

**В.П. Сидоров**  
**А.В. Мельзитдинова**

# **ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОБОРУДОВАНИЕ**



Тольятти  
Издательство ТГУ  
2013

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт машиностроения  
Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением  
и родственные процессы»

В.П. Сидоров, А.В. Мельзитдинова

**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА.  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
И ОБОРУДОВАНИЕ**

Учебное пособие

Тольятти  
Издательство ТГУ  
2013

УДК 621.791

ББК 30.61

C592

Рецензенты:

главный сварщик ООО «Тольяттиэнергоремонт»,  
канд. техн. наук, доцент *В.А. Иевлев*;  
заслуженный деятель науки Российской Федерации,  
д-р техн. наук, профессор Тольяттинского государственного  
университета *Б.Н. Перевезенцев*.

**C592** Сидоров, В.П. Электронно-лучевая сварка. Технологические особенности и оборудование : учеб. пособие / В.П. Сидоров, А.В. Мельзитдинова. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. – 96 с. : обл.

В пособии приведено описание сущности процесса электронно-лучевой сварки (ЭЛС) и его основных параметров, указаны требования к подготовке деталей к сварке и сборке, основные технологические особенности сварки различных материалов, причины возникновения дефектов и меры борьбы с ними. Рассмотрены вопросы расчета тепловых процессов при ЭЛС. Даны сведения о параметрах сварочного оборудования. Описано задание на расчетную самостоятельную работу по определению средней ширины шва при ЭЛС. Приведен пример выполнения самостоятельной работы.

Предназначено для студентов, обучающихся по очной и заочной форме направления подготовки 150700.62 «Машиностроение» (профиль «Оборудование и технология сварочного производства»).

УДК 621.791

ББК 30.61

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

ISBN 978-5-8259-0758-1 © ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) является одним из наиболее высокотехнологичных и высокопроизводительных способов сварки. Развитие ЭЛС началось с исследований, проведенных в 1950–1957 гг. в ФРГ, Франции и США. Первое сообщение об ЭЛС (применительно к кожухам топливных элементов ядерных реакторов) опубликовано в ноябре 1957 года. Для этого способа сварки, как правило, не используют расходные сварочные материалы (проволоку, электроды, флюсы, защитные газы). По эксплуатационным расходам сварка электронным лучом в вакууме существенно дешевле дуговой сварки в камерах с контролируемой атмосферой. Все основные энергетические и геометрические параметры электронного пучка регулируются с высокой скоростью и быстродействием. Это позволяет вводить в металл точно дозированную энергию, реализовывать различные технологические приемы и обеспечивать высокую воспроизводимость процесса сварки. Можно производить сварку сложных конструкций в углублениях и труднодоступных местах.

Изучение способа ЭЛС включено в курс дисциплины «Специальные способы сварки», входящей в программу обучения студентов специальности 150202.62 «Оборудование и технология сварочного производства» и направления подготовки 150700.62 «Машиностроение». Оборудование для сварки весьма дорогостоящее, одна установка стоит несколько миллионов рублей. Имеющаяся на кафедре «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» ТГУ в настоящее время установка может использоваться только в качестве макета, выполнение на ней реальных лабораторных работ не представляется возможным. Тем не менее это не снимает задачи по обеспечению высокого качества учебного процесса, обучения студентов основным умениям и навыкам по электронно-лучевой сварке. Данное пособие, по мнению авторов, в значительной степени позволяет решить эту проблему. В нем приведены данные по техническим характеристикам современного отечественного и зарубежного оборудования по ЭЛС. Предложена методика расчета основных параметров режима ЭЛС и на этой основе разработано задание для студентов на самостоятельную расчетную работу по

подбору подходящего для сварки оборудования или определению возможностей имеющегося оборудования. Такой подход до настоящего времени в отечественной учебной литературе не рассматривался. Пособие может быть особенно полезно для студентов заочной формы обучения, так как в нем дается не только порядок, но и пример выполнения контрольной работы.

## 1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА

При ЭЛС используется кинетическая энергия потока электронов, движущихся с высокими скоростями в вакууме. Для уменьшения потери кинетической энергии электронов за счет соударения с молекулами газов воздуха, а также для химической и тепловой защиты катода в электронной пушке создают вакуум порядка  $10^{-4} \dots 10^{-6}$  мм рт. ст. ( $1,333 \cdot 10^{-2} \dots 1,33310^{-4}$  Па). Сварка электронным лучом имеет значительные преимущества.

Во-первых, высокая концентрация ввода мощности в изделие, которая выделяется не только на поверхности, но и на значительной глубине в объеме основного металла. Фокусировкой электронного луча можно получить пятно нагрева диаметром  $2 \cdot 10^{-4} \dots 5$  мм, что позволяет за один проход сваривать металлы толщиной от десятых долей миллиметра до 200 мм. В результате можно получить швы, в которых соотношение  $\psi_n$  глубины к ширине провара достигает 20 и более. Появляется возможность сварки тугоплавких металлов (вольфрама, тантала и др.), керамики. Имеет место уменьшение ширины зоны термического влияния по сравнению с другими способами сварки плавлением, что в большинстве случаев повышает качество сварного соединения. Технологическую производительность способа сварки следует оценивать характеристикой, называемой авторами скоростью соединения при сварке

$$J = H_n \cdot V_c, \quad (1)$$

где  $V_c$  – линейная скорость сварки (скорость перемещения источника тепла по изделию), см/с;  $H_n$  – провар, см.

При ЭЛС этот показатель достигает примерно  $5 \text{ см}^2/\text{с}$ . Это в несколько десятков раз больше, чем при дуговых способах сварки. Такое повышение производительности достигается за счет равномерного выделения мощности на значительной глубине свариваемых деталей при высокой концентрации этой мощности.

Во-вторых, малое количество затрачиваемой энергии. Затраты характеризуются удельной энергией ( $\text{Дж}/\text{см}^2$ ), приходящейся на единицу площади образуемого соединения:

$$E = \frac{q_u}{J}, \quad (2)$$

где  $q_u$  – эффективная мощность электронного луча, Вт.

Поскольку эффективные мощности при ЭЛС близки к мощностям дуговой сварки, то благодаря высокой скорости соединения для получения равной глубины проплавления при ЭЛС требуется вводить энергии в 4...5 раз меньше, чем при дуговой сварке. В результате значительно снижаются сварочные остаточные напряжения и деформации изделия.

Эффективность способа сварки плавлением можно оценить показателем, которому авторы дали название частоты сварки. Дело в том, что при сварке плавлением обычно значительная мощность затрачивается нерационально на переплавление большого количества металла, чтобы обеспечить расплавление точек, наиболее удаленных от источника тепла. Поэтому используемый обычно показатель эффективности проплавления при сварке – термический КПД

$$\eta_m = \frac{q_{жс}}{q_u}, \quad (3)$$

где  $q_{жс}$  – мощность, расходуемая на плавление основного металла, нельзя признать удачным. Он может быть полезен при расчете площади проплавления основного металла, но не отражает эффективности расплавления для получения соединения. Частота сварки определяется выражением

$$f = \frac{J}{F_o}, \quad (4)$$

где  $F_o$  – площадь поперечного сечения основного металла.

Частота сварки показывает, сколько площадей проплавления основного металла сваривается за секунду в направлении сварки. Обратную величину будем называть периодом сварки. ЭЛС отличается высокими значениями частоты сварки по сравнению с другими способами сварки плавлением, что хорошо отражает ее специфику. В то же время термический КПД мало отличается от других способов сварки.

И наконец, в-третьих, вследствие сварки в высоком вакууме снижается насыщение расплавленного и нагретого металла газами.

Наоборот, в целом ряде случаев наблюдается дегазация металла шва и повышение его пластических свойств. В результате достигается высокое качество сварных соединений химически активных металлов и сплавов, таких как ниобий, цирконий, титан, молибден и др. Хорошее качество шва при электронно-лучевой сварке достигается также на низкоуглеродистых, коррозионно-стойких сталях, меди и медных, никелевых, алюминиевых сплавах.

Электронно-лучевая сварка рассматривается как наиболее перспективный способ соединения изделий из тугоплавких металлов; изделий из термически упрочнённых материалов, когда нежелательна, затруднена или невозможна последующая термообработка изделий после завершающей механической обработки при необходимости обеспечения минимальных сварочных деформаций; ряда толстостенных конструкций ответственного назначения.

При сварке электронным лучом проплавление имеет форму конуса (рис. 1). Плавление металла происходит на передней стенке кратера, а расплавляемый металл перемещается по боковым стенкам к задней стенке, где он и кристаллизуется.

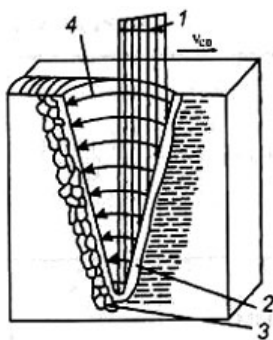


Рис. 1. Схема переноса жидкого металла при электронно-лучевой сварке:  
1 – электронный луч; 2 – передняя стенка кратера;  
3 – зона кристаллизации; 4 – путь движения жидкого металла

Проплавление при электронно-лучевой сварке обусловлено в основном давлением потока электронов, характером выделения теплоты в объеме твердого металла и реактивным давлением испаряющегося металла, вторичных и тепловых электронов и излу-



чением. В ряде случаев сварку ведут электронным лучом со стабильной мощностью. Однако при сварке легкоиспаряющихся металлов (алюминия, магния и др.) эффективность электронного потока и количество выделяющейся в изделии теплоты уменьшаются вследствие потери энергии на ионизацию паров металлов. В этом случае целесообразно сварку вести импульсным электронным лучом с большой плотностью энергии и частотой импульсов 100...500 Гц. В результате повышается глубина проплавления. При правильном выборе соотношения времени паузы и импульса можно сваривать очень тонкие листы. Благодаря теплоотводу во время пауз уменьшается ширина зоны термического влияния. Однако при этом возможно образование подрезов, которые могут быть устранены сваркой с поперечными колебаниями луча или расфокусированным лучом.

При формировании сварного шва возможно протекание двух типов процессов: периодическое испарение (с частотой до 10 кГц) и колебания жидкого металла в сварочной ванне за счет подплавления передней стенки (с частотой порядка 1...100 Гц). Применение высоких скоростей сварки обеспечивает минимальное термическое воздействие на свариваемый материал в околосшовной зоне, а высокие скорости кристаллизации при эффективном теплоотводе – получение высоких механических свойств сварных соединений.

ЭЛС применяется в различных отраслях промышленности. Она позволяет соединить за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 до 400 мм и обладает широкими технологическими возможностями.

Основные параметры процесса электронно-лучевой сварки – сила тока в луче  $I_n$ , ускоряющее напряжение  $U_n$ , скорость перемещения луча по поверхности изделия, продолжительность импульсов и пауз, степень фокусировки луча (ток фокусирующей линзы с указанием расстояния от фокусирующей линзы до поверхности детали), степень вакуумизации, параметры поперечных колебаний и др. (табл. 1, 2). Для перемещения луча по поверхности изделия используют перемещение изделия или (с помощью отклоняющей системы) самого луча. Отклоняющая система позволяет осуществлять колебания луча вдоль и поперек шва или по

сложной траектории. Низковольтные установки используют при сварке металла толщиной свыше 0,5 мм для получения швов с отношением глубины к ширине до 8:1. Высоковольтные установки применяют при сварке более толстого металла с отношением глубины к ширине шва до 25:1.

Высокое качество сварных соединений в изделиях достигается с помощью оптимальных конструктивных решений и технологических приемов сварки, выбор которых должны осуществлять совместно технолог-сварщик и проектант изделия. Критерием окончательного выбора при этом является наиболее низкая стоимость технологии сварки. При этом следует стремиться, чтобы сварочная операция была одновременно финишной сборочной. Знание арсенала технологических приемов и областей их применения является необходимым требованием к технологам-сварщикам.

