

1558518

На правах рукописи

**ХИСМАТУЛЛИН Ринат Назипович**

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ДВУСТОРОННЕЙ ОДНОВРЕМЕННОЙ  
СВАРКИ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ И ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ**

Специальность: 05.03.06. - **Технология и машины сварочного производ-  
ства.**

 **Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

---

Москва 1998 г.

Работа выполнена в Московском Энергетическом институте - техническом университете

Научный руководитель - доктор технических наук Зуев И.В.

Консультант - к.т.н. Драгунов В.К.

Официальные оппоненты - д.т.н., проф. Неровный В.М.

д.т.н., проф. Гейкин В.А

Ведущее предприятие - АО «Нижнекамскнефтехим»

Защита диссертации состоится «18» июля 1998 г. на заседании диссертационного совета К 053.15.03 при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-ая Бауманская, д. 5.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана

Иван 1998 г.

1558518



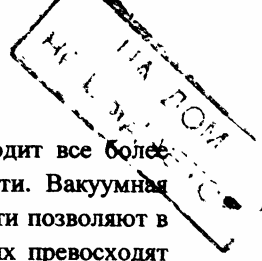
В. И. Гирш

бъем 1 п.л.

Заказ № 82

ипография МВТУ им. Н. Э. Баумана

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.



Актуальность работы. Электронно-лучевая сварка находит все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Вакуумная защита расплавленного металла и высокая плотность мощности позволяют в ряде случаев получать сварные соединения, свойства которых превосходят основной металл. Сварка может производиться горизонтальным, вертикальным или наклонным пучком в режиме сквозного или несквозного проплавления. Узкий и глубокий шов сводит к минимуму послесварочные деформации.

При ЭЛС нашли распространение различные технологические приемы: сварка с формированием корневого валика, двойное преломление луча, его развертка по определенным законам, выведение корня шва в подкладку или в бортик необходимой толщины. Реже используют сварку двумя пучками с двух сторон или тандемную сварку. При ЭЛС ряда изделий данные технологические приемы не всегда обеспечивают требуемое формирование сварного соединения, повышают трудоемкость или имеют ограниченное применение. Использование при ЭЛС со сквозным проплавлением с обратной стороны стыка дугового разряда в вакууме может расширить технологические возможности данного метода сварки и снизить вероятность дефектов формирования типа непроваров, несплавлений и подрезов.

В настоящее время отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования процесса двусторонней сварки при совместном воздействии электронного луча и дугового разряда на материал, условия образования общего пароголового канала, процессы металлопереноса и особенности формирования сварного соединения.

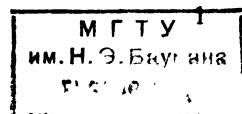
Цель работы заключается в расширении технологических возможностей метода электронно-лучевой сварки со сквозным проплавлением при обеспечении требуемого качества сварного соединения.

Методы исследования. Экспериментальные исследования процесса сварки электронным лучом и дуговым разрядом в вакууме проводили на плоских образцах из сталей различных структурных классов и алюминиевых сплавов толщиной 10 - 25 мм с использованием электронно-лучевого энергетического комплекса У-250 и сварочных выпрямителей ВДУ-506УЗ и ВСС-300-3. Расчеты выполнялись на персональном компьютере типа Pentium 90. Значения магнитной индукции измеряли стандартным магнитометром с датчиком Холла. Механические свойства различных участков сварных соединений определяли безобразцовым методом на приборе МЭИ-Т7. Исследование микроструктуры выполнялось на оптическом микроскопе NU - 2Е, микронтб МГТУ им. Н.Э. Баумана



1558518

Хисматуллин Р.Н. Разработк



твердость измеряли на приборе ПМТ-3, а размер зерна определяли с использованием методов количественной металлографии (линейный анализ).

Научная новизна работы связана с раскрытием закономерностей взаимодействия электронного луча и дугового разряда и особенностей формирования сварных соединений при двусторонней сварке. Установлено, что при одновременной сварке двумя независимыми источниками теплоты мощностью одного порядка материалов толщиной до 25 мм:

- дуговой разряд является интенсивным источником магнитного поля, взаимодействие которого с электронным лучом приводит к изменению его траектории. Составляющие магнитной индукции, приводящие к отклонению электронного луча из области стыка, взаимно компенсируются при симметричном относительно плоскости стыка распределении токов дуги, что достигается при симметричном относительно плоскости стыка расположении заземлений.

- при двусторонней сварке дуговой разряд расширяет парогазовый канал в корневой части, при этом силы, обусловленные воздействием электронного луча и дугового разряда на жидкий металл, имеют противоположное направление, в результате чего стабилизируются гидродинамические процессы в канале проплавления, снижается разбрызгивание и повышается устойчивость расплавленного металла против вытекания в широком диапазоне параметров режимов.

- условия формирования сварных соединений при двусторонней сварке определены соотношением мощностей двух источников теплоты, изменение которого приводит к нарушению баланса сил, действующих на сварочную ванну, в результате чего происходит изменение условий переноса металла, а равновесие расплава восстанавливается за счет сил поверхностного натяжения.

