DOI: 10.25515/PMI.2018.1.84

УДК 621.791.722

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛС ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИЗГОТОВЛЕНИЮ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Е.И.ПРЯХИН[1], **Н.И.ШАРОНОВ**[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Центральный научно-исследовательский институт материалов, Санкт-Петербург, Россия*

Рассмотрены существующие проблемы электронно-лучевой сварки конструкций из алюминиевых сплавов. Для исследований использовался алюминиево-магниевый сплав марки 1561 толщиной до 60 мм.

Исследовано тепловое поле в зоне термического влияния экспериментально и аналитически на основе метода конечных элементов (программа «Ansys»). Изучено влияние на качество швов формы движения (сканирования) электронного луча и поверхности свариваемых деталей. На основе металлографических исследований и механических испытаний металла сварных соединений доказано, что высокое качество сварных соединений обеспечивается при движении луча по кривой типа «сжатая скоба». Для управления электронным лучом разработан специальный генератор, который позволяет реализовать новый вид сканирования (сжатая скоба). Изложены основы технологии сварки сплава 1561 толщиной до 60 мм. Даны конкретные рекомендации и предложены две новые методики, которые позволят успешно использовать разработанную технологию на заводах при производстве новой продукции и при ремонте.

Приведены примеры и анализ термических циклов, полученных расчетным путем и экспериментальным способом. Установлены закономерности распределения тепла по траектории движения луча при различных видах сканирования. Рассмотрены основные виды дефектов формирования шва и образующихся в металле шва в процессе кристаллизации. Показана их взаимосвязь с параметрами режима сварки.

***Ключевые слова*:** электронно-лучевая сварка, термическое влияние, электронный луч, сварные соединения, сплав 1561, алюминиевый сплав

***Как цитировать эту статью*:** Пряхин Е.И. Основные положения и проблемы технологии ЭЛС применительно к изготовлению конструкций из алюминиево-магниевых сплавов / Е.И.Пряхин, Н.И.Шаронов // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 84-91. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.84

Введение. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) алюминиевых сплавов отличается от дуговых способов сварки существенно меньшим тепловложением. При этом сварные соединения имеют узкие швы и небольшие размеры зоны термического влияния (ЗТВ), в которых не исключена возможность структурных и фазовых превращений металла, приводящих к снижению свойств сварного соединения [7]. В связи с этим представляют значительный интерес температурно-временные условия ЭЛС, которые оценены и проанализированы на примере сварки сплава 1561, по результатам экспериментальных исследований, выполненных контактным методом (СПбГМТУ, 2011 г.).

Методика. Сварку пластин выполняли на установке ЭЛУ-20А. Режим сварки при основных технологических параметрах приведен ниже:

Параметр	$U_{уск}$, кВ	$I_л$, мА	$I_ф$, мА	$I_б$, мА	$V_{св}$, м/ч	f, Гц (A, мм)	$l_{п-д}$, мм
Сварные соединения толщиной 20 мм	60	80	757	32-33	21	440 (3,5)	180

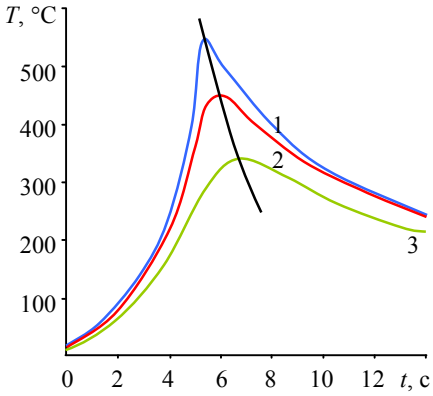


Рис.1. Термические циклы в точках, удаленных от оси шва на расстояние 3 мм (1); 5 мм (2) и 12 мм (3)

Термопары располагали в основном металле на глубине, равной половине его толщины, на расстоянии 3, 5, 12, 20, 30 и 60 мм от оси перемещения источника тепла (рис.1). Спаи термоэлектродов приваривали ко дну отверстий импульсно-емкостным разрядом. Для контроля положения спаев относительно оси отверстий образцы разрезали по соответствующим сечениям после сварки и измеряли на микроскопе МБС-2 с точностью до 0,01 мм.

Результаты и обсуждение. На рис.1 представлены термические циклы в разноудаленных точках от оси шва (3, 5 и 12 мм). Анализ кривых распределения максимальных температур (рис.2) при ЭЛС алюминиевого сплава толщиной 20 мм показывает, что ширина зоны термического влияния, ограниченная половиной изотермы с температурой

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.84*

300-330 °С, составляет 5-10 мм и соответствует области, установленной по результатам металлографического анализа.