Качество шва при ЭЛС, как и при любом способе сварки плавлением, определяется совокупностью заданных технологических и энергетических параметров процесса. Поддержание на стабильном уровне энергетических параметров процесса сварки обеспечивает при неизменных технологических условиях постоянство эксплуатационных параметров сварного соединения. Неправильный выбор режима или нарушение оптимального режима ЭЛС нередко приводят к появлению в швах дефектов даже и на хорошо свариваемых материалах. Некоторые дефекты могут возникать и при других способах сварки плавлением: непровары, подрезы, провисание шва и повышенное разбрызгивание. Однако при ЭЛС возможны и другие специфические дефекты: корневые дефекты, протяженные полости в объеме сварного шва, срединные трещины, отклонения сварного шва от стыка из-за остаточных или наведенных магнитных полей, периодическая бугристость сварного шва и периодические выплески расплава. Корневые дефекты шва – наиболее распространенный вид дефектов при сварке, они могут иметь место при сварке любых материалов, обычно с глубиной шва более 5 мм, в любом пространственном положении. Протяженные полости встречаются при сварке сталей, титановых и алюминиевых сплавов с глубиной шва более 15 мм. Срединные трещины имеют место лишь при сварке сталей.

Корневые дефекты заключаются в непостоянстве провара. Они имеют гидродинамическую природу образования и обусловлены неламинарным характером переноса расплава в сварочной ванне. Для предотвращения корневых дефектов необходимо формировать пародинамический канал с достаточно широкой нижней частью и закругленным дном. Изменение формы канала осуществляют регулированием распределения плотности мощности электронного пучка в зоне сварки. Механизм образования протяженных полостей в сварном шве до сих пор остается спорным. Они иногда сопровождаются аномальным расширением сварного шва в этом месте. Однако встречаются и аномальные расширения сварного шва без полостей в них. Для снижения вероятности образования протяженных полостей рекомендуют сварку на небольших скоростях (до 3 мм/с).

Характерной особенностью срединных трещин является их расположение по оси сварного шва на линии стыковки кристаллитов, растущих навстречу друг другу от противоположных боковых границ литой зоны. Срединные трещины располагаются преимущественно в нижней и иногда в средней частях сварного шва. Их высота обычно составляет 2...15 мм, а ширина 0,1...0,3 мм. По своей природе они являются широкими продольными кристаллизационными трещинами, причина возникновения которых – скопление в центральной зоне сварного шва легкоплавкой эвтектики типа FeS–Fe. По мере расширения сварного шва, а также при появлении в нем утяжек образование срединных трещин наблюдается чаще.

Периодическая бугристость сварного шва имеет место при сварке в нижнем положении сталей и алюминиевых сплавов при проваре  $H = 5...30$  мм,  $V_c \geq 10$  мм/с. Периодический выплеск расплава наблюдается при сварке сталей на боку при  $H \geq 80$  мм. Период появления аномалий в формировании сварного шва в обоих случаях заключен в пределах 10...30 мм. Правильный выбор фокусировки электронного пучка или применение специальных технологических приемов позволяют полностью исключить эти дефекты сварного шва.

Геометрия и качество швов при ЭЛС взаимосвязаны более сильно, чем при дуговых способах сварки. Геометрию сварного шва (рис. 2) удобно характеризовать безразмерными параметрами – коэффициентами неравномерности  $\gamma_1 = b_{0,25}/b_{0,5}$ ,  $\gamma_2 = b_{0,5}/b_{0,75}$ . Средняя ширина и глубина шва, коэффициенты неравномерности являются основными параметрами геометрии сварного шва. Безразмерные параметры  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  характеризуют при этом склонность к образованию дефектов. При  $\gamma_1 \approx 1$  и  $\gamma_2 \approx 1$  сварной шов в наибольшей мере равномерен по ширине на всей глубине. При  $\gamma_1 < 1$  и  $\gamma_2 < 1$  в верхней или нижней части сварного шва имеется перетяжка – предвестник возможного образования дефектов ниже перетяжки: протяженных полостей или срединных трещин. Такие швы недопустимы. При  $\gamma_1 > 1$  и  $\gamma_2 > 1$  и  $\gamma_1 > \gamma_2$  форма проплавления клиновидная. Допустимость или целесообразность клиновидной формы сварного шва определяется в каждом конкретном случае с учетом свариваемости металла, его толщины, наличия подкладки и т. п.

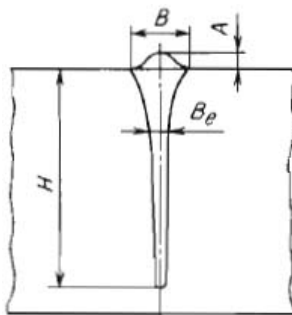


Рис. 2. Типичная форма поперечного сечения сварного шва в металле, выполненного электронным лучом:  $H$ ,  $B$ ,  $A$  – глубина, ширина и усиление шва соответственно;  $B_e$  – ширина шва на уровне  $0,368 H$ , т. е. на уровне  $H/e$ , где  $e$  – основное натуральное логарифма

К основным энергетическим параметрам, определяющим геометрию и качество сварного шва, относят ускоряющее напряжение электронной пушки, силу тока, угол сходимости электронного пучка, радиус и положение минимального поперечного сечения электронного пучка, скорость сварки, точность совмещения электронного пучка со стыком. Кроме того, каждый технологический

прием можно характеризовать дополнительными энергетическими параметрами процесса сварки: формой и частотой колебаний электронного пучка, скоростью и направлением подачи присадочного материала и т. п.

Технологические параметры сварки включают физико-химические свойства основного металла, давление и состав остаточной среды, величину и распределение остаточной намагниченности изделия, пространственное положение сварного шва и электронного пучка, тип и геометрию стыкового соединения. Дополнительными параметрами являются физико-химические свойства присадочного материала и способ его подачи, температура подогрева изделия и т. д.

Требуемые энергетические параметры сварки можно рассчитывать с высокой степенью точности, кроме скорости сварки. Из-за недостаточной изученности сложных гидродинамических явлений в сварочной ванне выбор скорости сварки осуществляют эмпирически. Часть практических данных приведена в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры процесса ЭЛС различных материалов

Материал	H, мм	Положение при сварке	U <sub>д</sub> , кэВ	P <sub>д</sub> , кВт	Про- плавле- ние		V <sub>с</sub> , см/с
					сквозное	несквозное	
Алюминиевые сплавы АМгб, В95, 1963, 1420, 1201, АД0, АД1, АЦМ, АЛ25, АЛ30, АА5056	0,6...40	Нижнее, на боку	20...60	0,4...7	+	+	2,5...10
Алюминиевый сплав 1201	250	На подъем	100	105	–	+	0,6
	300	На боку	150	60	–	+	0,1
	350	На подъем	100	110	–	+	0,3
Титановый сплав ВТ6	20...90	Нижнее	60	6...34	+	–	0,5
	400	На боку	115	110	–	–	0,167

Материал	H, мм	Положение при сварке	U <sub>э</sub> , кЭВ	P <sub>э</sub> , кВт	Про- плавление		V <sub>с</sub> , см/с
					сквозное	несквозное	
Никелевый сплав Inconel 617	60	На боку	150	20	–	+	0,3... 0,5
	90	На боку	150	23	–	+	0,2... 0,3
Сталь хромо-никелевая типа 18-8	10	Нижнее	30...60	4...7	+	+	0,5
Нержавеющая сталь SUS-304	140	На боку	100	50	–	+	0,25
Сталь 10CrMo910	100	Нет данных	150	30	–	+	0,22
	200	Нет данных	150	60	–	+	0,11
Сталь 2,25 Cr-Mo	100	Нет данных	150	22,5	–	+	0,192
	200	Нет данных	150	60	–	+	0,11
	270	Нет данных	150	60	+	–	0,083
	300	Нет данных	160	130	–	+	0,167
C/Mn стали Bs4360-50 (C = 0,18%, Mn = 1,5%) Bs1501-224 (C = 0,22%, Mn = 1,54%)	12,5	Нижнее	60...150	3...9	–	+	0,2... 1,25
	75	Нижнее	60...160	20...50	–	+	0,167... 0,25
	25	Нижнее	60...150	8...20	–	+	0,25... 0,833
	50	Нижнее	60...150	15...30	–	+	0,167... 0,417

Таблица 2

## Примерные режимы электронно-лучевой сварки

Металл	Толщина, мм	Режим сварки			Ширина шва, мм
		ускоряющее напряжение, кВ	сила тока луча, мА	скорость сварки, м/ч	
Вольфрам	0,5	18...20	40...50	60	1,0
	1,0	20...22	75...80	50	1,5
Тантал	1,0	20...22	50	50	1,5
Сталь типа 18-8	1,5	18...20	50...60	60...70	2,0
	20,0	20...22	270	50	7,0
	35,0	20...22	500	20	–
Молибден + вольфрам	0,5+0,5	18...20	45...50	35...50	1,0

## 2. СВАРИВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

С помощью электронного пучка можно сваривать только электропроводящие материалы, т. е. металлы, химические соединения и сплавы на их основе, а также некоторые виды керамик и стекол, которые становятся проводимыми в специальных условиях (например, при нагреве). Большинство современных конструкционных металлов и сплавов хорошо свариваются электронным лучом.

Диапазон свариваемости может быть расширен путем разработки более совершенных технологических приемов сварки, а также путем использования более чистых материалов (с пониженным содержанием примесей, неметаллических включений и газов). Так, применение сталей, полученных методом электрошлакового переплава, позволяет, с одной стороны, получать высококачественные сварные соединения более простыми технологическими приемами при гораздо более низкой доле неисправимого брака, а с другой – сваривать изделия с большим содержанием углерода.

Совершенно не свариваются с помощью электронного луча легкоиспаряющиеся материалы: кадмий, медь МК, олово, свинец, цинк, бронза (кадмий  $> 0,6\%$ , свинец  $> 0,5\%$ ), латунь. Это объясняют тем, что под действием высококонцентрированного электронного луча в вакууме происходит их взрывное вскипание, это приводит к выбросу основной массы расплава, т. е. сплошность литой зоны не достигается; реализуются скорее условия резки, чем сварки. Не свариваются также автоматные, цементированные и низкоуглеродистые стали с высокой концентрацией углерода, серы, фосфора и других элементов из-за образования трещин и ряда других дефектов, а также из-за низких прочностных свойств сварного соединения.

ЭЛС позволяет соединять довольно большое количество комбинаций разнородных и разноименных материалов, в том числе из растворимых и нерастворимых друг в друге материалов.

Количество соединяемых пар может быть увеличено, если в стык свариваемых деталей вводить вставку в виде фольги толщиной 0,1...0,8 мм из специально подобранного связующего металла. Для соединения разнородных материалов используется как режим сварки, так и режим сварки-пайки, при котором электронный пучок смещается относительно плоскости симметрии стыка в сторо-

ну более тугоплавкого металла, величина же смещения либо рассчитывается, либо определяется экспериментально.

Значения эффективного КПД  $\eta_u$  при ЭЛС порядка 0,85...0,95. Таким образом, благодаря высокой концентрации мощности в направлении распространения тепла при сварке электронным лучом – один из самых эффективных, по сравнению с другими сварочными источниками энергии.

По данным Е.Л. Мамутова [5], ни одна из публикаций по ЭЛС не содержит необходимого набора сведений о параметрах процесса. Это не позволяет воспроизводить описанные случаи сварки. Поэтому при разработке технологического процесса ЭЛС необходимо самостоятельно отрабатывать режимы сварки в зависимости от условий сварки и конструкции оборудования. Своеобразие способа ЭЛС пока поддается лишь приближенному объяснению, в основе которого лежат три группы процессов в облучаемом веществе: 1) массовое образование мгновенновскипающих микрообъемов; 2) устойчивое существование канала проплавления; 3) энергетическая экранировка электронного пучка продуктами испарения в канале проплавления и непосредственно над ним.

Следует отметить, что длина пробега электронов луча в веществе мишени достаточно мала и зависит от ускоряющего напряжения. При ЭЛС стали с ускоряющим напряжением 100 кВ пробег не превышает 30 мкм. Это свидетельствует о чрезвычайно сложном механизме ЭЛС.

Е.Л. Мамутов отмечает, что многолетние исследования позволили сформулировать систему взглядов по качественным аспектам влияния многих характеристик на геометрию шва и прочностные свойства сварного соединения. Но количественные оценки их отдельного и их совокупного влияния в каждом конкретном случае не поддаются точному прогнозированию прежде всего потому, что накопленные экспериментальные данные описаны в различных публикациях на различном информационном фоне: неодинаковые установки и методики исследования, ограниченное (и зачастую не совпадающее) количество управляемых характеристик режима, разнообразие свариваемых металлов и их сплавов, типов и размеров соединений.



