержавеющей стали 12X18H10T производили визуально по яркости свечения круговой развертки диаметром 5 мм и током пучка $I_{\text{п}} = 2$ мА на медной массивной пластине, расположенной на одном уровне со свариваемым изделием, а также с помощью оптической системы наблюдения колонны электронно-оптической ПЛ-102, обеспечивающей получение четкого изображения зоны сварки с 5...50-кратным

увеличением. Сварку нахлесточного соединения 0,2 + 1,0 мм выполняли на острой фокусировке, которая при рабочем расстоянии $l_{\text{раб}} = 105$ мм соответствовала току катушки фокусирующей линзы $I_{\text{ф}} = 765$ мА. Кольцевые швы по отбортовке ниппелей и штенгелей производили с недофокусировкой электронного пучка на $\Delta I_{\text{ф}} = -20$ мА ($I_{\text{ф}} = 745$ мА).

Для обеспечения надежного теплового контакта по всей длине стыка нахлесточного соединения 0,2 + 1,0 мм и получения бездефектных швов по аналогии с патентом [6] разработано сборочно-сварочное приспособление для сварки (электронно-лучевая или лазерная), состоящее из двух жестких металлических планок прямоугольной формы для плотного зажатия между ними измерительной камеры (имеющей два ниппеля и два штенгеля), в одной из которых со стороны воздействия сварочного луча выполнены сквозные пазы (рис. 2, а).

Отличительной особенностью сборочно-сварочного приспособления является то, что на нем дополнительно установлены с зазором защитные экраны со сквозными пазами из медной пластины, совпадающими по форме и соосными со сквозными пазами в указанной планке (рис. 2, б). Таким способом исключается возможное попадание сварочного электронного пучка на верхнюю прижимную планку и ее послесварочная деформация.

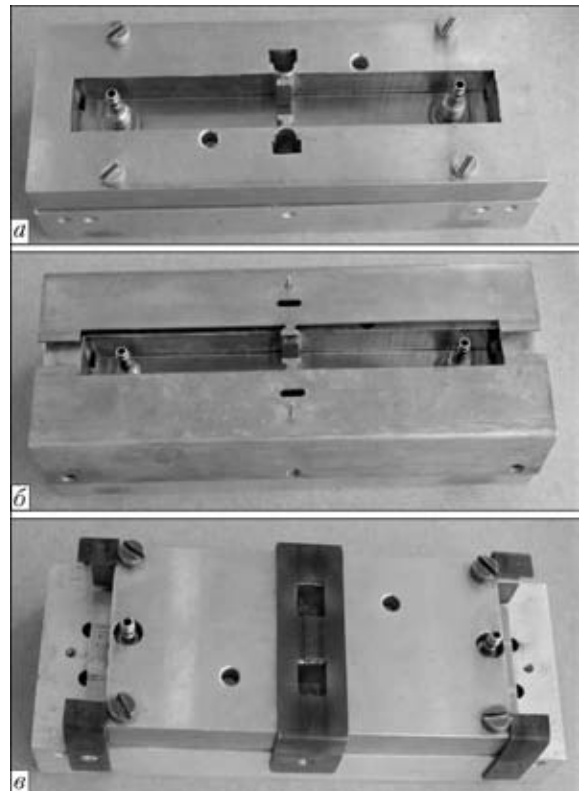


Рис. 2. Сборочно-сварочное приспособление для электронно-лучевой сварки измерительной камеры ($\times 1,67$): а — сборка без защитных экранов; б — сборка с защитными экранами для выполнения нахлесточных швов соответственно вдоль длинной и короткой (в) сторон

* В работе принимал участие инженер-техник I категории С. А. Щёлок.

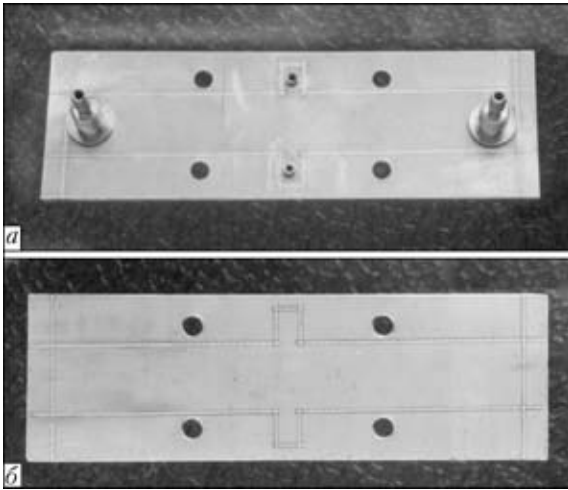


Рис. 3. Измерительная камера газоанализатора с линейными нахлесточными швами ($\times 1$, уменьш. в 2 раза): *a* — вид со стороны ниппелей и штенгелей; *б* — вид со стороны нижней пластины