Практическая ценность работы. Разработан способ двусторонней одновременной сварки электронным лучом и дуговым разрядом в вакууме со сквозным проплавлением, обеспечивающий требуемое качество сварных соединений.

Реализация работ в промышленности. Разработанный способ сварки прошел опытно-промышленную проверку и внедрен на НПО «Тонар».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы доложены на Всероссийской конференции «Технические университеты России» (Москва, 1996 г.), на IX Российской научно-техн. конф. «Теплофизика технологических процессов» (Рыбинск, 1996г.), на Российской научно-технической конференции «Современные проблемы сварочной науки и техники» (Воронеж,

1997г.), на Российской научно-техн. конф. «Новые материалы и технологии» (Москва, 1997г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах. Получено положительное решение по заявке на патент на изобретение № 96124599/02 от 13.11.97г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе и приложения. Работа изложена на 183 страницах и содержит 96 страниц машинописного текста, 4 таблицы, 65 рисунков. Список использованной литературы содержит 104 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования и приведена краткая аннотация работы.

В первой главе на основе изучения отечественных и зарубежных литературных источников проведен анализ причин образования дефектов при ЭЛС со сквозным проплавлением.

В работах российских и зарубежных ученых Б. К. Патона, Н. А. Олшанского, О. К. Назаренко, И. В. Зуева, В. В. Башенко, Г.И. Лескова, А. В. Башкатова, Куцана Ю.Г., В.М. Ямпольского, В.М. Неровного, З. Панцера, Штейгервальда, Хашимото, Х. Кихары и др. рассмотрены основные вопросы в области изучения процесса ЭЛС и дугового разряда в вакууме и описаны различные способы предотвращения образования корневых дефектов. Специфика формирования литой зоны при однопроходной ЭЛС такова, что при отсутствии зазоров в стыке и незначительном отклонении оси электронного пучка от плоскости стыка в корне шва образуются несплавления типа слипания (плотный контакт) и непровары, что повышает требования к точности наведения электронного пучка на стык и уменьшает диапазон регулирования параметрами режима ЭЛС.

Наибольшее распространение нашли технологические приемы сварки с выводением корня шва в удаляемую или остающуюся подкладку или бортик, сварка со сквозным проплавлением с формированием корневого валика, с разверткой электронного пучка по различным законам, сварка с двойным преломлением луча, двусторонняя сварка двумя электронными пучками. Однако ЭЛС с выводением корня в подкладку приводит к повышению трудоемкости и материалоемкости процесса, сварка со сквозным проплавлением с формированием корневого валика не гарантируют исключения образования дефектов с обратной стороны шва, а в ряде случаев приводит к провисанию с лицевой стороны, преломление электронного пучка на одном или двух уров-

нях во время ЭЛС значительно уменьшает возникновение корневых дефектов в режиме несквозного проплавления, но не решает проблемы полностью. Двусторонняя сварка двумя электронными пучками трудоемка и находит применение только для сварки больших толщин.

Для обеспечения наилучших условий формирования швов и расширения технологических возможностей электронно-лучевую сварку предложено проводить одновременно с дуговой сваркой в вакууме с противоположных сторон стыка с образованием общей сварочной ванны. В настоящее время отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования процесса двусторонней сварки при совместном воздействии электронного луча и дугового разряда на материал, условия образования общего пароголового канала, процессы металопереноса и особенности формирования сварного соединения.

В связи с этим поставлены следующие задачи исследования:

1. Расчетное и экспериментальное определение температурных и магнитных полей, возникающих при двусторонней сварке электронным лучом и дуговым разрядом;
2. Выбор оптимальной формы дугового разряда;
3. Выявление основных закономерностей процесса двусторонней сварки и их теоретическое обоснование;
4. Исследование структуры и свойств сварных соединений;
5. Разработка технологии двусторонней сварки сталей и сплавов толщиной до 25 мм.

Во второй главе на основе расчетных и экспериментальных методик определены температурные и магнитные поля, возникающие при двусторонней одновременной сварке электронным лучом и дуговым разрядом.

Тепловая модель процесса ЭЛС представляет собой сумму двух одновременно движущихся источников теплоты: точечного  $q_1$  на поверхности и линейного  $q_2$  по глубине шва. Одним из путей снижения вероятности образования дефектов формирования является расширение корневой части сварного шва за счет дополнительного источника теплоты  $q_3$ , расположенного с обратной стороны стыка. Тогда комбинированный источник теплоты можно представить как сумму одного линейного и двух точечных, расположенных на оси линейного с противоположных сторон пластины.