Установлено, что глубину проплавления можно увеличить путем некоторого повышения ускоряющего напряжения или силы тока электронного пучка, путем некоторого заглубления фокального пятна в свариваемое изделие или путем некоторого снижения скорости сварки. Однако не удалось создать, например, номограммы и выбирать с их помощью применительно к любой установке режимы сварки любых металлов при любом типоразмере сварного соединения и т. д., гарантируя при этом достаточно точную геометрию шва и заданный уровень эксплуатационной надежности соединений.

Для образцов из алюминиевого сплава АМгб (35×60×100 мм) с помощью теории математического планирования эксперимента была построена математическая зависимость глубины провара от ряда параметров процесса.

В качестве независимых варьируемых переменных (факторов) были выбраны ускоряющее напряжение  $U$ , кВ ( $X_1$ ), сила тока электронного пучка  $I$ , мА ( $X_2$ ), сила тока фокусирующей линзы  $I_f$ , мкА ( $X_3$ ), скорость сварки  $V_c$ , м/ч ( $X_4$ ), температура предварительного подогрева образца перед сваркой ( $X_5$ ). Чтобы создать над зоной сварки облако паров, характеризуемое конкретными размерами, стык с двух сторон ограничили медными пластинами-ограничителями, установленными на теплоизолирующие прокладки. Их наличие обеспечило условия, напоминающие сварку в глубоком пазу. Исходя из необходимости оценивать влияние паров, выбирали высоту ограничителей (мм) в качестве фактора  $X_6$ , а расстояние между ограничителями (мм) в качестве фактора  $X_7$ . Исходные данные экспериментов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные величины для назначения режимов ЭЛС

Фактор	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
Основной уровень	55	25	56	36	3	20	8,5
Интервалы варьирования	±5	±5	±4	±10,5	±3	±10	±1,5
+1	60	30	60	46,5	6	30	10,5
-1	50	20	52	25,5	0	10	7,0

*Примечания.*

1. Расстояние от торца лучепровода излучателя до поверхности образца является постоянной величиной и равно 36 мм, поэтому можно считать, что фактор характеризует диаметр пятна нагрева и угол сходимости пучка на изделии.

2. Эксперименты выполнены на установке ЭЛУ-5 с излучателем ЭП-60.
3. Степень разрежения в рабочей камере и в излучателе во время опыта поддерживалась постоянной и составляла  $(400...665)10^{-5}$  Па.
4. Температура оценивалась в условных единицах, а именно числом двойных проходов на режиме:  $U = 60$  кВ;  $I = 56$  мкА;  $V_c = 22$  м/ч.

В результате проведенных экспериментов уравнение для определения глубины провара получено в виде

$$H_n = + 6,387 + 0,753 \cdot X_1 + 2,080 \cdot X_2 - 1,297 \cdot X_3 - 0,863 \cdot X_4 + 0,486 \cdot X_5 - 0,616 \cdot X_6 + 0,517 \cdot X_2 X_6 - 0,533 \cdot X_4 X_5 + 0,659 \cdot X_2 X_4 + 0,551 \cdot X_4 X_6.$$

Полученная модель дает отклонения от экспериментальных данных в пределах 2...3%. Модели, подобные описанной выше, позволяют прогнозировать конечный результат в исследованных интервалах и могут служить источником объективной информации об особенностях процесса. Например, данная модель позволяет аргументировано утверждать о явном влиянии облака пара на глубину максимального проплавления (на это указывают статистически значимые коэффициенты при парных взаимодействиях  $X_2 X_6$  и  $X_4 X_6$  и при факторе  $X_6$ ).

### 3. ОСОБЕННОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭЛС

Основные типы сварных соединений, рекомендуемые для электронно-лучевой сварки, приведены на рис. 3. Перед сваркой требуется точная сборка деталей (при толщине металла до 5 мм зазор не более 0,07 мм, при толщине до 20 мм зазор до 0,1 мм) и точное направление луча по оси стыка (отклонение не больше 0,2...0,3 мм).

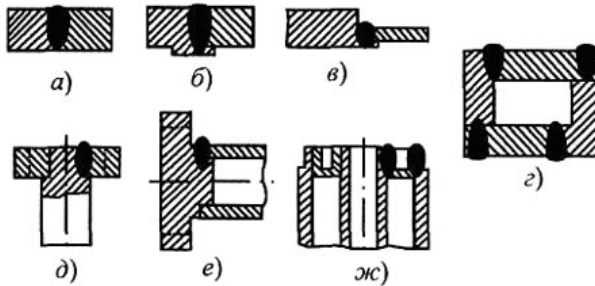


Рис. 3. Типы сварных соединений при сварке электронным лучом:  
*a* – стыковое (может быть с бортиком для получения выпуклости шва);  
*б* – замковое; *в* – стыковое деталей разной толщины; *г* – угловые;  
*д, е* – стыковые при сварке шестерен; *ж* – стыковые с отбортовкой кромок

Для электронно-лучевой сварки характерны как обычные типы соединений, так и принципиально новые. Общее требование ко всем типам соединений – точная сборка деталей перед сваркой. Обычно отклонение оси пучка электронов от сварного стыка в процессе сварки не должно превышать 0,2...0,3 мм. При толщине свариваемых пластин до 5 мм допустимая величина зазора, как правило, не превышает 0,05...0,07 мм. При увеличении толщины пластин до 20 мм допустимая величина зазора возрастает до 0,1 мм, но не более (табл. 4).

Таблица 4

(мм)

Толщина основного металла	Зазор в стыке	Смещение по высоте
1,0...1,5	0,1	0,1
2,0...3,0	0,15	0,2
>3,0	0,2	0,3

При увеличении зазоров свыше указанных пределов получить удовлетворительное формирование стыковых швов без подрезов практически невозможно. Наиболее эффективным способом устранения подрезов является подача присадочной проволоки или же сварка по технологическим буртикам, оставляемым при механической обработке стыков. Сварка с присадочной проволокой позволяет увеличить допустимый зазор в стыке до 0,5 мм, кроме того, становится возможным металлургическое вмешательство с целью предупреждения возникновения трещин. При сварке без зазоров доля проволоки в металле шва при толщине основного металла до 20 мм составляет около 25%. Изменяя величину зазора в стыке и скорость подачи проволоки, можно довести долю присадочного металла до 50%.

Электронно-лучевую сварку с отбортовкой кромок на телах вращения применяют преимущественно в радиоэлектронике и приборостроении. В торцовых и стыковых соединениях с отбортовкой кромок допустимы зазоры до 0,5...0,7 мм и превышение кромок до 1...2 мм. Однако в этом случае для обеспечения удовлетворительного формирования шва диаметр пятна на изделии должен несколько превышать величину зазора.

Сварку металлов, значительно отличающихся по толщине (например, приварка мембраны к корпусу и т. п.), выполняют с предварительной разделкой кромок металла большей толщины для выравнивания теплового поля в соединяемых деталях и достижения симметричного проплавления.

Импульсную электронно-лучевую сварку, благодаря малому тепловложению, применяют при наличии в непосредственной близости от места сварки спаев металла со стеклом или керамикой. Она способствует получению определенной ориентации кристаллитов металлов сварного шва, обеспечивающей вакуумную плотность сварных соединений в течение длительного времени эксплуатации. При той же погонной энергии и скорости сварки провар в импульсном режиме больше, чем в непрерывном, особенно для тонколистовых материалов.

Сварка в узких разделках и труднодоступных местах является одним из преимуществ электронно-лучевой сварки перед извест-

ными способами сварки плавлением и возможна благодаря малым размерам пучка в сечении, его длиннофокусности и автономности по отношению к свариваемому материалу. Однопроходную сварку расположенных на различной высоте стыков проникающим пучком выполняют в редких случаях, так как она не обеспечивает достаточно стабильного формирования швов. В некоторых конструкциях теплообменников сварку выполняют внедренным пучком через ребро жесткости.

#### 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СВАРКИ

Сварку электронным лучом можно осуществлять с определенными ограничениями в любых пространственных положениях. Например, для листовых материалов сварку в нижнем положении (рис. 4) выполняют как без подкладки, так и на подкладке. Ее применяют для соединения сталей толщиной до 40 мм, титановых и алюминиевых сплавов толщиной до 80 мм. Наиболее предпочтительна сварка на боку и на подъем, которую выполняют для металлов любой толщины, в основном без подкладки. Для предотвращения вытекания расплава из сварочной ванны при сварке с глубоким проплавлением иногда устанавливают ограничительную планку вдоль нижней кромки стыка. Сварку в потолочном положении выполняют на металлах толщиной до 20 мм и применяют чрезвычайно редко.

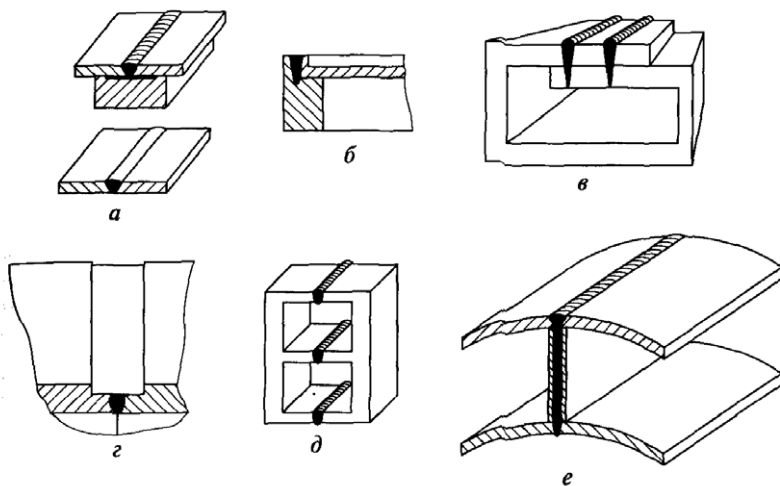


Рис. 4. Основные типы соединений деталей при электронно-лучевой сварке: *a* – в стык тонколистовых деталей на подкладке и без нее; *б* – с отбортовкой кромок различной толщины; *в* – внахлестку; *г* – в узких разделках и труднодоступных местах; *д* – однопроходная сварка одновременно нескольких стыков проникающим лучом; *е* – сварка двух цилиндров электронным лучом через ребро жесткости

Аналогичные технологические схемы сварки существуют и для тел вращения.

## 5. ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ К СВАРКЕ

Предварительная *очистка* стыкуемых поверхностей и самих деталей выполняется механически, а окончательная – в зависимости от свариваемого металла и степени шероховатости очищаемой поверхности различными физико-химическими способами. Очистке подлежат стыкуемые поверхности, внешние и внутренние поверхности деталей (в случае сквозного проплавления) на расстоянии до 100 мм от кромки при сварке толстолистовых металлов и до 10 мм при сварке тонколистовых металлов. Непосредственно перед сваркой внешнюю поверхность свариваемых в области стыка и стыкуемых поверхностей (насколько возможно через зазор в стыке) можно очищать с помощью маломощного сканирующего электронного луча. При этом луч должен незначительно оплавливать очищаемую поверхность, не заплавляя зазор в стыке. Общие требования ко всем типам соединениям – это высокая точность сборки перед сваркой.

### ***Размагничивание***

Элементы конструкций, детали механизмов и конструкции в целом в зависимости от марки материала в процессе изготовления приобретают остаточную намагниченность. Реальные уровни магнитных полей на поверхности деталей из сталей, склонных к остаточному намагничиванию, могут достигать несколько единиц и даже десятков мТл.

Остаточная намагниченность изделий приводит к ряду негативных явлений:

- возникновению «магнитного дутья» при дуговой электросварке и наплавке, что ведет к повышенному разбрызгиванию жидкого металла из сварочной ванны и образованию различных дефектов сварного соединения, а также к непопаданию дуги в свариваемый стык или место наплавки;

- искривлению траектории электронного луча при ЭЛС и соответствующему непровару стыка по всей толщине;

- налипанию металлической стружки при штамповке или обработке деталей металлорежущим инструментом, что ухудшает качество обработки и ускоряет изнашивание штампов и инструмента.