Максимальные температуры являются важной характеристикой теплового вложения в околошовную зону свариваемого металла, так как от нее зависит окончательная, послесварочная структура металла ЗТВ и, соответственно, свойства сварного соединения в целом [3, 6].

Кроме экспериментального метода определения температур в околошовной зоне при ЭЛС сплава 1561 с помощью термопар для разверток луча «круговая» и «сжатая скоба», было выполнено численное исследование влияния характера траектории электронного луча на параметры нестационарного теплового поля при ЭЛС в вакууме с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и программы «Ansys» [2, 10]. В качестве исходных данных для расчета использованы данные режима сварки и свойства сплава 1561 в зависимости от температуры, показанные ниже:

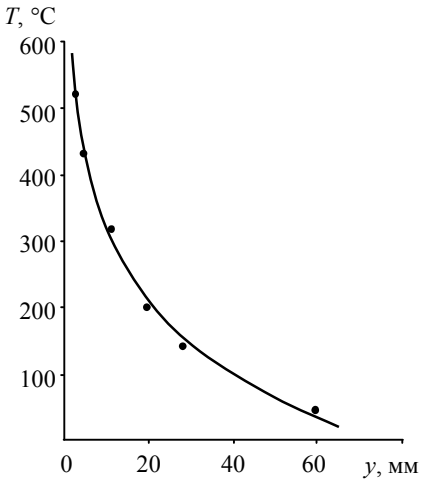


Рис.2. Кривая распределения максимальных температур при ЭЛС сплава 1561 толщиной 20 мм

T, °C	20	100	200	300	400	500	600
λ, Вт/(м·К)	117,3	121,5	125,7	129,9	138,3	146,7	155
$\sigma_{0,2}$, МПа	180	160	150	90	20	10	10
E, МПа	72000	70000	6500	5600	4500	3000	1000
α, $К \cdot 10^{-6}$	23,1	24,1	25	26	27	28	28,5
$c_р$, Дж/(кг·К)	0,84	0,92	1,01	1,05	1,09	1,11	1,14

Свойства сплава: λ – коэффициент теплопроводности; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; E – нормальный модуль упругости; α – коэффициент линейного расширения; $c_р$ – теплоемкость.

При указанных входных параметрах модели совпадение результатов расчета и экспериментальных работ по определению температурных полей околошовной зоны признано удовлетворительным (рис.3).

Применительно к конкретной технологии важным моментом исследований является распределение энергии электронного луча (ЭЛ) по выбранной траектории. Установлено, что изменение знака скорости на концах развертки «сжатая скоба» и наложение при этом «следов» луча друг на друга приводит к тому, что вложение энергии ЭЛ в металл на кромках стыка выше, чем в середине шва (рис.4).

Существующая интенсификация прогрева инициирует увеличение времени нахождения расплавленного металла сварочной ванны в жидком состоянии, что позволяет газовым пузырям выйти на поверхность. Кроме этого, принятая развертка обеспечивает получение плавного пере-

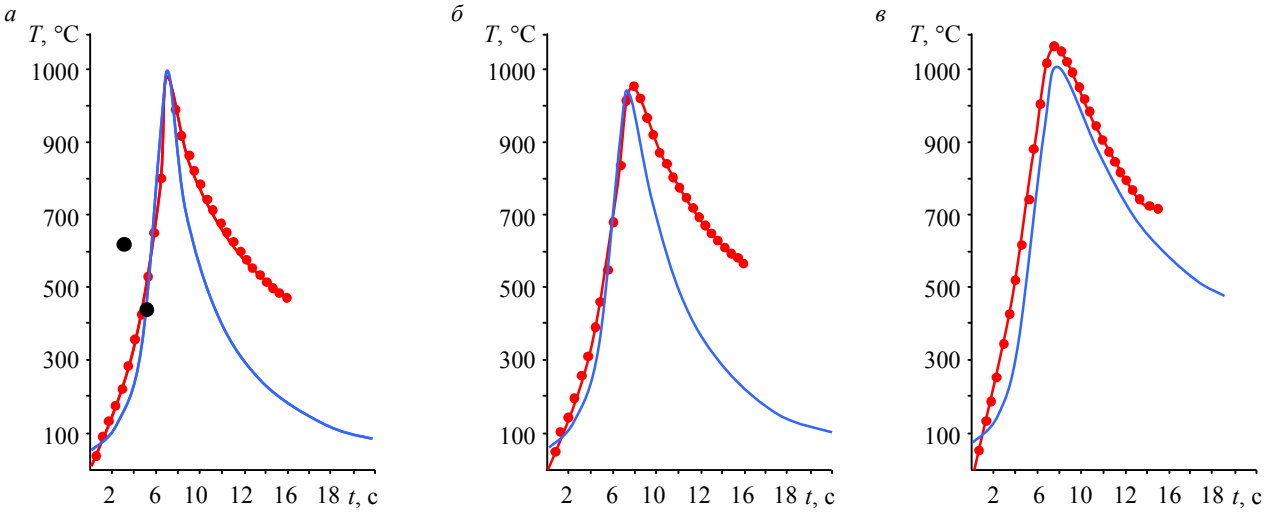


Рис.3. Температурные циклы в контрольных точках (синие – расчетные). Расстояния от оси шва 3 мм (*а*); 5 мм (*б*); 12 мм (*в*)