При разработке технологического процесса электронно-лучевой сварки измерительных камер магнитопневматического газоанализатора, включая сборочно-сварочное приспособление, принципиально важной оказалась последовательность выполнения сварных швов. Во избежание провисания и выпучивания тонкой пластины из нержавеющей стали 12X18Н10Т толщиной $S = 0,2$ мм в области газового канала более 0,1 мм, оптимальной принята следующая последовательность:

1) установка ниппеля и штенгеля в отверстия на тонкой пластине толщиной $S = 0,2$ мм. Высота и толщина отбортовки составила соответственно 0,50 и 0,25 мм;

2) развальцовка отбортовки на ниппелях и штенгелях, контроль зазора между отбортовкой и тонкой пластиной, которая должна быть не более 0,05 мм;

3) сборка верхней тонкой пластины с развальцованными двумя ниппелями и двумя штенгелями в комплекте с основанием и без нижней тонкой пластины в сварочно-сборочном устройстве (рис. 3);

4) загрузка в вакуумную камеру электронно-лучевой установки четырех комплектов измерительных камер (ниппели и штенгели направлены вверх) и выполнение четырех линейных нахлесточных швов вдоль длинной стороны (рис. 2, *a, б*);

5) разгерметизирование вакуумной камеры и сборка сварочно-сборочного устройства с защитными экранами из медных пластин (рис. 2, *в*);

6) загрузка в вакуумную камеру четырех комплектов измерительных камер (ниппели и штенгели направлены вверх) и выполнение четырех линейных нахлесточных швов вдоль короткой стороны. Визуальный контроль пересечения восьми линейных швов (рис. 3, *a*);

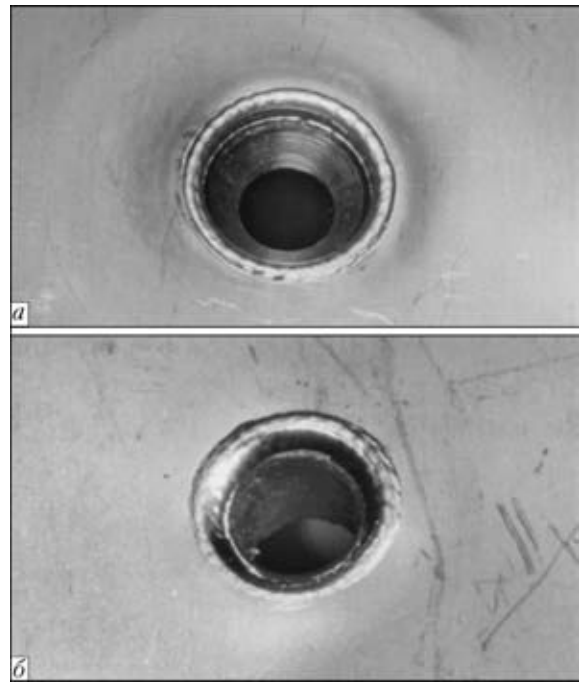


Рис. 4. Внешний вид кольцевых швов при сварке отбортовка – тонкая пластина ($\times 4$) на штенгеле (*a*) и ниппеле (*б*)

7) разгерметизирование вакуумной камеры и изменение положения измерительных камер в сварочно-сборочном устройстве без нижней тонкой пластины (ниппели и штенгели направлены вниз), когда кольцевые стыки — развальцованная отбортовка — тонкая пластина направлены в сторону сварочного электронного пучка;

8) загрузка в вакуумную камеру четырех комплектов измерительных камер и выполнение электронно-лучевой сварки кольцевых стыков на ниппелях и штенгелях с применением системы управления СУ-241. Режим сварки: $U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $I_{\text{п}} = 1,8$ мА, $v_{\text{св}} = 15$ мм/с (рис. 4);

9) разгерметизирование вакуумной камеры и выполнение визуального контроля по формированию линейных и кольцевых швов на отсутствие дефектов в виде несплавлений и прожогов;

10) промежуточный контроль сваренных измерительных камер без нижней тонкой пластины на герметичность методом избыточного давления. Спад давления в измерительной камере на уровне $0,59 \cdot 10^3$ Па, определяемый по манометру (модель 11202, ГОСТ 6521–72), не должен иметь место на протяжении 30 мин;