Остаточные магнитные поля в изделиях из ферромагнитных материалов отклоняют электронный луч и электрическую дугу при сварке от плоскости стыка. Компенсировать этот уход электронного луча от стыка возможно лишь при сварке тонколистовых материалов (при условии однородного распределения намагниченности вдоль стыка) с помощью отклоняющей системы сварочной электронной пушки. В остальных случаях необходимо размагничивание изделия.

Операцию размагничивания необходимо осуществлять после сборки стыкового соединения непосредственно перед загрузкой изделия в вакуумную камеру или подачей в зону сварки.

Размагничивание – это процесс воздействия внешнего магнитного поля, в результате которого уменьшается намагниченность ферромагнитного материала. Наиболее полное размагничивание достигается в том случае, если возможен предварительный подогрев изделия до температуры Кюри (993 К для сталей) с последующим охлаждением в отсутствие магнитного поля и механических воздействий.

Наиболее применяемым способом размагничивания является периодическое перемагничивание с убывающей амплитудой, например, с помощью соленоидов или намагничивающих контуров.



## **6. ФАКТОРЫ, СДЕРЖИВАЮЩИЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ**

При ЭЛС возможно образование несплавлений и полостей в корне шва на металлах с большой теплопроводностью и швах с большим отношением глубины к ширине, однако по вероятности образования дефектов ЭЛС вряд ли превосходит другие способы сварки.

При ЭЛС больших толщин дефекты шва возникают под влиянием различных причин: из-за недостаточной очистки кромок от оксидов и загрязнений, неаккуратной и ненадежной сборки деталей под сварку, недостаточного или, наоборот, чрезмерного тепловложения по длине стыка, неблагоприятной гидродинамики течения расплава в канале проплавления или в связи с пониженной свариваемостью металлов.

Когда внутренний дефект шва невозможно исправить путем дополнительных сварочных проходов, дефектную зону высверливают и заменяют ввариваемым вкладышем (при необходимости его полностью переплавляют). Однако появления многих дефектов можно избежать: например, развитие усадочных трещин исключают за счет несколько увеличенной выпуклости, осуществляющей подпитку опасных зон; развитие кристаллизационных трещин подавляют с помощью подбора свариваемых металлов или присадочного материала надлежащего химического состава; возможное образование пористости различных видов нейтрализуют путем тщательной очистки стыкуемых кромок и улучшения гидродинамики течения расплава (регулируют степень фокусировки луча и наклон пучка относительно облучаемой поверхности, ведут сварку с полным проплавлением стыка или сварку с колебаниями пучка); непровар предупреждают путем надлежащего подбора тепловложения по длине стыка, путем гарантированного совмещения пучка со стыком по всей его глубине за счет надежной сборки деталей в приспособлении, при которой исключается раскрытие стыка под влиянием теплового расширения деталей.

Для создания вакуума в рабочей камере после загрузки изделий требуется длительное время.

Основными причинами, существенно сдерживающими расширение промышленного применения электронно-лучевой сварки, продолжают оставаться высокая стоимость оборудования, его сложность по сравнению с обычным электросварочным оборудованием, необходимость в квалифицированном обслуживающем персонале, слабая подготовка инженерно-технического персонала промышленности в электронно-лучевой сварке, консерватизм конструкторов, ориентирующихся на традиционную технологию. Кроме того отсутствуют новые стандарты, а старые ограничивают технологию изготовления ряда изделий применением традиционных видов сварки.

Таким образом, электронно-лучевая сварка все еще продолжает оставаться в значительной степени специальным процессом, применяемым прежде всего там, где невозможно использование других способов сварки, а также в тех случаях серийного и массового производства, когда существенное значение имеет высокая технологическая производительность сварочного процесса, необходимость снижения деформаций, малые эксплуатационные затраты.

Делая выбор в пользу электронно-лучевой сварки, необходимо учитывать такой важный фактор, как возможность получать равнопрочные соединения в конструкциях, работающих при высоких нагрузках. Повышенные возможности обеспечения равнопрочности позволяют использовать для конструкций более прочные материалы. Это дает возможность получить значительную экономию от снижения веса конструкции. Поэтому следует изыскивать возможности применения ЭЛС для пространственных объемных конструкций, несущих высокие эксплуатационные нагрузки.

## 7. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛС

Существенное расширение промышленного использования ЭЛС связано с возможностью эффективного производства с ее помощью изделий из конструкционных металлов и сплавов больших толщин (до 300 мм): сосудов высокого давления, корпусов ядерных и химических реакторов, контейнеров для ядерных отходов, корпусов подводных аппаратов, роторов паровых турбин, несущих конструкций сверхзвуковых самолетов. Другим достоинством ЭЛС является ее возможность быть финишной операцией при сварке металлов толщиной до 80 мм. Однако для этого необходимо создавать высокопроизводительный и высоконадежный технологический процесс, удовлетворяющий лучшим стандартам качества.

В связи с этим имеется ряд проблем в теории, технологии и технике ЭЛС, успешное решение которых нередко требует объединения усилий многих исследовательских центров.

В области теории важнейшей задачей является создание расчетных моделей процесса сварки в различных условиях и электронно-оптических системах сварочных электронных пушек, которые позволяли бы прогнозировать с хорошей точностью параметры сварных швов, режимы сварки, параметры электронных пучков и оптимальную конфигурацию элементов электронно-оптических систем.

В области технологии ЭЛС важнейшими проблемами являются совершенствование способов: замыкания кольцевых швов, ремонта дефектных участков швов, размагничивания изделий перед сваркой, выведения электронного луча в атмосферу инертных газов (вневакуумная сварка), сварки в низком вакууме, сварки разнородных материалов; глубокое изучение влияния нейтронного облучения на характеристики сварных соединений. Необходимо также разрабатывать экспертные и информационные компьютерные системы.

В области создания оборудования для ЭЛС главной проблемой является снижение стоимости оборудования при увеличении его производительности. Для решения этих задач необходимо:

– развивать мощные инверторные (с частотой управления более 10 кГц) источники питания сварочных электронных пушек;

– совершенствовать системы откачки вакуумных камер, обеспечивая безмасляный вакуум и малое время вакуумирования (менее 5 минут для крупногабаритных вакуумных камер);

– используя новейшую элементную базу и интернет-технологии, разрабатывать более совершенные системы программно-автоматического управления с самодиагностикой всего комплекса оборудования.

Немаловажное значение имеет и совершенствование организационных форм развития такого дорогостоящего способа сварки, как ЭЛС. Вполне оправдано существование технологических фирм при крупных исследовательских центрах, где выполняются платные услуги по сварке электронным лучом изделий заказчиков данного региона. Для обеспечения экономической самостоятельности таких фирм в них следует также организовывать мелкосерийное производство уникальных изделий.

Таблица 5

Экономические показатели некоторых способов сварки  
длинномерных толстостенных труб большого диаметра  
(ФРГ, 2003 г.)

Параметр	Сварка погруженной дугой	ЭЛС	Комбинированная сварка: ЭЛС+ погруженной дугой
Возможное число труб	2782	5407	3099
Брак, %	2	2	2
Дневная производительность, шт.	9	18	10
Затраты на оборудование, тыс. евро	0	2500	2500
Общие капитальные затраты, тыс. евро	0	419,642	419,642
Общие эксплуатационные расходы, тыс. евро	1010,24	44,624	226,412
Расходы на зарплату, тыс. евро	288,0	144,0	288,0
Общие расходы, тыс. евро	1298,24	608,266	934,055
Затраты на единицу продукции, евро	466,69	112,5	301,39

## 8. СХЕМЫ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭЛС

Электронно-лучевые сварочные пушки (рис. 5) могут быть стационарными или перемещаемыми внутри вакуумной камеры. Размеры вакуумных камер электронно-лучевых сварочных установок определяются габаритами свариваемых изделий. Установки для сварки изделий малых и средних габаритов обычно снабжаются универсальными многопозиционными механизмами для перемещения либо вращения изделий.

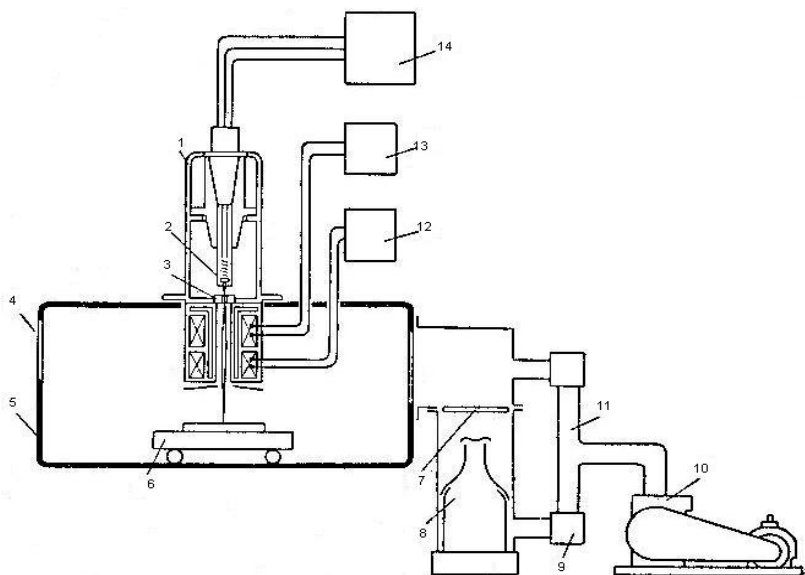


Рис. 5. Схема установки для электронно-лучевой сварки:

1 – стационарная электронно-лучевая сварочная пушка; 2 – катод и прикатодный электрод; 3 – анод; 4 – смотровое окно; 5 – вакуумная камера; 6 – механизм перемещения свариваемого изделия; 7 – затвор высоковакуумного агрегата; 8 – высоковакуумный насос; 9 – вакуумный вентиль; 10 – форвакуумный насос; 11 – вакуумпровод; 12 – система электромагнитного отклонения луча; 13 – система фокусировки луча; 14 – высоковольтный выпрямитель и модулятор

Основным элементом любой сварочной установки для электронно-лучевой сварки является электронная пушка (рис. 6), назначение которой состоит в формировании электронного пучка с большой плотностью энергии.

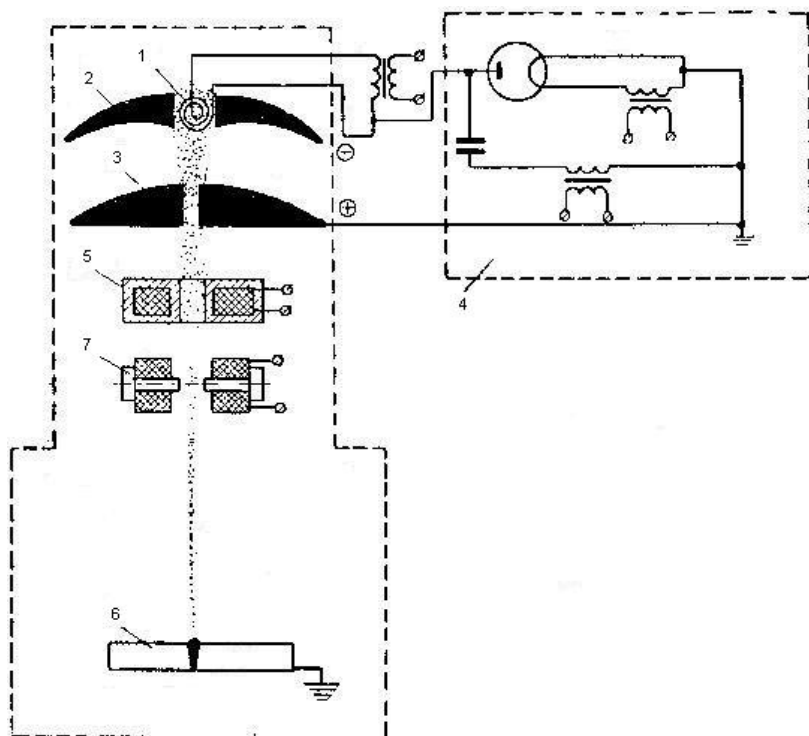


Рис. 6. Принципиальная схема электронно-лучевой сварки: 1 – катод; 2 – фокусирующий электрод; 3 – анод; 4 – источник высокого напряжения постоянного тока; 5 – магнитная линза; 6 – площадка для детали; 7 – магнитная отклоняющая система

Пушка состоит из катода 1, помещённого в центре фокусирующего электрода 2, и анода 3 с отверстием, расположенного на некотором удалении от катода. Прикатодный фокусирующий электрод и анод имеют форму, обеспечивающую такое строение электрического поля, которое формирует узкий электронный пучок.