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.84*

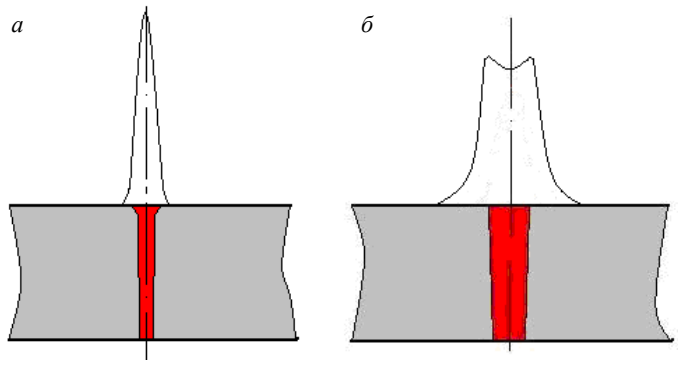


Рис.4. Распределение энергии луча в зоне расплавления при стационарном луче (*а*); при луче с разверткой «сжатая скоба» (*б*)

хода от металла шва к основному металлу – это является важным моментом при эксплуатации сварных конструкций с остающейся выпуклостью сварного шва.

Для реализации технологии ЭЛС с применением развертки «сжатая скоба» был разработан специальный генератор управления разверткой (ГУР). Длительное применение развертки «сжатая скоба» в производственных условиях показало отсутствие пор в зоне сплавления, что, например, наблюдалось при применении наиболее распространенной и легко реализуемой «круговой» развертки.

В приборе управления электронным лучом при сварке ГУР реализован принцип получения разверток различной формы посредством подачи на электромагнитные отклоняющие катушки электронной пушки синусоидальных напряжений, сдвинутых по фазе на 90°. Создавая в каждой катушке различные комбинации синусоидального и выпрямленного напряжений, можно получать разнообразные формы развертки, например, эллипс, дугу с возвратом по диаметру и др.

Развертка электронного луча относительно стыка по различным траекториям применяется при сварке швов разной конфигурации и для различных толщин свариваемых материалов [1, 4, 5, 8, 11, 12]. Она позволяет в широких пределах регулировать параметры сварных швов, скорость переноса и кристаллизации жидкого металла сварочной ванны, повышать плотность швов, уменьшать или вообще исключать вероятность возникновения корневых дефектов (рис.5), а также снижать требования к точности сборки деталей и изготовлению технологической оснастки.

Прибор ГУР предназначен для развертки луча по четырем траекториям:

- линейной (по одной из координатных осей);
- эллипсу с независимой регулировкой по обеим осям (частный случай – окружность);
- полуэллипсу с возвратом по той же траектории («скоба»);
- полуэллипсу с возвратом по одной из координатных осей, позволяет регулировать частоту развертки и амплитуду по осям *X*, *Y*, поворачивать изображение на угол, кратный 90°.

Основу прибора составляет квадратурный генератор гармонических колебаний, вырабатывающий три синусоидальных напряжения с фазовым сдвигом 0, 90, 180°. Схема «мягкого» ограничения напряжения амплитуды обеспечивает стабилизацию генератора на уровне ±7,5 В и пренебрежимо малый коэффициент нелинейных искажений сигналов. С выхода генератора напряжения поступают на переключатель формы развертки, а напряжения с фазовым сдвигом 0 и 180° – еще и через двухполупериодный выпрямитель. Благодаря малому напряжению отсечки герма-