Для расчета распределения температур при ЭЛС ( $\Delta T_3$ ) и двусторонней сварке ( $\Delta T_d$ ) была использована известная методика по принципу суперпозиции тепловых полей (принимали  $q_1=q_3$ ):

$$\Delta T_3 = \Delta T_1 + \Delta T_2, \quad (1),$$

$$\Delta T_d = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3, \quad (2),$$

где  $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ , - приращение температуры в произвольной точке  $M(x,y,z)$  от источников теплоты  $q_1, q_2, q_3$  соответственно.

$$\Delta T_1 = \frac{q_1 \cdot 2 \cdot e^{\left(-\frac{v_{CB} \cdot x}{2 \cdot a}\right)} t_H}{c \cdot \rho \cdot (4 \cdot \pi \cdot a)^{1,5}} \int_0^{t_H} e^{\left(-\frac{v_{CB}^2 \cdot t}{4 \cdot a} - \frac{R_{1i}^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)} \frac{1}{t^{1,5}} dt, \quad (3),$$

$$\Delta T_2 = \frac{q_2}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot H} \cdot e^{\left(-\frac{v_{CB} \cdot x}{2 \cdot a}\right)} \int_0^{t_H} e^{\left(-\frac{v_{CB}^2 \cdot t}{4 \cdot a} - \frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)} \frac{1}{t} dt, \quad (4),$$

$$\Delta T_3 = \frac{q_3 \cdot 2 \cdot e^{\left(-\frac{v_{CB} \cdot x}{2 \cdot a}\right)} t_H}{c \cdot \rho \cdot (4 \cdot \pi \cdot a)^{1,5}} \int_0^{t_H} e^{\left(-\frac{v_{CB}^2 \cdot t}{4 \cdot a} - \frac{R_{3i}^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)} \frac{1}{t^{1,5}} dt, \quad (5),$$

где  $v_{CB}$  - скорость сварки,  $c$  - теплоемкость материала,  $a$  - температуропроводность,  $\rho$  - плотность,  $t$  - время,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала,  $H$  - толщина свариваемого изделия,  $R_{1i}, r, R_{3i}$  - расстояния от источников теплоты  $q_1, q_2, q_3$  до точки  $M$  соответственно.

В случае ЭЛС контур литой зоны имеет длинную узкую форму с уширением в верхней части, а при двусторонней сварке - симметричную относительно средней плоскости свариваемой пластины форму с уширениями на лицевой и обратной плоскостях. Гарантированное уширение сварного шва в корневой зоне должно значительно снизить вероятность возникновения корневых дефектов формирования типа несплавлений и непроваров.

В качестве дополнительного точечного источника теплоты при электронно-лучевой сварке возможно использование дугового разряда. Однако использование дугового разряда при ЭЛС сопряжено с возникновением магнитных полей, взаимодействие которых с электронным лучом затрудняет совместное использование электронного луча и дуги в вакууме.

Основными источниками магнитных полей являются остаточная намагниченность перед сваркой и токи дугового разряда, растекающиеся по свариваемым образцам.

В данной работе исследовался процесс двусторонней сварки диа-пара-и ферромагнитных материалов. В качестве ферромагнетика использовалась магнитомягкая сталь, у которой величина предельной остаточной намагниченности очень мала. Поэтому применение размагничивания изделий в переменном магнитном поле, амплитуда которого постепенно убывает до нуля,

позволяет легко получить уровни магнитного поля гораздо ниже допустимых.

Величина, направление и характер распределения вектора магнитной индукции от растекающихся по изделию токов дугового разряда зависят от большого количества факторов, таких как физические свойства и толщина свариваемого материала, ориентация в пространстве всех элементов контура низковольтного источника питания, сила тока дугового разряда, плотность тока в различных элементах контура, форма и геометрические размеры свариваемого изделия, тип сварного соединения и т. д.

Наиболее существенное влияние на качество швов при сварке оказывают составляющие магнитного поля, приводящие к отклонению пучка поперек стыка и образованию дефектов типа непроваров. Кроме того при двусторонней одновременной сварке электронным лучом и дуговым разрядом с общей сварочной ванной для получения требуемой геометрии сварного шва необходимо учитывать отклонение пучка вдоль стыка под воздействием магнитных полей. Так, например, в точке  $i$  траектории осевого электрона на него действует составляющие силы Лоренца  $F_{xi}$  и  $F_{yi}$ , приводящие к отклонению электронного луча, можно определить как:

$$F_{yi} = e \cdot (-B_{xi} \cdot v_{zi} + B_{zi} \cdot v_{xi}), \quad (6)$$

$$F_{xi} = e \cdot (-B_{yi} \cdot v_{zi} + B_{zi} \cdot v_{yi}), \quad (7).$$

где  $B_{xi}$ ,  $B_{yi}$  и  $B_{zi}$  - составляющие магнитной индукции;  $v_{xi}$ ,  $v_{yi}$  и  $v_{zi}$  - составляющие скорости осевого электрона;  $e$  - заряд электрона.