Пушка питается электрической энергией от источника высокого напряжения постоянного тока 4. Положительный потенциал анода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, эмитированные катодом на пути к аноду, приобретают значительную энергию.

Для увеличения плотности энергии в луче электроны после выхода из анода фокусируются с помощью магнитной линзы 5. Сфо-

кусируемые в плотный пучок электроны с большой скоростью ударяются о малую, резко ограниченную площадку на детали 6. При этом кинетическая энергия электронов вследствие торможения в веществе превращается в тепло, нагревая материал до температуры его кипения.

Для перемещения луча по свариваемому изделию устанавливается магнитная отклоняющая система 7.

Для обеспечения свободного движения электронов от катода к изделию, а также для предотвращения возможности дугового разряда между электродами в установке создается вакуум порядка  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. ( $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па), который обеспечивается системой откачки.

Электронные пушки, используемые для целей сварки, должны удовлетворять ряду требований:

- 1) обеспечивать требуемую мощность пучка при определенном разгоняющем напряжении;
- 2) фокусировать электронный пучок до весьма малых диаметров (в зависимости от назначения пушки диаметр электронного пучка может составлять несколько микрон);
- 3) быть достаточно простыми в управлении и надежными в эксплуатации.

Особые требования предъявляются к безопасности работы с электронно-лучевыми установками.

Конструкция пушки, фокусирующих систем, размер и форма электродов определяются формой требуемого электронного луча, его мощностью, которые в свою очередь зависят от характеристик свариваемых изделий.

## 9. РАБОЧИЕ КАМЕРЫ

Ввиду необходимости вакуума в камере, где образуется и формируется поток электронов, в большинстве случаев при электронно-лучевой сварке и само изделие размещают внутри вакуумной камеры, чтобы устранить рассеяние электронов на атомах и молекулах газов. Это обеспечивает хорошую защиту металла шва. Но, с другой стороны, это существенно ограничивает возможности применения такого способа сварки, главным образом, вследствие ограничения размеров свариваемых изделий и малой производительности процесса, так как много времени уходит на подготовку деталей к сварке. Поэтому наряду с высоковакуумными установками разрабатывают и такие, где электронный луч выводится из камеры пушки, в которой поддерживается высокий вакуум, и сварка производится в низком вакууме  $10^{-2} \dots 10^{-1}$  мм рт. ст. (1,33...13,3 Па). Специальные установки разрабатывают для микросварки в производстве модульных элементов и различного рода твердых радиосхем. Особенности заключаются в первую очередь в точном дозировании тепловой энергии, перемещении луча по изделию с помощью отклоняющих электрических и магнитных полей, совмещении нескольких технологических функций, выполняемых электронным лучом в одной камере. Поскольку вакуумные камеры вакуумных систем стоят очень дорого, рациональности их конструкций уделяется большое внимание.

Существующие конструкции можно разделить на следующие группы:

- 1) универсальные установки для сварки изделий средних размеров;
- 2) универсальные и специализированные установки для микросварки малогабаритных деталей;
- 3) специализированные установки для сварки изделий малых и средних размеров;
- 4) установки для сварки крупногабаритных изделий с полной герметизацией;
- 5) установки для сварки крупногабаритных изделий с частичной герметизацией места стыка;
- 6) установки для сварки в промежуточном вакууме.



Установки первой группы предназначены в основном для использования в исследовательских и заводских лабораториях, а также в промышленности при единичном и мелкосерийном производстве. Они имеют вакуумные камеры объемом 0,001...4,0 м<sup>3</sup> и манипуляторы для перемещения свариваемых деталей, позволяющие выполнять более универсальные перемещения при сварке. Такие установки оснащают также системами наблюдения за областью сварки. Электронная пушка может быть стационарной или перемещается внутри камеры с целью начального направления луча на стык.

Установки для сварки крупногабаритных деталей отличаются наличием дорогостоящих вакуумных камер большого объема, куда детали помещаются целиком. Часто электронные пушки, которые имеют гораздо меньшие размеры, чем изделие, размещают внутри камеры. В этом случае сварной шов выполняется при перемещении самой электронной пушки. Иногда, особенно при сварке обечаек кольцевыми швами, на камере размещают несколько пушек позволяющих за счет ликвидации продольного перемещения изделия также уменьшить размеры камеры.

Для снижения затрат на оборудование и повышения производительности установок последние иногда выполняют лишь с местным вакуумированием в области свариваемого стыка. Тогда откачиваемый объем сокращается, размеры установки в целом также получаются меньше, чем в том случае, если все изделие помещать в камеру. Иногда, например, при сварке трубопроводов непосредственно в процессе их укладки без местного вакуумирования решить задачу не представляется возможным.

В некоторых случаях рабочая камера установки может быть откачана лишь до промежуточного вакуума 1330...13300 Па (10<sup>1</sup>...10<sup>2</sup> мм рт. ст.). Диффузионный насос для откачки рабочей камеры становится ненужным (для камеры пушки он по-прежнему необходим, но меньшей мощности и малогабаритный). В таких установках лучепровод, соединяющий камеру пушки с камерой детали, проектируют с учетом создания необходимого перепада давлений между камерами; иногда в лучепроводе предусматривают даже промежуточную ступень откачки.

## 10. СЛЕЖЕНИЕ ЗА ПОЛОЖЕНИЕМ ПЯТНА НАГРЕВА

В электронно-лучевых установках важна точность слежения за положением луча относительно свариваемого стыка. В системах слежения используют вторично-эмиссионные датчики, сигнал с которых преобразуется и направляет электронный луч на стык с помощью отклоняющих катушек.

Принцип работы такой системы заключается в следующем. При попадании электронного луча на поверхность металла из последнего выбиваются вторичные электроны, летящие в обратном направлении в камеру. Поставленный на их пути датчик выделяет сигнал, пропорциональный их количеству, и передает его в систему управления положением луча. Число вторичных электронов зависит от состояния и формы поверхности металла, на которую попадает луч. Их число максимально при гладкой поверхности, перпендикулярной лучу, и уменьшается, если луч пересекает неровности. При попадании луча в глубокие полости число вторичных электронов уменьшается практически до нуля, так как все они поглощаются стенками полости.

Разработанная система «Прогноз» для контроля положения луча относительно стыка работает следующим образом. Луч, сваривающий металл, периодически с частотой 20...50 Гц выводится из ванны, на большой скорости пересекает стык перед сварочной ванной (на расстоянии 5...7 мм) и быстро возвращается обратно. Вывод луча из ванны столь кратковременен, что на параметрах шва не сказывается.

При пересечении лучом стыка происходит скачкообразное изменение сигнала вторичных электронов. Положение этого импульса сравнивается с положением луча при отсутствии тока в отклоняющей системе и при необходимости автоматически корректируется непосредственно в процессе сварки. Такая система обеспечивает точность слежения за стыком, исчисляемую сотыми долями миллиметра, и является исключительно быстродействующей.

В систему «Прогноз» заложены блоки, позволяющие управлять перемещениями луча, необходимыми в технологическом отношении: вести сварку с продольными, поперечными и кольцевыми колебаниями луча, выполняемыми с различной заданной скоростью и по различному закону.

## **11. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ УСТАНОВОК**

ЭЛС является наиболее перспективным способом соединения деталей из химически активных и тугоплавких металлов и сплавов, изделий из термически упрочняемых материалов, когда нежелательна, затруднена или невозможна термическая обработка; изделий после завершающей механической обработки при необходимости обеспечения минимальных сварочных деформаций, ряда толстостенных и тонкостенных конструкций ответственного назначения. Наиболее широко в мире освоено промышленное применение ЭЛС в авиакосмической отрасли, ядерной энергетике, энергетическом машиностроении, турбиностроении, производстве электровакуумных приборов, автомобильной промышленности при массовом изготовлении подшипников.

## **12. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА УСТАНОВКАХ ЭЛС**

Источниками опасности при работе на установке для ЭЛС являются работающие (движущиеся) механизмы (манипуляторы, тележки, вакуумные насосы), электрические цепи с напряжением до 1000 В, сосуды давления (вакуумная камера, вакуумпровода, вакуумные насосы), свечение сварочной ванны, газоаэрозольный выхлоп, шум и вибрация форвакуумных насосов. Источники повышенной опасности для персонала – тормозное рентгеновское излучение из зоны воздействия электронного пучка на материал.

Защита от всех источников опасности и повышенной опасности предусмотрена в конструкции сварочных установок. Меры защиты описаны в инструкциях по эксплуатации и ремонту установок с учетом возможных аварийных ситуаций. При этом защита разработана на основании правил безопасной эксплуатации электроустановок и санитарных норм допустимой дозы радиационного облучения и допустимой концентрации в воздухе рабочей зоны масляных аэрозолей.

### 13. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭЛС

Тепловые процессы при электронно-лучевой сварке можно описывать с помощью расчетной схемы линейного движущегося источника тепла в пластине. Линейность источника определяется степенью равномерности ввода мощности по толщине изделия. При ЭЛС шов получается узким и его ширина относительно мало изменяется по толщине свариваемых пластин. Ширину шва или другой зоны можно рассчитать с помощью уравнения

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi\delta\lambda} e^{-\frac{V_c x}{2a}} K_0 \left( \frac{V_c r}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{V_c^2}} \right), \quad (5)$$

где  $q$  – эффективная мощность, Вт;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/см·град;  $\delta$  – толщина пластин, см;  $V_c$  – скорость сварки, см/с;  $a$  – температуропроводность, см<sup>2</sup>/с;  $r$  – расстояние от оси источника тепла до рассматриваемой точки;  $v$  – критерий влияния теплоотдачи с поверхности свариваемых деталей;  $K_0(u)$  – функция Бесселя.

Для облегчения расчетов ранее была получена номограмма (рис. 7). В настоящее время тепловые расчеты достаточно просто выполняются с помощью специальных программ для ПЭВМ. На основе формулы (5) можно предложить схему расчета параметров ЭЛС (режимов и условий сварки), которая оформлена в виде табл. 6.

С помощью данной модели можно рассчитать среднюю ширину шва при известной эффективной мощности электронного луча  $q_u$  или, наоборот, по значению средней ширины шва  $B_{ш}$  рассчитать эффективную мощность луча. Недостатком модели является то, что она не позволяет рассчитывать глубину провара при сварке металла, если его не удастся проварить за один проход.

Практическая значимость формулы (5) все-таки видится в определении эффективной мощности луча по средней ширине шва. Поскольку формула (5) получена в предположении отсутствия зависимости теплофизических коэффициентов от температуры, то их приходится принимать некими усредненными для заданного возможного диапазона температур в зоне сварки. Этот выбор достаточно произволен, но для инженерной практики это не имеет большого значения, так как расчет эффективной мощности опирается на экспериментальные данные по ширине шва. Поэтому следует

такую расчетную эффективную мощность считать не «действительной», определяемой, например, с помощью калориметрических измерений, а «приведенной», т. е. полученной на основе математической модели и принятых теплофизических коэффициентов по конкретной ширине шва.

В дальнейшем полученное значение эффективной мощности можно использовать, например, для расчета термических циклов в зоне сварки, ширины зоны термического влияния с целью прогнозирования свойств сварного соединения. При этом расчеты следует выполнять с принятыми ранее теплофизическими коэффициентами. Такой подход мы называем методом «приведения» классической математической модели распространения тепла к конкретным условиям сварки.

В случае если источник тепла является быстродвижущимся, можно использовать более простую формулу для расчета температур. Без учета поверхностной теплоотдачи она имеет вид

$$\Delta T = \frac{E \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right)}{(4\pi\lambda\rho ct)^{0,5}}, \quad (6)$$

где  $E$  – удельная энергия сварки, Дж/см<sup>2</sup>;  $y$  – координата точки в направлении, перпендикулярном шву, см.

Из формулы (6) вытекает выражение для ширины зоны нагрева, в частности, ширины шва:

$$B_{ш} = \frac{0,484 \cdot E}{C_v \cdot \Delta T_l}. \quad (7)$$

Однако пользоваться формулами (6) и (7) следует обоснованно, когда доказано, что они применимы.