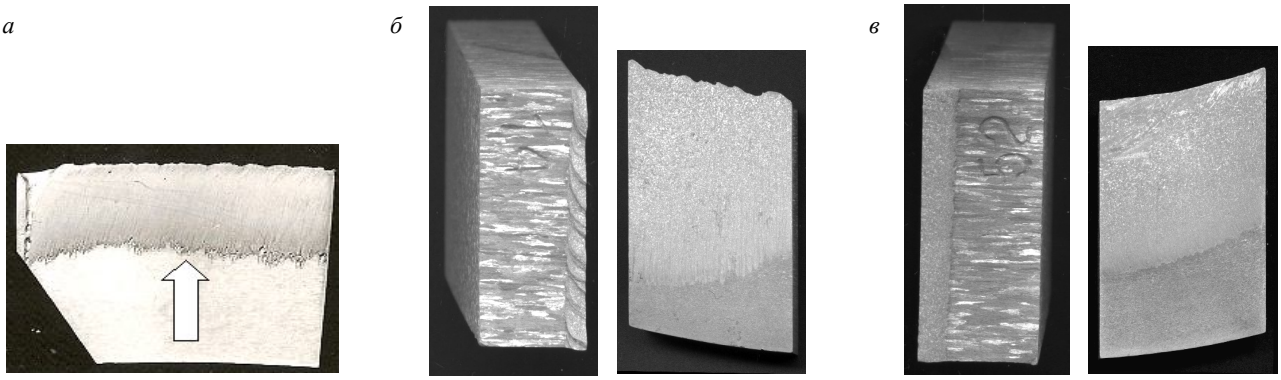


Рис.5. Макрошлиф продольного разреза сварного шва (*а*), выполненного ЭЛС стационарным лучом с неполным проплавлением на алюминиевом сплаве 1561 с корневым «пилообразным» дефектом; поверхность сварного шва, выполненного с «круговой» разверткой, и макрошлиф его продольного разреза (*б*); поверхность сварного шва, выполненного с разверткой «сжатая скоба», и макрошлиф его продольного разреза (*в*)

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.84*

ниевых диодов и большому уровню выходного сигнала генератора, искажения сигнала при перемене полярности практически незаметны, что позволяет отказаться от сложного прецизионного выпрямителя.

С переключателя формы развертки сигналы по двум каналам поступают на регуляторы уровней *X* и *Y*, а с них через переключатель поворота изображения развертки на 90° – на усилители тока *X* и *Y*. Выходной каскад усилителей тока, выполненный по схеме с общим эмиттером (ОЭ) и охваченный местной отрицательной обратной связью (ООС), позволяет полнее использовать напряжение источника питания и получать амплитуду выходного напряжения, превышающую амплитуду сигнала на выходе операционного усилителя.

а *б*

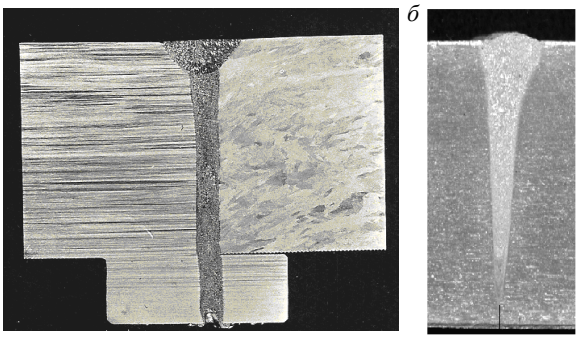


Рис.6. Макрошлифы сварных соединений алюминиевых сплавов с полным (*а*) и неполным (*б*) проплавлением, толщина 40 мм

Схема прибора, разработанная на современной элементной базе, обеспечивает плавное изменение амплитуды и частоты. Форма развертки и ее параметры контролируются визуально по экрану осциллографа. Ручки управления вынесены на лицевую панель прибора. Конструктивно прибор выполняется либо в настольном варианте, либо при необходимости встраивается в стойку управления электронно-лучевой аппаратурой типа У250А или ЭЛА60/60. Он может быть использован в комплекте с любой электронно-лучевой аппаратурой для сварки различных металлов.

Надежность прибора подтверждена успешной эксплуатацией в производственных условиях при сварке изделий из алюминиевых сплавов, однородных и разнородных материалов толщиной до 60 мм.

Промышленная технология ЭЛС должна обеспечивать воспроизведение параметров сварных швов, соответственно, их механических свойств, что является важным моментом для оценки работоспособности сварной конструкции. Наиболее предпочтительной формой швов при сквозном проплавлении являются швы с параллельными стенками, что значительно снижает угловые деформации (рис.6). При расчете параметров режима для швов с неполным проплавлением используется размер глубины необходимого проплавления.

В перечень основных технологических характеристик процесса электронно-лучевой сварки входят: $U_{уск}$ – ускоряющее напряжение, кВ; $I_л$ – ток луча, мА; $I_ф$ – ток фокусирующей линзы, мА; $I_б$ – ток бомбардировки, мА; $V_{св}$ – скорость сварки, м/ч; $l_{п\text{-}д}$ – рабочее расстояние «пушка – деталь», мм; f – частота развертки, Гц.