11) сборка четырех комплектов измерительных камер в сварочно-сборочном устройстве с нижней тонкой пластиной толщиной $S = 0,2$ мм из нержавеющей стали 12X18Н10Т (ниппели и штенгели направлены вниз), загрузка в вакуумную камеру и выполнение последовательно вначале четырех нахлесточных швов вдоль длинной стороны, а затем четырех линейных нахлесточных швов вдоль короткой стороны (см. п. 4–6). Визуальный

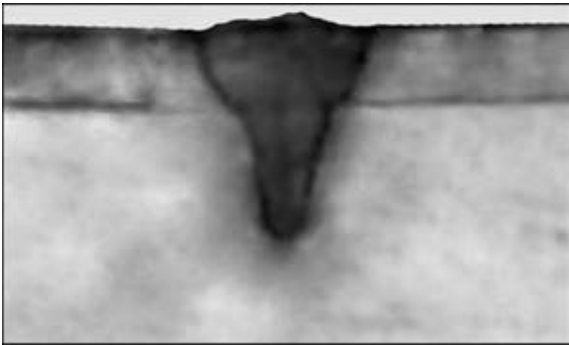


Рис. 5. Поперечный макрошлиф ($\times 60$) нахлесточного соединения $0,2 + 1,0$ мм из нержавеющей стали 12X18H10T

контроль пересечения восьми линейных швов на отсутствие дефектов (рис. 3, б);

12) разгерметизирование вакуумной камеры и выполнение окончательного контроля полностью сваренных измерительных камер на герметичность методом избыточного давления.

Приведенные выше режимы электронно-лучевой сварки в общем вакууме измерительной камеры магнитопневматического газоанализатора, последовательность выполнения сборок и сварных швов, промежуточный и окончательный контроль формирования сварных соединений на отсутствие дефектов и герметичность позволили получить при массовом производстве 100%-й выход годной продукции. Как показано на рис. 5, ширина лицевого валика нахлесточного шва составила $B \cong 0,24$ мм при глубине проплавления около 0,5 мм.

Установлено также, что значения остаточных деформаций конструкции измерительной камеры находятся в прямой зависимости от погонной энергии сварки, которая в свою очередь определяется режимом сварки и зависит от сечения шва.

The paper considers selection of power and time parameters of the electron beam for electron beam welding of a flat measuring chamber of the magnetic-pneumatic gas analyser made from corrosion-resistant stainless steel 12Kh18N10T. The flow diagram of welding in general vacuum is presented. A welding-assembly device is described, and parameters providing formation of overlap and circumferential welds with permissible distortions of geometric sizes of the gas channel and vacuum-tightness are given.

Измерение послесварочной деформации осуществляли методом сравнения с эталонным образцом. Провисание и выпучивание тонкой пластины из фольги толщиной $S = 0,2$ мм в области газового канала не превысили 0,1 мм.

Выводы

1. Электронно-лучевая технология и оборудование применительно к прецизионной сварке измерительной камеры магнитопневматического газоанализатора из нержавеющей стали 12X18H10T удовлетворяет всем требованиям по герметичности и геометрическим размерам газового канала.

2. Минимальная погонная энергия электронного пучка и минимальная ширина шва достигаются при скорости $v_{св} \geq 40$ мм/с.

3. Приведенные режимы электронно-лучевой сварки нахлесточных и кольцевых соединений, последовательность выполнения сборок и сварных швов, поэтапный контроль качества сварки и герметичности позволили получить 100%-й выход годной продукции.

1. www.sea.siemens.com/us/Products/Process-Analytics/Products.
2. *Свойства соединений стали 08X18H10T, выполненных лазерной сваркой* / А. Н. Грезев, В. Л. Лукьяненко, А. М. Забелин и др. // Автомат. сварка. — 1989. — № 12. — С. 63–64.
3. *Кравчук Л. А., Слуцкий М. Г.* Импульсная электронно-лучевая сварка встык листов сплава 29НК толщиной до 1 мм // Там же. — 1979. — № 1. — С. 41–44.
4. *Кравчук Л. А., Небесный С. В., Пикуля Л. Г.* Электронно-оптическая колонна для прецизионной ЭЛС // Там же. — 1986. — № 12. — С. 54–57.
5. *Сварочное оборудование: Каталог-справочник.* — Киев: Наук. думка, 1991. — Ч.10. — 151 с.
6. *Pat. 4847467 USA, MKI B23K 26/00.* Laser welding clamp / John S. Ausillo, Mt. Clemens. — Publ. 11.07.89.

Поступила в редакцию 25.03.2011