В табл. 6 приведен алгоритм расчета параметров процесса, если известен режим ЭЛС. В табл. 7 и 8 приведены справочные данные, необходимые для выполнения расчетов.

Зависимость критерия от безразмерного критерия  $V \cdot l / 2a = V_c \cdot B_{ш} / 2a$  представлена в виде номограммы на рис. 7.

Таблица 6

## Схема расчёта параметров процесса

Исходные данные		
Тип установки для сварки	Свариваемый материал, теплофизические данные	Толщина $\delta$ , коэффициент формы шва $\psi_{ш}$
Напряжение луча, ток луча $U_a, I_a$	$\lambda, \eta_u, a, \Delta T_l, H_{nl}, H_{кин}$	$\delta, \psi_{ш}$
1. Эффективная мощность луча $q_u = U_a \cdot I_a \cdot \eta_u$	4. Критерий линейного источника $\frac{q_u}{4\pi \cdot \lambda \cdot \Delta T_l}$	2. Ширина шва $B_{ш} = \frac{\delta}{\psi_{ш}}$ 3. Площадь провара $B \cdot \delta$
5. Параметр – по номограмме $\xi = \frac{V_c \cdot B_{ш}}{2a}$		
6. Скорость сварки $V_c$ – по известной ширине шва и $\xi$		
7. Скорость соединения $J = V_c \cdot \delta$		
8. Удельная энергия сварки $E = \frac{q_u}{V_c \cdot \delta}$		
9. Термический КПД процесса $\eta_m = \frac{H_{nl} \cdot B \cdot \delta \cdot V_c}{q_u}$		
10. Частота сварки, $f = \frac{V_c}{B_{ш}}$ , Гц		
11. Период сварки $\frac{1}{f}$ , сек		

Таблица 7

## Эффективный КПД электронно-лучевого нагрева

Металл	Al	Ti	V	Fe	Ni	Cu	W
$\eta_u$	0,895	0,842	0,839	0,804	0,780	0,776	0,70

## Теплофизические свойства технических сплавов

Материал	Плотность (20 °С), г/см <sup>3</sup>	Удельная теплоём- кость, Дж/(г·°С)	Коэффициент тепло- проводности (20 °С), Вт/ (см °С)
30ХГСА	7,85	0,481	0,393
X18H9T	7,86	0,502	0,163
OT4	4,59	0,585	0,096
BT5	4,52	0,585	0,075
08кп	7,8	0,451	0,568
M1	8,9	0,367	3,595
Д16АТ	2,7	—	1,254

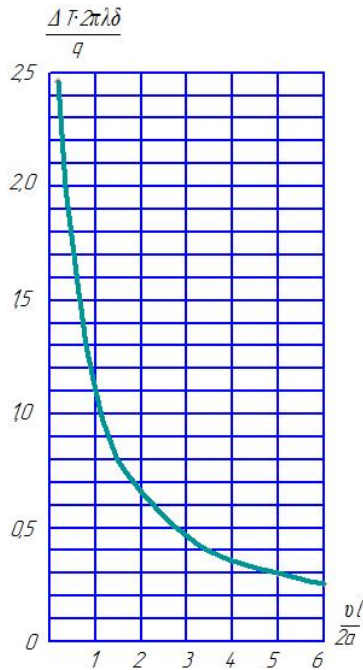


Рис. 7. Номограмма для определения ширины зоны нагрева при действии линейного источника тепла в пластине



## 14. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. В табл. 9 приведены режимы электронно-лучевой сварки стали 12Х18Н9Т. Определите зависимости интегральной скорости сварки, удельной энергии сварки и частоты сварки от толщины свариваемых пластин. Проанализируйте полученные зависимости.

Таблица 9

№ п/п	Толщина, мм	Режим сварки			Ширина шва, мм
		Ускоряющее напряжение, кВ	Ток луча, мА	Скорость сварки, м/ч	
1	1,5	18...20	50...60	60–70	2
2	10	18...20	240	50	4
3	20	20...22	270	50	7
4	35	20...22	500	50	–

*Решение.* Примем значение эффективного КПД для электронно-лучевой сварки  $\eta_{\text{н}} = 0,9$ . Значения режимов будем принимать средними в приведенном диапазоне. Теплопроводность для высоколегированной стали принимаем  $\lambda = 0,29$  Вт/(см·К), объемную теплоемкость  $C = 4,8$  Дж/(см<sup>3</sup>·К). Тогда температуропроводность  $a = 0,06$  см<sup>2</sup>/с. Температуру плавления принимаем  $T = 1400$  °С. Рассчитываем безразмерный параметр  $K_1 = \frac{\delta 2\pi\lambda\Delta T_l}{q_{\text{н}}}$  и по нему с помощью номограммы на рис. 7 находим значение безразмерного параметра  $K_2 = \frac{V_c B_{\text{ш}}}{2a}$ . По критерию  $K_2 = \frac{V_c B_{\text{ш}}}{2a}$  рассчитываем среднюю ширину шва  $B_{\text{ш}}$  и затем площадь проплавления основного металла  $F_o = B_{\text{ш}} \cdot \delta$ . Результаты расчетов сведены в табл. 10.

Таблица 10

Толщина, мм	1,5	10	20	35
$V\delta$ , см <sup>2</sup> /с	0,27	1,39	2,78	4,86
$P$ , Вт	1045	4560	5670	10500
$q_{\text{н}}$ , Вт	940	4100	5100	9450
$E$ , Дж/см <sup>2</sup>	3480	2955	1840	1940
$K_1$	0,407	0,622	1,0	0,944

Толщина, мм	1,5	10	20	35
$K_2$	3,5	2	1,05	1,1
$B_u$ , см	0,115	0,173	0,091	0,095
$f$ , Гц	7,86	8,02	15,26	14,62
$q_{\text{эс}}$ , Вт	418	1615	1698	3103
$\eta_r$ , %	44,5	39,4	33,3	32,8

При увеличении свариваемой толщины более чем в 20 раз мощность луча увеличилась примерно в 10 раз. Поскольку скорость сварки на всех режимах была примерно на одном уровне, на больших толщинах существенно повысилась эффективность сварки: снизилась удельная энергия сварки.

Наибольшие вопросы вызывает расхождение расчетной средней ширины шва и данных опыта по ширине. Это может быть вызвано разными причинами, в том числе тем, что ширина шва в исходной таблице приведена по наружной поверхности пластины. Следует отметить, что при изменении частоты сварки в два раза изменение термического КПД значительно меньше и происходит противоположно частоте. Это подтверждает адекватность использования понятия частоты сварки для оценки проплавляющей способности процесса.

Из данных табл. 10 следует, что наименее энергетически эффективен режим на малой толщине  $\delta = 1,5$  мм. Энергетическая эффективность стабилизируется на толщинах 20...35 мм. При этом благодаря более высокому току луча на самой большой толщине имеет место самая высокая скорость соединения при сварке. Она на порядок превышает показатели традиционных способов дуговой сварки. Частота сварки в данном случае растет с увеличением толщины пластин. Информации о режимах электронно-лучевой сварки в литературе мало. В связи с определенной схожестью процессов при плазменной резке и ЭЛС данные о связи частоты резки и режимов резки могут быть использованы для оценки режимов электронно-лучевой сварки.

2. В табл. 11 приведены режимы электронно-лучевой сварки стали 42ХГСНА при ускоряющем напряжении 25 кВ. Определите зависимости скорости соединения сварки, удельной энергии свар-

ки, частоты и термического КПД от толщины свариваемых пластин. Теплофизические коэффициенты принять, как в условиях задачи 1. Проанализируйте полученные зависимости.

Таблица 11

№	1	2	3	4	5	6	7
$\delta$ , мм	2,2	3,0	4,5	5,0	15,0	20,0	30,0
$I_c$ , мА	100	140	180	200	240	250	400
$V_c$ , см/с	2,5	2,5	2,5	2,5	1,25	0,56	0,56

*Решение.* Примем значение эффективного КПД для электронно-лучевой сварки  $\eta_{\text{н}} = 0,9$ , температуру плавления стали  $1500^\circ\text{C}$ , теплопроводность стали  $\lambda = 0,4 \text{ Вт}/(\text{см}\cdot\text{К})$ , объемную теплоемкость  $C = 5,0 \text{ Дж}/(\text{см}^3\cdot\text{К})$ . Результаты расчетов сведем в табл. 12.

Таблица 12

№	1	2	3	4	5	6	7
$\delta$ , мм	2,2	3,0	4,5	5,0	15,0	20,0	30,0
$V\delta$ , см <sup>2</sup> /с	0,55	0,75	1,13	1,25	1,88	1,12	1,68
$P$ , Вт	2500	3500	4500	5000	6000	6250	10000
$q_w$ , Вт	2250	3150	4050	4500	5400	5625	9000
$E$ , Дж/см <sup>2</sup>	4090	4066	3580	3600	2870	5022	5360
$K_1$	0,368	0,36	0,419	0,418	1,05	1,34	1,256
$K_2$	4	4	3,5	3,5	1	0,7	0,8
$B_w$ , см	0,256	0,256	0,225	0,225	0,16	0,16	0,23
$f$ , Гц	9,77	9,77	11,1	11,1	7,81	3,5	2,46
$q_{\text{ж}}$ , Вт	1056	1440	1898	2110	2250	2688	2898
$\eta_r$ , %	46,9	45,7	46,9	46,9	41,7	47,9	32,2

С увеличением свариваемой толщины при постоянном напряжении луча увеличивается ток сварки и возрастает скорость соединения при сварке. На малых толщинах затраты удельной энергии сварки остаются примерно на одном уровне. При значительном увеличении толщины с 5 до 15 мм и незначительном увеличении эффективной мощности получено минимальное значение удельной энергии сварки. Это значение может служить ориентиром при

поиске оптимальных режимов сварки. Дальнейшее увеличение толщины металла приводит к росту удельной энергии сварки, что свидетельствует об оптимальности используемых режимов. Неоптимальность используемых режимов при сварке малых толщин может выражаться в увеличенной ширине шва, что дает возможность повысить скорость сварки.

3. В табл. 13 приведены режимы электронно-лучевой сварки сталей 30Х2ГСНВМ (ВЛ-1Д) и 42Х2ГСНМ (ВКС-1) на установке ЭЛУ-4 при ускоряющем напряжении 60 кВ. Скорость сварки для всех толщин 70 м/час. Определите зависимости скорости соединения при сварке, удельной энергии сварки, частоты сварки и термического КПД от толщины свариваемых пластин. Теплофизические коэффициенты принять такими же, как в условиях задачи 2. Сравните значения расчетной средней ширины шва по двум расчетным схемам: источника, движущегося с ограниченной скоростью, и быстродвижущегося источника. Проанализируйте полученные зависимости.

Таблица 13

№	1	2	3	4
Толщина, мм	1,5	2,0	3,0	4,0
Ток, мА	17	23	28	32

*Решение.* Примем значение эффективного КПД для электронно-лучевой сварки  $\eta_{\text{и}} = 0,9$ . Результаты расчетов сведем в табл. 14.

Таблица 14

№	1	2	3	4
Толщина, мм	1,5	2,0	3,0	4,0
$V\delta$ , см <sup>2</sup> /с	0,29	0,39	0,58	0,78
$P$ , Вт	1020	1380	1680	1920
$q_{\text{и}}$ , Вт	920	1240	1512	1728
$E$ , Дж/см <sup>2</sup>	3165	3185	2606	2215
$K_1$	0,614	0,608	0,748	0,87
$K_2$	2,1	2,1	1,6	1,3
$B_{\text{и}}$ , см	0,17	0,17	0,13	0,11

№	1	2	3	4
$B_2$	0,20	0,20	0,17	0,14
$f$ , Гц	11,44	11,44	15,0	17,7
$q_{ж}$ , Вт	372	496	569	642
$\eta$ , %	40,4	40,0	37,6	37,1

Удельная энергия сварки уменьшается с увеличением толщины пластин, что свидетельствует о неоптимальности режимов сварки на малых толщинах. Удельная энергия сварки несколько ниже, чем для малых толщин в предыдущей задаче, что может быть связано с различиями в теплофизических свойствах сталей. Средняя ширина шва, подсчитанная по формуле быстродвижущегося источника тепла, на 15...30% выше, чем для движущегося с ограниченной скоростью. Разница возрастает с увеличением свариваемой толщины.