В качестве дополнительных параметров ЭЛС используются: $I_п$ – проходящий ток луча, мА; $I_{ф\ min(\cdot)}$ – ток фокусирующей линзы – минимальная точка (наименьший диаметр луча) на поверхности свариваемого металла, мА; $Ф_р$ – форма развертки; A_y – амплитуда по оси *Y*; A_x – амплитуда по оси *X*.

Основные положения технологии, которые обязательно должны соблюдаться, заключаются в следующем: подготовка металла под ЭЛС; выбор положения сварочной ванны в пространстве; выбор режимов ЭЛС; определение способа начала и конца шва при реализации процесса ЭЛС (в том числе учет особенностей сварки кольцевых швов); определение способов ремонта дефектных швов ЭЛС.

Подготовка металла под сварку является определяющим фактором получения качественных сварных соединений алюминиевых сплавов [9, 13]. В первую очередь необходимо обеспечить удаление окисной пленки Al_2O_3 (температура плавления 2060 °С), которая затрудняет образование общей ванны и при попадании в шов снижает статическую и циклическую прочность сварного соединения. Непосредственно перед загрузкой в камеру свариваемые кромки шабрятся до удаления следов механической обработки.

Весьма важной операцией является удаление плакировки, которая при попадании в шов также снижает статическую и циклическую прочность сварного соединения и образование общей сварочной ванны. Плакировка удаляется глубоким травлением с последующим шабрением или шабрением.

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.84*

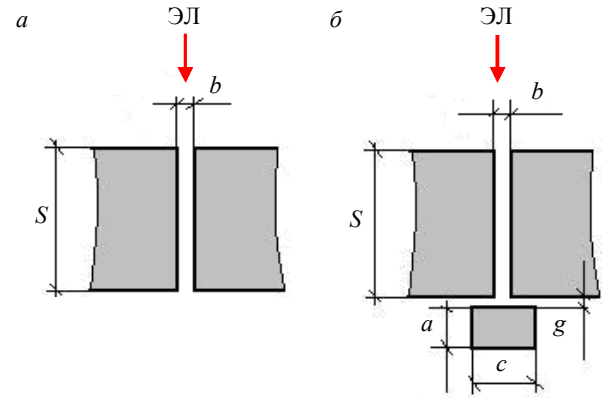


Рис.7. Схемы сварки вертикальным лучом:
а – $S \le 20$ мм (*а*); *б* – любые толщины сварных соединений

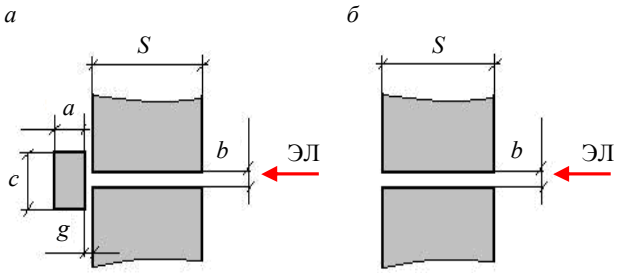


Рис.8. Схемы сварки горизонтальным лучом:
а – $S \le 20$ мм; *б* – любые толщины сварных соединений

Одно из важнейших условий успешной реализации технологии ЭЛС – выбор положения сварочной ванны. В зависимости от свариваемой толщины металла определено положение сварочной ванны – вертикальное или горизонтальное.

Вертикальным лучом (вертикальное положение сварочной ванны) качественные сварные швы достаточно легко получать до толщины металла 20 мм включительно без технологической подкладки (рис.7). Удержание металла «на весу» происходит за счет жесткого термического цикла и высокой скорости кристаллизации. Следует иметь в виду, что увеличение скорости свыше 50-60 м/ч может привести к появлению пор в сварном шве и на границе сплавления. Наличие технологической подкладки (сварка без ее проплавления) упрощает технику выполнения сварного шва.

Толщины свыше 20 мм предпочтительно сваривать по схеме «горизонтальным лучом на вертикальной стенке» (рис.8) со сквозным проплавлением (при наличии подкладки – например, соединение «в замок», подкладка для гарантированного исключения корневых дефектов проплавляется). Контроль – по проходящему току луча.

Разработаны пять основных стыковых соединений под ЭЛС (рис.9).

В процессе исследований разработаны две расчетно-графические методики, позволяющие с достоверностью 95-98 % получать сварные швы практически с параллельными стенками проплавления за счет постоянства параметров режима ЭЛС, невзирая на то, на старой или новой таблетке (катоде) производится сварка.