В некоторой точке  $i$  траектории электронного пучка элементом тока дуги плотностью  $j$  в элементарном объеме  $dV$  с координатами  $(x_j, y_j, z_j)$  будет создаваться магнитное поле напряженностью  $dH_i$ , проекции которой на координатные оси можно определить из выражений:

$$dH_{ix} = \frac{dV}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left( j_y \cdot \frac{z_i - z_j}{\sqrt{(z_i - z_j)^2 + x_j^2}} + j_z \cdot \frac{y_j}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2}} \right), \quad (8),$$

$$dH_{iy} = -\frac{dV}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left( j_x \cdot \frac{z_i - z_j}{\sqrt{(z_i - z_j)^2 + y_j^2}} + j_z \cdot \frac{x_j}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2}} \right), \quad (9),$$

$$dH_{iz} = \frac{dV}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left( j_y \cdot \frac{x_j}{\sqrt{(z_i - z_j)^2 + x_j^2}} - j_x \cdot \frac{y_j}{\sqrt{(z_i - z_j)^2 + y_j^2}} \right), \quad (10),$$

где  $r_i$  - расстояние между элементом  $dV$  и точкой  $i$ .

Из анализа (6-10) следует, что при симметричном распределении  $j_x$ ,  $j_y$  и  $j_z$  относительно плоскости XOZ (плоскости стыка) составляющие напряженности магнитного поля  $H_x$  и  $H_z$  будут равны нулю в канале проплавления и пространстве дрейфа, а, следовательно, проекция силы Лоренца  $F_{\text{Л}}$  на ось ОУ будет равна нулю, что исключит отклонение электронного пучка поперек стыка.

В то же время при симметричном распределении токов дуги относительно плоскости, лежащей на оси электронного пучка и перпендикулярной скорости сварки, составляющие магнитной индукции, приводящие к отклонению электронного луча вдоль стыка также будут равны нулю. Для предотвращения повреждения горелки проходящим пучком она расположена под некоторым углом  $\alpha$  к обратной стороне изделия и лежит в плоскости стыка. Отсюда следует, что полностью исключить отклонение электронного луча вдоль стыка не представляется возможным.

Характер распределения растекающихся токов дугового разряда по изделию определяется условиями входа и выхода тока из изделия, то есть регулирование процесса растекания токов дуги по изделию возможно путем изменения условий заземления образцов. Тогда при симметричном относительно плоскости стыка заземлении изделия будет достигнуто симметричное распределение растекающихся по изделию токов дуги относительно плоскости стыка.

Данному условию соответствует несколько вариантов, основные из которых представлены на рис. 1. Схема 1 (рис. 1а.) характеризуется наличием одной точки заземления, расположенной в начале или конце стыка. Во время сварки точка заземления остается неподвижной относительно изделия. При использовании двух заземлений, расположенных на свариваемом стыке в начале и в конце согласно схеме 2 (рис. 1б.), данные точки остаются неподвижными относительно изделия во время сварки. Отличием схемы 3 от предыдущих является то, что в данном случае заземления расположены не в плоскости свариваемого стыка, а симметрично относительно его (рис. 1в.). При этом рассматриваются два варианта: с неподвижными контактами во время сварки и перемещающимися параллельно горелке вдоль стыка.

Расчетное определение плотности магнитного потока представляется довольно сложным. Поэтому значения магнитной индукции определяли пу-

тем прямых измерений при сварке диа-пара и ферромагнитных материалов толщиной до 25 мм.

В результате было установлено, что при любой из трех схем расположения заземлений значения магнитной индукции таковы, что отклонение электронного луча поперек стыка не превышает 0,1 мм при двусторонней сварке материалов толщиной до 25 мм.

Величина отклонения пучка вдоль стыка при двусторонней сварке (ток дугового разряда 100 А) изменяется от 0,2 до 2,0 мм и более, что определяется свойствами свариваемого материала, его толщиной и выбранной схемой расположения заземлений. Однако использование схемы 1 и схемы 3 с неподвижными контактами приводит к неравномерному отклонению электронного луча вдоль стыка, особенно при сварке ферромагнитных материалов, а расположение заземлений согласно схеме 3 со скользящими контактами предъявляет высокие требования к величине сопротивления скользящих контактов. Незначительная разница приводит к несимметричному относительно плоскости стыка распределению плотности растекающегося тока дуги по изделию, и, как следствие, к отклонению пучка поперек стыка. Поэтому наиболее технологичным является расположение заземлений в начале и в конце стыка (схема 2), так как в этом случае исключается неравномерное отклонение электронного луча вдоль стыка во время сварки и не требуется специальных приспособлений и аппаратуры для обеспечения симметричного распределения относительно плоскости стыка токов дуги, растекающихся по изделию. Недостатком схемы 2 является ограниченность применения (прямолинейный стык).

В третьей главе определена наиболее пригодная для двусторонней сварки форма дугового разряда и рассмотрены особенности формирования сварных соединений при двусторонней одновременной сварке электронным лучом и дуговым разрядом (рис.2).

В результате исследований было установлено, что при двусторонней сварке со сквозным проплавлением обеспечивается стабильное возбуждение дугового разряда при сварке плавящимся электродом при напряжении холостого хода выше 70 В и нагреве торца сварочной проволоки проходящим электронным пучком без использования дополнительных высоковольтных и высокочастотных устройств. После возбуждения дуга горит между торцом экранированного электрода и изделием, причём анодное пятно располагается на наиболее нагретом участке изделия - в корне шва.