4. Исходя из условий предыдущей задачи, скорректируйте режим сварки пластин толщиной 1,5 мм, ориентируясь на минимальные затраты удельной энергии сварки.

*Решение.* Минимальные удельные затраты энергии сварки  $E = 2215$  Дж/см<sup>2</sup> для толщины 4 мм. Из формулы

$$E = \frac{q_u}{V\delta}$$

получаем

$$q_u = E \cdot V_c \cdot \delta = 2215 \cdot 1,94 \cdot 0,15 = 646 \text{ Вт.}$$

Тогда полная мощность луча  $P = \frac{646}{0,9} = 718$  Вт, и при ускоряющем напряжении 60 кВ получаем ток луча 12 мА вместо 17 мА по приведенной таблице режимов. Очевидно, корректировка режима приведет к уменьшению ширины шва.

5. При электронно-лучевой сварке титанового сплава эффективная мощность луча 54 кВт. Глубина проплавления 100 мм при скорости сварки 0,5 см/с, а ширина провара 5,2 мм. Рассчитайте основные энергетические показатели режима сварки. Определите условное теплосодержание расплавляемого металла сварочной ванны по схеме линейного движущегося источника тепла в бесконечной пластине.

*Решение*

1. Скорость соединения при сварке  $J = 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ см}^2/\text{с}$ .
2. Удельный расход энергии  $E = \frac{54000}{5} = 10800 \text{ Дж}/\text{см}^2$ .
3. Частота сварки  $f = \frac{5}{0,52} = 9,6 \text{ Гц}$ .
4. Период сварки  $\tau = 0,104 \text{ с}$ .

Электронно-лучевая сварка обеспечивает скорости соединения при сварке более чем на порядок выше, нежели дуговая сварка, и в несколько раз меньшие энергетические затраты.

Произведение объемной теплоемкости  $C_v$  на приращение температуры металла сварочной ванны  $\Delta T_l$  назовем условным теплосодержанием металла  $H_y$ , поскольку она неопределенна и может быть рассчитана косвенным путем, например, как в данном случае, по ширине шва. Из формулы (6) получаем выражение для условного теплосодержания

$$H_y = \frac{0,484q_u}{B\delta V_c} = \frac{0,484 \cdot 54000}{0,52 \cdot 5} = 10052.$$

Теплосодержание титана при температуре плавления  $6070 \text{ Дж}/\text{см}^3$ . Известно, что при ЭЛС металл перегревается значительно выше температуры плавления и его значительная часть испаряется. Теплосодержание титана при температуре кипения составляет  $5 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{см}^3$ .

## 15. ОБЗОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

В ТГУ имеются две установки для электронно-лучевой сварки: одна – в корпусе НИЧ – А306.13, другая – СТЛ-1 в корпусе А (рис. 8). К сожалению, в настоящее время обе установки находятся в нерабочем состоянии, но на секции «Пайка» проводится лабораторная работа по электронно-лучевой сварке, связанная с расчётом параметров одной из установок.



Рис. 8. Установка электронно-лучевой сварки типа А306.13

## Установка СТЛ-1



Рис. 9. Внешний вид установки СТЛ-1

Таблица 15

### Технические характеристики установки СТЛ-1

Год создания	1985
Место эксплуатации	НИТИ «Прогресс»
Назначение	специализированная установка для ЭЛС ствольной коробки
Объем камеры, м <sup>3</sup>	0,075
Наибольшее перемещение:	
по продольной координате, мм	250
по поперечной координате, мм	–
по вертикальной координате, мм	50
Количество управляемых координат:	
механических	2
электронного луча	3 (x, y, ток луча)
Энергоблок	ЭЛА-50/5М
Управление	на базе УЧПУ «Маяк-221»

Сварка, косметический проход и термообработка четырех криволинейных проплавляемых швов производятся в автоматическом режиме одновременно двумя горизонтально расположенными навстречу друг другу электронными пушками.



## Установка ЭЛУРС-М

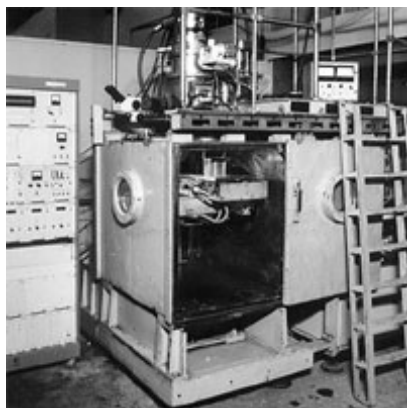


Рис. 10. Внешний вид установки ЭЛУРС-М

Таблица 16

### Технические характеристики установки ЭЛУРС-М

Год создания	1985
Место эксплуатации	НИТИ «Прогресс»
Назначение	специализированная установка для прецизионных работ
Объем камеры, м <sup>3</sup>	2
Наибольшее перемещение:	
по продольной координате, мм	400
по поперечной координате, мм	300
по вертикальной координате, мм	400
Наклон оси вращения, град.	0...90
Количество управляемых координат:	
механических	3
электронного луча	2
Энергоблок	ЭЛА-50/5М
Управление	на базе УЧПУ «Маяк-42»

*Особенности:* установка оснащена высокоточными вращателем, крестовым двухкоординатным столом с точностью позиционирования 0,005 мм (разработчик и изготовитель – НИТИ «Прогресс»), автоматической вакуумной системой.

## Установка ЭЛСМ-5005



Рис. 11. Внешний вид установки ЭЛСМ-5005

Таблица 17

### Технические характеристики установки ЭЛСМ-5005

Год создания	1994
Место эксплуатации	ОАО НПО «Ижмаш»
Назначение	специализированная установка для ЭЛС в серийном производстве
Объем камеры, м <sup>3</sup>	0,064
Максимальный диаметр свариваемого изделия, мм	240
Количество управляемых координат:	
механических	1
электронного луча	2
Энергоблок	ЭЛА-50/5М (50 кВ/5 кВт)
Управление	на базе УЧПУ «Маяк-42»

Сварка осуществляется отклонением электронного луча (может выполняться вращением детали). Система управления выполняет документирование основных параметров сварки (ускоряющее напряжение, ток луча, ток фокусировки, скорость сварки), диагностику состояния основных систем установки.

### Установка ЭЛСМ-03



Рис. 12. Внешний вид установки ЭЛСМ-03

Таблица 18

#### Технические характеристики установки ЭЛСМ-03

Год создания	2002
Место эксплуатации	ОАО «Воткинский завод»
Назначение	универсальная установка для ЭЛС
Объем камеры, м <sup>3</sup>	3
Наибольшее перемещение: по продольной координате, мм	600
по поперечной координате, мм	400
по вертикальной координате, мм	400
Максимальный диаметр свариваемого изделия, мм	800
Наклон оси вращения, град.	80
Количество управляемых координат: механических	5 (внутрикамерный манипулятор) 2 (устройство подачи присадочной проволоки)
электронного луча	3 (x, y, ток луча)
Энергоблок	СА-505 (75 кВ/7,5 кВт)
Управление	на базе УЧПУ «Маяк-600ЭЛС»

*Особенности:* может выполнять сварку отклонением луча по двум координатам, а также отклонением луча в совокупности с механическими перемещениями. Установка снабжена устройством подачи присадочной проволоки. Устройство работает в двух режимах сварки с присадочной проволокой: автоматическом и полуавтоматическом. Предусмотрено видеонаблюдение за процессом сварки.

**Установка электронно-лучевой сварки типа АЭЛТК-60/15-12**



Рис. 13. Внешний вид установки АЭЛТК-60/15-12

Предназначена для выполнения сварки в автоматическом режиме деталей типа тел вращения диаметром до 1500 мм, под различными углами оси вращения ( $0...90^\circ$ ), прямолинейных, продольных швов длиной до 1300 мм.

*Особенности:* может выполнять сварку отклонением луча по двум координатам, а также отклонением луча в совокупности с механическими перемещениями. Манипулятор имеет вертикальный ход в пределах 350 мм. Установка имеет дополнительный вращатель с горизонтальной осью вращения, грузоподъемностью до 1500 кг.

Система управления установкой обеспечивает:

- автоматическое и полуавтоматическое наведение луча на стык свариваемых деталей;
- контроль и стабилизацию тока проплавления;
- управление всеми механическими перемещениями;
- управление скоростью сварки;
- управление током луча, с привязкой к траектории сварки;
- управление модуляцией тока луча;
- управление развертками электронного луча;
- автоматический контроль основных параметров процесса сварки (ускоряющее напряжение, ток луча, ток фокусировки, скорость сварки);
- документирование основных параметров процесса сварки;
- автоматическое управление вакуумными системами.

Система управления реализована на базе ЧПУ «Маяк-600ЭЛС» с применением электрооборудования ведущих фирм-производителей.

Состав установки

1. Вакуумная камера.
2. Станция охлаждения.
3. Электрооборудование.
4. Источник питания.
5. Высоковакуумный блок.
6. Электронно-лучевая аппаратура.
7. Система управления на базе специального УЧПУ.
8. Форвакуумный блок.
9. Четырехкоординатный сварочный манипулятор.

Таблица 19

Технические характеристики

Характеристика	Значение
Базовая камера / объем, м <sup>3</sup>	ЭЛУ-19/12
Время откачки, мин:	
в камере до давления $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па	<30
в пушке до давления $6,5 \cdot 10^{-3}$ Па	<5
Грузоподъемность глобусного стола, кг	500
С горизонтальной осью вращения, кг	1500
Наибольшее перемещение по продольной координате, мм	1400

Характеристика	Значение
Наибольшее перемещение по вертикальной координате, мм	350
Максимальный диаметр свариваемого изделия	1520
Максимальная длина свариваемого изделия, мм	1300
Угол наклона планшайбы, град.	0...90
Количество управляемых координат: внутрикамерный манипулятор / электронный луч	4/3
Энергоблок (разработчик ИЯФ)	ЭЛА-60/15

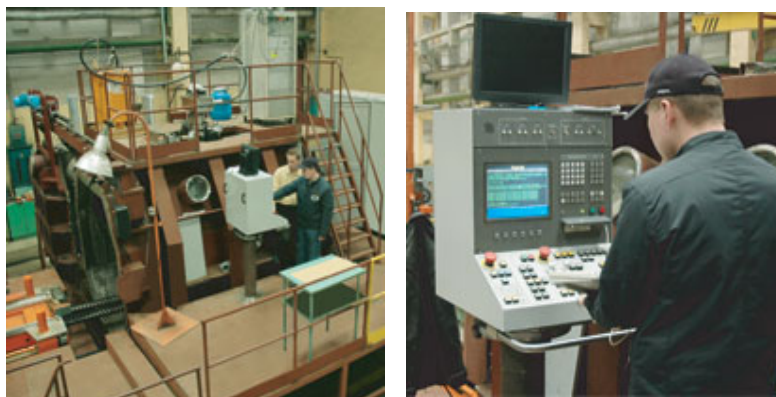


Рис. 14. Работа на установке АЭЛТК-60/15-12



Рис. 15. Один из узлов установки электронно-лучевой сварки типа ЭЛСМ-60/15-3,5

### *Назначение*

Одна установка изготовлена в 2003 году, эксплуатируется ОАО «УМПО» (г. Уфа), другая изготовлена в 2004 году, эксплуатируется ММПП «Салют» (г. Москва).

Предназначена для выполнения сварки в автоматическом режиме деталей типа тел вращения диаметром до 600 мм, под различными углами к оси вращения ( $0...90^\circ$ ), прямолинейных продольных швов длиной до 800 мм.

*Особенности:* может выполнять сварку отклонением луча по двум координатам, а также отклонением луча в совокупности с механическими перемещениями. Манипулятор имеет вертикальный ход в пределах 200 мм.

#### *Система управления установкой обеспечивает:*

- автоматическое и полуавтоматическое наведение луча на стык свариваемых деталей;
- контроль и стабилизацию тока проплавления;
- управление всеми механическими перемещениями;
- управление скоростью сварки;
- управление током луча, с привязкой к траектории сварки;
- управление модуляцией тока луча;
- управление развертками электронного луча;
- автоматический контроль основных параметров процесса сварки (ускоряющее напряжение, ток луча, ток фокусировки, скорость сварки);
- документирование основных параметров процесса сварки;
- автоматическое управление вакуумными системами.