С помощью первой методики устанавливается необходимая и достаточная величина тока луча для сварки конкретной толщины металла, при этом оптимизируется тепловая нагрузка на

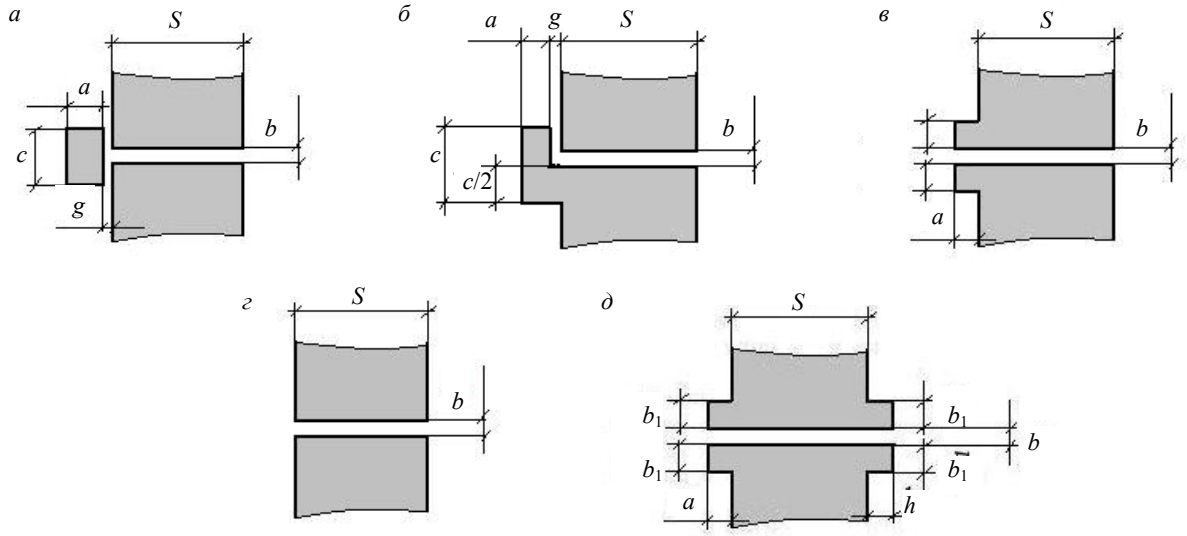


Рис.9. Конструктивное оформление стыковых соединений под ЭЛС:
а – на удаляемой подкладке; *б* – на остающейся подкладке «в замок»; *в* – с увеличенным сечением шва за счет уступов на кромках основного металла корневой части соединения; *г* – стандартное стыковое соединение; *д* – стыковое соединение с увеличенным сечением на входе и выходе электронного луча

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.84*

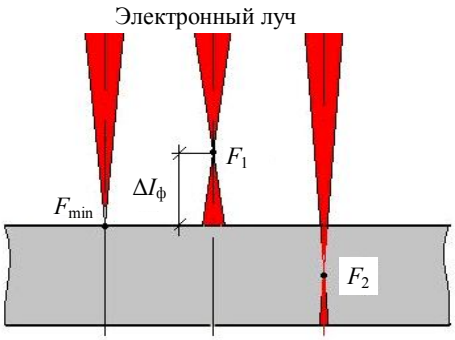


Рис.10. Перефокусировка электронного луча $+\Delta I_ф(F_1)$

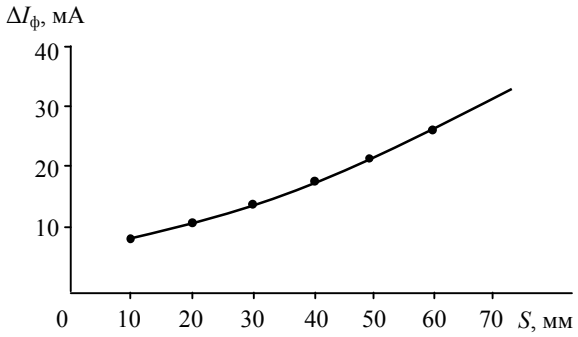


Рис.11. График зависимости величины перефокусировки луча от толщины свариваемого металла

катод, продлевая ресурс его работы. В основу первой методики положено определение оптимального температурного режима работы катода для получения минимально необходимой величины тока электронного луча для конкретной толщины свариваемого металла,

$$N \geq kSV,$$

где N – минимальная расчетная мощность электронного пучка, кВт; S – расчетная площадь сечения сварного шва, мм^2; V – скорость сварки, мм/с; k – коэффициент мощности, для алюминия и его сплавов k = 0,014-0,016 кВт (с/мм^3).

При получении численной величины минимального тока бомбардировку следует увеличить на 20-25 % для исключения отравления таблетки парами металлов – правило сварки алюминия и его сплавов. Одновременно увеличивается и величина тока сварки (запас). Этим приемом повышается срок ее работоспособности (ресурса). Процедура повторяется перед каждой сваркой, независимо от использования старой или новой таблетки.