Данный способ позволяет получать сварные соединения удовлетворительного качества. Однако высокий коэффициент расплавления, при-

сущий процессу дуговой сварки плавящимся электродом в вакууме, усложняет технологию сварки.

При сварке испаряющимся электродом на прямой полярности аксиальное магнитное поле приводит к отклонению электронного луча поперек стыка. При использовании дугового разряда испаряющимся электродом без аксиального магнитного поля положительных результатов получено не было.

После возбуждения дугового разряда с полым катодом стабильно горит между катодом и изделием, причём столб плазмы остаётся прямолинейным и параллельным полюсу катода при введении электронного луча в зону сварки.

Из трех существующих устойчивых форм дугового разряда в вакууме, пригодных для целей сварки, наиболее технологичным для двусторонней сварки является дуговой разряд с полым катодом. Высокие эффективный КПД и плотность мощности, большая разрывная длина дуги и возможность подачи присадочного материала значительно облегчают управление процессом и расширяют технологические возможности двусторонней сварки.

При сканировании столба дуги электронным пучком с частотой 1 - 2 кГц изменения энергетических параметров дугового разряда не обнаружено. Ток дуги с увеличением тока пучка не изменяется. Плотность мощности дугового разряда также остается постоянной, о чем можно судить по неизменной форме и площади проплавления, то есть при двусторонней сварке источники теплоты независимы, а наиболее существенное влияние на формирование сварных соединений оказывает магнитное взаимодействие дугового разряда и электронного луча.

Во время ЭЛС на расплавленный металл со стороны электронного луча действуют различные силы, при суммарном воздействии которых ( $\Sigma F_{\Sigma}$ ) часть жидкого металла вытесняется, в результате чего образуется устойчивый парогазовый канал. В свою очередь при дуговой сварке в вакууме также возможно образование сварочного кратера в результате действующих на расплавленный металл сил со стороны дуги ( $\Sigma F_{\text{д}}$ ).

Таким образом, при двусторонней одновременной сварке электронным лучом и дуговым разрядом в вакууме со сквозным проплавлением и с образованием общей сварочной ванны расплав находится под воздействием внешних сил, действующих на него с противоположных сторон. При этом воздействие сил с лицевой стороны стыка определяется параметрами электронного луча, а с противоположной стороны - действием дугового разряда с полым катодом, что в конечном счете повышает устойчивость формирования сварных соединений по сравнению с односторонней ЭЛС.

Так, например, при односторонней ЭЛС аустенитной стали 12Х18Н10Т толщиной 10 мм при расфокусировке пучка и увеличении тока сварки на 10%

по сравнению с режимом, обеспечивающим формирование качественного сварного соединения с гарантированным корневым валиком, наблюдается чрезмерное вытекание металла сварочной ванны в корень шва в виде крупных капель. Введение дугового разряда с обратной стороны стыка в обоих случаях значительно уменьшает высоту обратного валика и увеличивает его ширину и обеспечивает стабильное формирование. Таким образом при двусторонней сварке наблюдается расширение диапазона энергетических параметров электронного пучка, в котором обеспечивается устойчивое формирование швов, по сравнению с односторонней ЭЛС.

При двусторонней сварке увеличение тока электронного луча при неизменном токе дугового разряда приводит к увеличению суммарного воздействия  $\Sigma F_z$  на расплав с лицевой стороны стыка. Жидкий металл сварочной ванны оттесняется в корневую часть сварного шва, при этом сначала происходит уменьшение выпуклости с лицевой стороны стыка и уменьшение вогнутости с обратной. При дальнейшем повышении тока пучка происходит увеличение провисания с лицевой стороны стыка и усиления - с обратной, при этом силы поверхностного натяжения восстанавливают равновесие расплавленного металла в сварочной ванне (рис.3,4). При этом повышение тока электронного луча вызывает сначала рост ширины лицевой стороны сварного шва, а затем ее уменьшение. Это можно объяснить тем, что объем расплавленного металла увеличивается, а давление, обусловленное действием дуги на сварочную ванну, до определенного момента больше, чем давление, оказываемое на жидкий металл со стороны электронного пучка, а расплавленный металл оттеснен к лицевой стороне ванны. Дальнейшее увеличение тока электронного пучка повышает давление отдачи паров со стороны пучка, и жидкий металл перемещается в корневую зону. При этом, соответственно, наблюдается уменьшение ширины лицевой стороны шва.

Увеличение тока дугового разряда при неизменном токе электронного луча приводит к повышенному тепловложению и увеличению суммарного давления  $\Sigma F_d$  на расплав с обратной стороны стыка (рис.3,4). В результате жидкий металл сварочной ванны оттесняется к лицевой стороне сварного шва, при этом происходит рост усиления шва с лицевой стороны шва и провисания - с обратной, а силы поверхностного натяжения восстанавливают равновесие расплавленного металла в сварочной ванне, при увеличении ширины шва по всему сечению.