Вторая методика позволяет установить фокальную плоскость (фокус) в середине толщины свариваемого металла, что является основным условием получения сварных швов с параллельными стенками. Во второй методике используются параметры «минимальной точки» $I_{ф\ min(\cdot)}$ при заданном расстоянии «пушка-деталь», равном 180 мм (рис.10). После определения величины $I_{ф\ min(\cdot)}$ на поверхности свариваемого металла по предварительно построенному графику (рис.11) находится величина перефокусировки $+\Delta I_ф$. Затем сваривается образец-свидетель, который является основанием для дальнейшего использования того или иного режима сварки. В зависимости от положения фокуса изменяется форма шва (рис.12).

С применением этих методик были сварены контрольные сварные соединения толщинами 20, 40 и 60 мм для их комплексных исследований.

Успех применения технологии ЭЛС зависит от того, насколько отработан способ «начала – окончания» сварки (рис.13). При сварке кольцевых швов следует учитывать, насколько качественно выполняется замыкание шва. Отработанный способ сварки кольцевого шва предполагает использование ряда технологических приемов, которые в технологию входят в виде блока «начало – окончание» сварки.

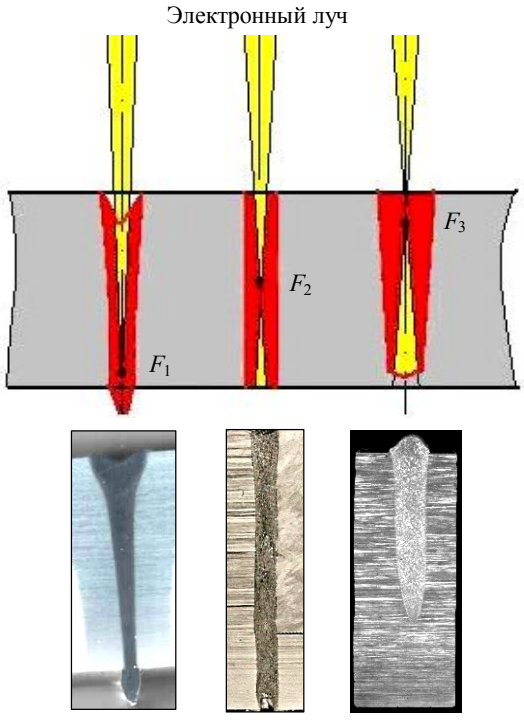


Рис.12. Изменение формы шва в зависимости от положения фокуса F

Выводы

1. Предпочтительным видом развертки для сварки алюминиевых сплавов является развертка «сжатая скоба». Симметричность сканирования ЭЛ при развертке

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.84*

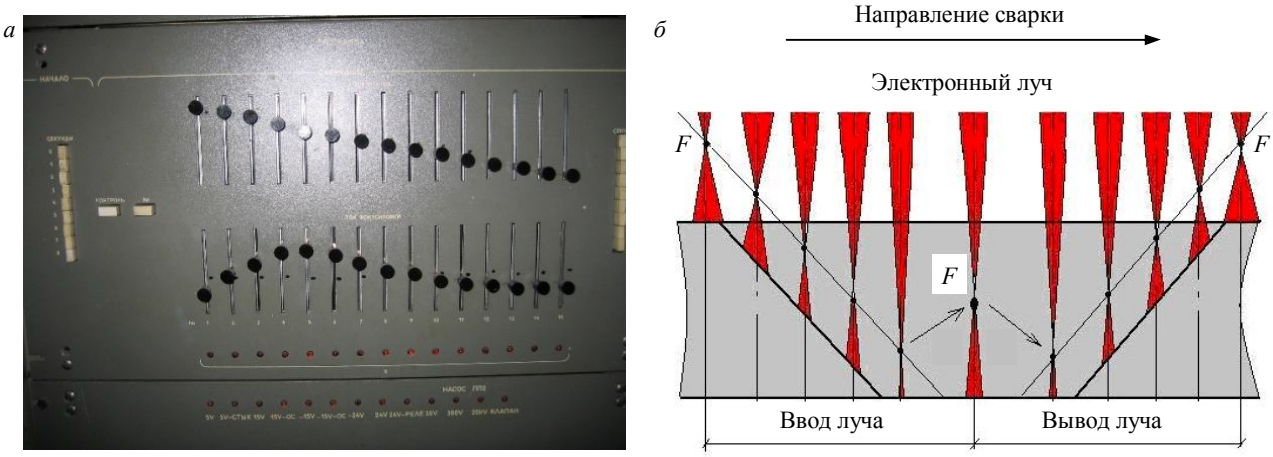


Рис.13. Блок «начало – окончание» сварки аппаратуры ЭЛА-60 (*а*) по схеме «ввода – вывода» электронного луча (*б*)

«сжатая скоба» обеспечивает более равномерный проплав и большую параллельность стенок сварного шва. Применение развертки «сжатая скоба» в силу специфики ее траектории (более высокое тепловложение на кромках и более пологий спад температуры T_{max}) практически полностью исключает порообразование на линии сплавления и в сварном шве. Для реализации развертки «сжатая скоба» разработан генератор управления разверткой ГУР.