Чрезмерное увеличение мощности сварочной дуги приводит к увеличению давления отдачи паров, при котором происходит оттеснение жидкого металла к лицевой стороне канала, формирование лицевого валика больших размеров и вогнутости шва в корне, а при определенном соотношении мощ-

ностей электронного луча и дугового разряда формируются швы симметричной формы.

В то же время повышение значения тока дугового разряда или тока электронного луча приводит к монотонному увеличению ширины шва с обратной стороны стыка, что согласуется с тепловой моделью данного процесса сварки. При этом наблюдается увеличение ширины шва в самом узком месте поперечного сечения. Однако это не приводит к вытеканию металла и образованию дефектов. Так, например, при сварке аустенитной стали 10X17H13M2T толщиной 25 мм формирование качественных сварных соединений происходит в широком диапазоне параметров режима (ток пучка / ток дуги): 230мА/90А; 250мА/110А; 270мА/130А.

Анализ взаимодействия двух источников теплоты при двусторонней одновременной сварке со сквозным проплавлением и общей сварочной ванной показывает, что образование возмущения на передней стенке канала, приводит к росту концентрации выделяемой мощности на выступе не только со стороны электронного луча, но и дугового разряда. Это означает, что на образовавшемся выступе увеличиваются силы, обусловленные давлением отдачи паров, действующих на него одновременно с двух противоположных сторон и компенсирующих друг друга, что и выражается в значительном снижении разбрызгивания при двусторонней сварке по сравнению с однопроходной электронно-лучевой. Так, например, при однопроходной ЭЛС со сквозным проплавлением аустенитной стали 12X18H10T толщиной 10, 15 и 20 мм разбрызгивание в отношении на длину шва составило 14,2, 19,6 и 24,3 г/м. Введение дугового разряда с обратной стороны стыка уменьшает разбрызгивание до значений 0,1; 0,2 и 0,3 г/м соответственно.

В результате оценки эффективности проплавления металла при двусторонней сварке установили, что проплавляющая способность двух источников теплоты при сварке с общей сварочной ванной выше, чем в случае сварки с отдельными ваннами (например при сварке для АМгб на одинаковых режимах площадь проплавления составила 53,4 и 40,5 мм<sup>2</sup>, соответственно).

Четвертая глава посвящена разработке технологии двусторонней сварки нержавеющей аустенитных и низкоуглеродистых сталей, а также алюминиевых сплавов толщиной до 25 мм применительно к стыковым соединениям.

На основании результатов, полученных при исследовании процесса двусторонней сварки формирования сварных соединений были сформулированы основные подходы к разработке технологии сталей и сплавов.

Подготовка стыкуемых поверхностей деталей и самих деталей под двустороннюю сварку во многом аналогична подготовке под ЭЛС, что обуслов-

лено наличием вакуума при сварке и спецификой источников теплоты - узких потоков заряженных частиц. Для обеспечения высокого качества сварного шва подготовка свариваемых кромок производится с помощью механической обработки. При этом на свариваемых кромках не допускаются вмятины, трещины, надрывы, расслоения, заусенцы и округления, а шероховатость торцов свариваемых кромок должна быть не более  $R_z 40$  по ГОСТ 2789-73. В случае сварки алюминиевых сплавов непосредственно перед сборкой необходимо удалить окисную пленку со свариваемых торцов и прилегающих к ним участков с обеих сторон изделия на ширину 15 - 20 мм. Время от удаления окисной пленки до начала сварки не должно превышать 2 ч. Заготовки деталей из ферромагнитных материалов перед сборкой размагничиваются до остаточной магнитной индукции не более 0,3 мТл.

При сборке деталей под двустороннюю сварку применяют специальную оснастку, изготовленную из немагнитных материалов, а изделие электрически изолируют от сварочной оснастки.

Двусторонняя сварка успешно осуществляется на боку и на подъем горизонтальным пучком, при этом взаимное расположение электронно-лучевой пушки и горелки выбирают таким, чтобы при полном проплавлении стыка двумя источниками теплоты формировалась общая сварочная ванна. Угол наклона оси горелки к плоскости образца может изменяться в пределах  $50^{\circ}$ - $70^{\circ}$ , а сама горелка располагается с обратной стороны с опережением или отставанием, причем точность наведения пучка на стык составляет 0,4-0,7 мм, а дугового разряда - 1,5-2,5 мм в зависимости от свариваемого материала и его толщины.

Для предотвращения нарушения стыковки кромок в процессе сварки узла и обеспечения симметричного распределения растекающихся токов дуги по изделию выполняют прихватки стыка электронным лучом.

Предложенная технология двусторонней сварки была использована при изготовлении стола холодильника-сублиматора из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 15 мм. Сварные соединения стола холодильника-сублиматора, выполненные двусторонней сваркой подвергались визуальному контролю и на непроницаемость металла сварных швов. Контроль осуществляли пузырьковым методом опрессовки с обмыливанием.

Механические испытания проводились на образцах из сталей и алюминиевого сплава. В результате было установлено, что применение двусторонней сварки указанных материалов не приводит к сколько-нибудь значительному изменению механических свойств сварных соединений по сравнению с ЭЛС. Сварные соединения, выполненные двусторонней сваркой и однопроводной ЭЛС, имеют идентичное повышение прочности и снижение пластич-

ности металла шва по сравнению с основным металлом для стали 20К на 40 и 30%, а для стали 10Х17Н13М2Т механические свойства практически не изменяются. Для алюминиевого сплава АМг6 происходит снижение прочности и повышение пластичности металла шва по сравнению с основным металлом на 10 и 9%.

Металлографические исследования образцов показали, что двусторонняя сварка не приводит к сколько-нибудь значительным структурным изменениям в сварных соединениях по сравнению с ЭЛС.

#### Общие выводы и результаты работы

1. Существующие технологические приемы ЭЛС со сквозным проплавлением не всегда обеспечивают требуемое формирование сварных соединений, имеют повышенную трудоемкость, а в ряде случаев - ограниченное применение. Использование при ЭЛС со сквозным проплавлением с обратной стороны стыка дугового разряда в вакууме может расширить технологические возможности данного метода сварки и снизить вероятность дефектов формирования типа непроваров, несплавлений и подрезов.

2. Из условий технологичности и экономичности для двусторонней одновременной сварки совместно с электронным пучком наиболее приемлемым по своим характеристикам является дуговой разряд с полым катодом.

3. Дуговой разряд является интенсивным источником магнитного поля, взаимодействие которого с электронным лучом приводит к изменению его траектории. Составляющие магнитной индукции, приводящие к отклонению электронного луча из области стыка, взаимно компенсируются при симметричном относительно плоскости стыка распределении токов дуги, что достигается при симметричном относительно плоскости стыка расположении заземлений.

4. При двусторонней сварке дуговой разряд расширяет парогазовый канал в корневой части, при этом силы, обусловленные воздействием электронного луча и дугового разряда на жидкий металл, имеют противоположное направление, в результате чего стабилизируются гидродинамические процессы в канале проплавления, снижается разбрызгивание и повышается устойчивость расплавленного металла против вытекания в широком диапазоне параметров режимов.

5. Условия формирования сварных соединений при двусторонней сварке определены соотношением мощностей двух источников теплоты, изменение которого приводит к нарушению баланса сил, действующих на сварочную ванну, в результате чего происходит изменение условий переноса метал-

ла, а равновесие расплава восстанавливается за счет сил поверхностного натяжения.

6. Разработана технология двусторонней сварки стыковых соединений горизонтальным и вертикальным швами на вертикальной стенке сталей и сплавов толщиной до 25 мм, обеспечивающая получение качественных сварных соединений за один проход (положительное решение по заявке на патент на изобретение № 96124599/02 от 13 ноября 1997г.).

7. Механические испытания и металлографические исследования образцов из сталей и алюминиевого сплава, сваренных ЭЛС и разработанной технологией, показали, что двусторонняя сварка не приводит к сколь угодно значительному ухудшению механических свойств и структурным изменениям в сварных соединениях по сравнению с ЭЛС. Разработанная технология двусторонней сварки использовалась при изготовлении сварных столов холодильников-сублиматоров из алюминиевого сплава АМгб толщиной 15 мм.

Основное содержание работы отражено в следующих работах:

1. Зуев И.В., Драгунов В.К., Хисматуллин Р.Н. Двусторонняя сварка электронным лучом и дуговым разрядом в вакууме // Сварочное производство. - 1996.- № 10.- С. 2-3.

2. Zuev I.V., Dragunov V.K., Khismatullin R.N. Two-sided electron beam and vacuum arc discharge welding // Welding International. - 1997. - 11 ( 4 ). - P. 299-301.

3. Хисматуллин Р.Н. Повышение качества формирования швов при ЭЛС // Новые материалы и технологии: Сб. статей. - М., 1997.- С. 156.

4. Зуев И.В., Драгунов В.К., Хисматуллин Р.Н. Источник теплоты при двусторонней электронно-лучевой и дуговой сварке // Теплофизика технологических процессов: Сб. статей. - Рыбинск, 1996. - Часть II.- С. 48-49.

5. Положительное решение по заявке на патент на изобретение № 96124599/02, Россия МПК В 23 К 15/00, 15/02. Способ сварки / И.В. Зуев, В.К. Драгунов, Р.Н. Хисматуллин; Заявлено 30.12.96г..

6. Хисматуллин Р.Н. Некоторые вопросы двусторонней электронно-лучевой и дуговой сварки в вакууме // Современные проблемы сварочной науки и техники: Сб. статей. - Воронеж, 1997. - С. 105-106.

7. Драгунов В.К., Хисматуллин Р.Н. Формирование сварных соединений при двусторонней одновременной сварке электронным лучом и дуговым разрядом // Сварочное производство. - 1998. - №2. - С. 11-14.