2. Предложены варианты различных типов сварных соединений для ЭЛС конструкций из алюминиевых сплавов.

Для получения качественных сварных соединений необходима тщательная подготовка металла под сварку в части удаления оксидной пленки и плакирующего слоя из зоны сварного шва механическим путем, химическим травлением.

Непосредственно перед загрузкой в рабочую камеру свариваемые кромки обязательно должны шабриться до удаления следов предыдущей обработки.

3. Определяющим фактором при ЭЛС со сквозным проплавлением является положение фокуса в толщине свариваемого металла – сварной шов с параллельными стенками – фокус в середине толщины. Отправной точкой для реализации этого требования технологии является величина тока фокусирующей линзы при минимальной точке (минимальном диаметре электронного луча на поверхности металла). Разработаны две расчетно-графические методики, облегчающие получение сварных швов со сквозным проплавлением высокого качества.

4. Разработанная технология ЭЛС сплава 1561 обеспечивает высокие прочностные характеристики сварного соединения (0,96-1,00 от фактической прочности основного металла). Технология реализована при строительстве корпусных конструкций – крыльевых устройств «СПК Олимпия».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Акопьянц К.С.* Влияние круговой развертки электронного луча на предотвращение корневых дефектов при сварке / К.С.Акопьянц, Г.А.Шилов / Международная конференция по электронно-лучевой технологии. Варна, 1985. София, 1985. С. 229-234.

2. *Беленький В.Я.* Развертка электронного пучка по Х-образной траектории как средство уменьшения дефектов в корне шва при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. 1986. № 9. С. 35-37.

3. *Бондарев А.А.* Свариваемость сплава АМг6 электронным лучом в различных пространственных положениях / А.А.Бондарев, Д.М.Рабкин, О.С.Кузьменок // Автоматическая сварка. 1976. № 12. С. 34-37.

4. *Борисова Н.В.* Формирование систем «Алюминий – оксид алюминия» при термообработке наноразмерных слоев алюминия / Н.В.Борисова, В.П.Морозов, Г.О.Еремеева // Ползуновский вестник. 2009. № 3. С. 240-244.

5. *Кайдалов А.А.* Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Киев: Экотехнология, 2004. С. 177-178.

6. *Миткевич Е.А.* К модели теплового источника при ЭЛС / Е.А.Миткевич, Д.И.Иванов, Г.А.Туричин // ФиХОМ. 1989. № 3. С. 109-111.

7. *Патон Б.Е.* Современное состояние и новые технологии электронно-лучевой сварки конструкций / Б.Е.Патон, А.А.Бондарев // Автоматическая сварка. 2004. № 11. С. 23-30.

8. Прибор управления электронным пучком при сварке // А.М.Васильев, В.А.Гончаров, Б.Г.Кривков, В.В.Солянкин, Н.И.Шаронов // Судостроительная промышленность. Серия «Сварка». 1988. Вып. 6. С. 11-12.

9. *Рабкин Д.М.* Особенности электронно – лучевой сварки алюминиевых сплавов / Д.М.Рабкин, Н.М.Воропай, А.А.Бондарев // Автоматическая сварка. 1971. № 2. С. 48-52.

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.84*

10. *Язовских В.Я.* Влияние развертки луча на формирование макроструктуры металла шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / В.Я.Язовских, Т.В.Ольшанская // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика и технология материалов и конструкций. 1999. № 2. С. 225-235.

11. *Arata V.* Fundamental feature of advanced laser and electron beam technology // 4th CISFFIL. Cannes. 1988. P. 21-41.

12. Penetration mechanism of electron beam Welding and spiking phenomenon / C.l.Mara, E.R.Funk, R.C.McMaster, P.E.Pence // Welding Journal. 1974. Vol. 53. № 6. P. 246-251.

13. Residual stresses induced by electronbeamwelding in a 6061 aluminium alloy / V.Robin, T.Pirling, X.Boulnat, M.Perez // Journal of Materials Processing Technology. 2016. Vol. 235. P. 1-12.

Авторы: **Е.И.Пряхин,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *mthi@spmi.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **Н.И.Шаронов,** *начальник лаборатории электронно-лучевой сварки*, *mthi@shmi.ru* (*Центральный научно-исследовательский институт материалов*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 20.11.2016.