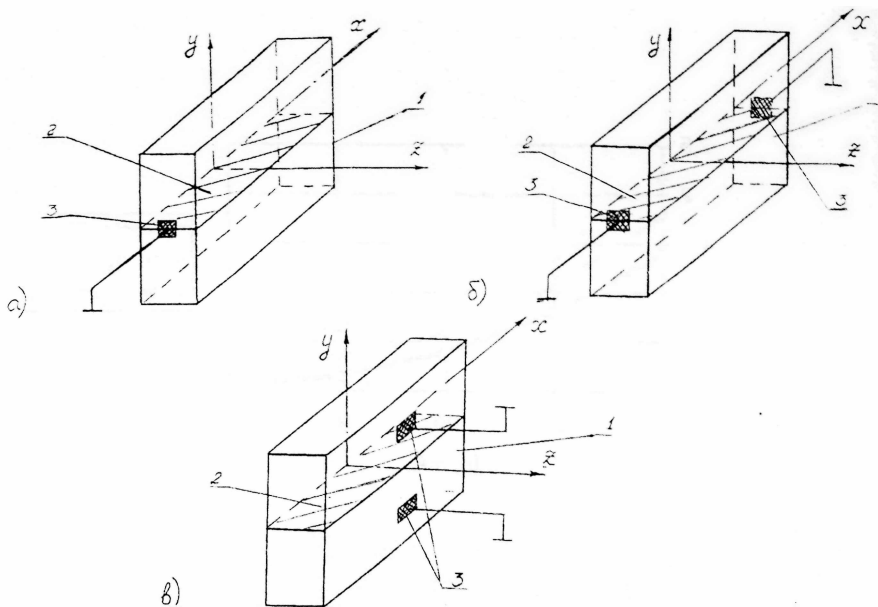


Рис. 1. Схемы расположения заземлений при сварке: 1 - свариваемые образцы; 2- плоскость стыка; 3 - места заземлений.

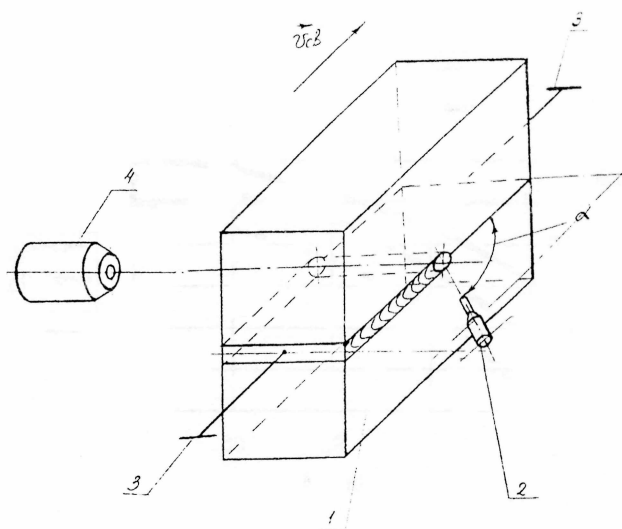


Рис. 2. Схема двусторонней сварки: 1 - свариваемое изделие; 2- горелка для дуговой сварки; 3 - заземления; 4 - электронно-лучевая пушка;  $\alpha$  - угол наклона оси горелки.

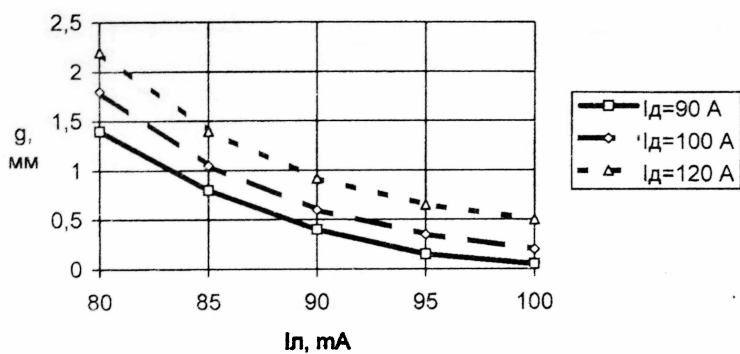


Рис. 3. Влияние параметров двусторонней сварки на формирование выпуклости лицевой стороны шва при двусторонней сварке алюминиевого сплава АМг6

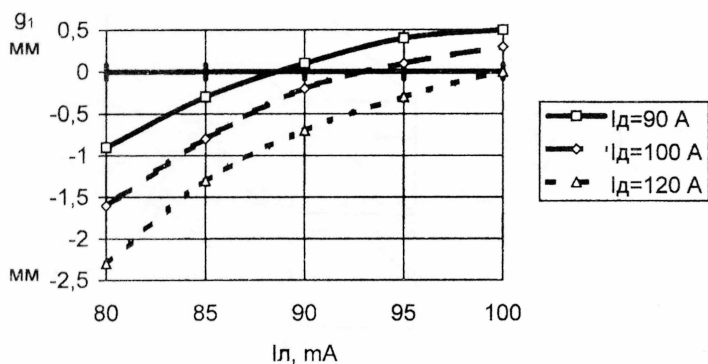


Рис. 4. Влияние параметров двусторонней сварки на формирование выпуклости (вогнутости) обратной стороны шва при двусторонней сварке алюминиевого сплава АМг6