Система управления реализована на базе ЧПУ «Маяк-600ЭЛС» с применением электрооборудования ведущих фирм производителей.

Таблица 20

### Технические характеристики

Характеристика	Значение
Базовая камера / объем, м <sup>3</sup>	ЭЛУ-9/3,5
в камере до давления $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па в пушке до давления $6,5 \cdot 10^{-3}$ Па	
Грузоподъемность сварочного манипулятора, кг	200

Характеристика	Значение
Наибольшее перемещение по продольной координате, мм	800
Наименьшее перемещение по продольной координате, мм	200
Максимальный диаметр свариваемого изделия, мм	600
Угол наклона планшайбы, град.	0...90
Количество управляемых координат: внутрикамерный манипулятор/ электронный луч	4/3
Энергоблок	ЭЛА-60/15

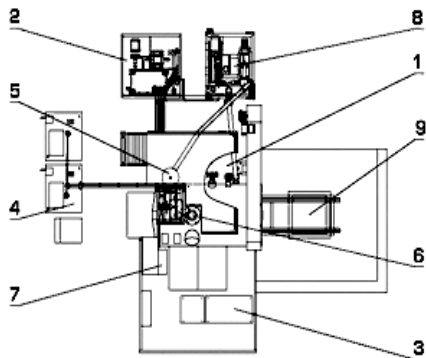


Рис. 16. Пульт управления установкой и насосная станция для получения вакуума: 1 – вакуумная камера; 2 – станция охлаждения; 3 – электрооборудование; 4 – источник питания; 5 – высоковакуумный блок; 6 – электронно-лучевая пушка; 7 – пульт управления; 8 – форвакуумный блок; 9 – сварочный манипулятор





Рис. 17. Установка для сварки в автоматическом режиме деталей типа тел вращения

### *Назначение*

Предназначена для сварки в автоматическом режиме деталей типа тел вращения диаметром до 1400 мм под различным углом к оси вращения, а также продольных швов длиной до 1000 мм.

*Особенности:* Электронная пушка расположена внутри камеры и имеет возможность перемещения по вертикальной координате на 600 мм. Сварка может осуществляться отклонением луча по двум координатам как отдельно, так и в совокупности с механическими перемещениями сварочного манипулятора.

*Система управления установкой обеспечивает:*

- управление вакуумной системой установки;
- управление всеми механическими перемещениями;
- управление скоростью перемещения;
- управление током электронного луча;
- управление развертками и модуляцией луча;
- автоматическое и полуавтоматическое наведение луча на стык свариваемых деталей;

- контроль и стабилизацию тока проплавления;
- автоматический контроль и документацию параметров процесса сварки;
- видеонаблюдение за процессом сварки.

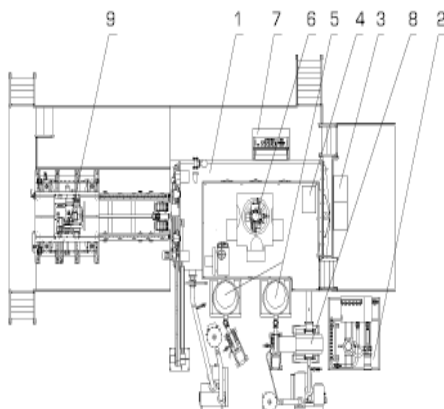


Рис. 18. Внешний вид узлов установки: 1 – вакуумная камера; 2 – станция охлаждения; 3 – электрооборудование; 4 – источник питания; 5 – высоковакуумный блок; 6 – электронно-лучевая пушка; 7 – пульт управления; 8 – форвакуумный блок; 9 – сварочный манипулятор

Система управления реализована на базе ЧПУ «Маяк-ЭЛС» с применением электрооборудования ведущих фирм производителей.

## Технические характеристики

Характеристика	Значение
Базовая камера / объем, м <sup>3</sup>	ЭЛУ10А / 20
Время откачки до давления $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па, мин	менее 30
Грузоподъемность сварочного манипулятора, кг	500
Наибольшее перемещение по продольной координате, мм	1000
Максимальный диаметр свариваемого изделия, мм	1400
Угол наклона планшайбы, град.	0...125
Количество управляемых координат:	
сварочный манипулятор	4
манипулятор пушки	1
электронный луч	3
Энергоблок:	
электронно-лучевая пушка	Орион-60/15
источник питания, кВ/кВт	60/15

**Электронно-лучевая аппаратура ЭЛТА-60***Назначение аппаратуры*

Электронно-лучевая технологическая аппаратура ЭЛТА-60 имеет три модификации: ЭЛТА-60.6, ЭЛТА-60.15 и ЭЛТА-60 – с максимальной выходной мощностью электронного пучка 6, 15 и 40 кВт соответственно и предназначена для однопроходной сварки в вакууме энергией ускоренных электронов, сфокусированных в пучок:

	ЭЛТА-60.6	ЭЛТА-60.15	ЭЛТА-60
сталей, толщиной до	25 мм	45 мм	65 мм
титана и его сплавов, толщиной до	30 мм	55 мм	70 мм
алюминия и его сплавов, толщиной до	35 мм	60 мм	90 мм

Состав и упрощенное функциональное построение аппаратуры ЭЛТА-60 показаны на рис. 19.

Конструктивно электронно-лучевую аппаратуру ЭЛТА-60 можно разделить на базовую часть (минимально возможная комплектация поставки) и на узлы и системы, поставляемые заказчику опци-

онально. Состав этих узлов и систем согласовывается заказчиком с изготовителем до подписания договора на поставку аппаратуры.

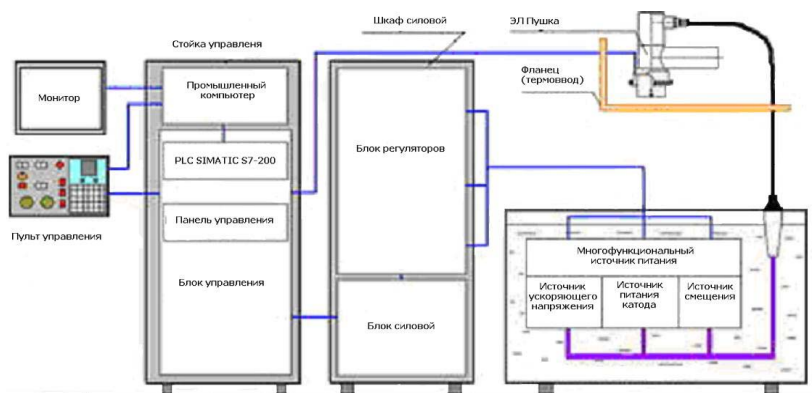


Рис. 19. Состав и упрощенное функциональное построение аппаратуры ЭЛТА-60

Таблица 22

### Основные эксплуатационные требования

Сеть электропитания	Три фазы с нейтралью 220/380 В ±10%, 50 Гц
Нагрузочная способность сети электропитания, не менее	15 кВА (ЭЛТА-60.6) 25 кВА (ЭЛТА-60.5) 55 кВА (ЭЛТА-60.40)
Заземление	Сопротивление, не более 3 Ом, сечение провода не менее 35 мм <sup>2</sup>
Температура рабочего помещения	15...35 °С
Относительная влажность в рабочем помещении	Не более 80%
Температура окружающей среды при хранении и транспортировании	(-25)...(+50) °С
Магистраль воды для охлаждения	Давление не менее 2...3 кг/см <sup>2</sup> , температура не более 25 °С, расход воды не более 5 л/мин
Подъемное устройство	Нагрузочная способность не менее 800 кг



Рис. 20. Базовая часть электронно-лучевой аппаратуры ЭЛТА-60

### ***Состав аппаратуры***

#### ***1. Электронно-лучевая пушка***

Электронно-лучевая пушка может устанавливаться как снаружи рабочей вакуумной камеры, так и внутри ее в любом пространственном положении. Вес и габаритные размеры электронно-лучевой пушки позволяют устанавливать ее внутри рабочей вакуумной камеры на манипуляторе с нагрузочной способностью не менее 70 кг.

Электронно-оптическая система пушки, обеспечивающая формирование аксиально-симметричного электронного пучка, выполнена по триодной схеме. Основными ее элементами являются:

- катод с косвенным подогревом, выполненный из монокристалла LaB<sub>6</sub>; эмитирует поток электронов, формирующийся впоследствии в аксиально-симметричный электронный пучок;
- прикатодный управляющий электрод (электрод Венельта); обеспечивает формирование заданного значения тока электронного пучка с требуемой стабильностью и пульсациями;
- анод, имеющий корпусной потенциал; обеспечивает ускорение электронов (к катоду относительно анода приложено напряжение 60 кВ) до необходимой скорости в направлении обрабатываемой детали.

Для получения острогофокусированного электронного пучка служит фокусирующая линза.

Для отклонения электронного пучка на угол до 7 градусов от оси пушки применена электромагнитная отклоняющая система.

Если электронно-лучевая пушка помещается внутри вакуумной камеры, для подвода к ней всех необходимых коммуникаций используется проходной фланец (термоввод). На фланце имеются все необходимые проходные разъемы, штуцеры, обеспечивающие ввод/вывод воды для охлаждения пушки и турбомолекулярного насоса, а также специальное отверстие для ввода в камеру высоковольтного кабеля пушки. Этот фланец устанавливается заказчиком в удобном месте на вакуумной камере.

## 2. Высоковольтный источник



Рис. 21. Внешний вид высоковольтного источника

Высоковольтный многофункциональный источник питания (максимальная мощность 15 кВт; ускоряющее напряжение 60 кВ) фирмы TECHNIX (Франция), показанный на рис. 21, включает:

- блок ускоряющего напряжения;
- блок питания смещения пушки;
- блок питания катода пушки.

В качестве таких источников применены блоки с высокочастотным преобразователем, построенные с применением современных мощных полупроводниковых элементов IGBT-технологии.

Конструкция и схемотехнические решения, заложенные в источнике ускоряющего напряжения, позволяют осуществлять плавный выход на рабочий режим ускоряющего напряжения при его включении и подавление электрических разрядов в электронно-лучевой пушке в случае их возникновения.

Конструктивно высоковольтный многофункциональный источник питания помещен в бак с трансформаторным маслом, выполняющим как роль высоковольтного изолятора, так и охладителя. С помощью специального насоса обеспечивается циркуляция трансформаторного масла внутри бака.

### 3. Шкаф силовой



Рис. 22. Внешний вид силового шкафа

Шкаф силовой выполнен в стандартной стойке, внутри которой устанавливаются:

- блок регуляторов (рис. 22);
- силовой блок.

Блок регуляторов работает совместно с высоковольтным многофункциональным источником питания.

Силовой блок представляет собой набор коммутационных устройств, обеспечивающих подключение аппаратуры к сети питания и автоматическое включение и отключение аппаратуры. Силовой шкаф устанавливается на расстоянии не более 1 м от высоковольтного источника.

### 4. Стойка управления

В стойке размещены следующие блоки:

- системный блок промышленного компьютера (индустриальное исполнение) с набором модулей ввода/вывода;
- панель управления;
- микроконтроллер Simatic S7-200 (на базе CPU 224);
- вторичные источники питания;
- блок управления.

Широкофункциональный и высоконадежный программируемый логический микроконтроллер серии SIMATIC S7-200 фирмы SIEMENS обеспечивает контроль и анализ сигналов обратных связей, а также организацию всей автоматики в работе аппаратуры.

Блок управления представляет собой набор печатных плат, источников питания и устройств автоматики.

На панель управления выведены следующие органы управления и индикации:

- включение/отключение сети питания;
- аварийное отключение ускоряющего напряжения и катода пушки;
- включение/отключение режима тренировки пушки;
- регулятор изменения ускоряющего напряжения в режиме тренировки пушки;
- стрелочный индикатор ускоряющего напряжения.

#### *5. Пульт управления*

В аппаратуре предусмотрен пульт управления, который может располагаться на расстоянии до 5 м от стойки управления.

На панели пульта управления расположены следующие элементы управления и индикации:

- включение/отключение ускоряющего напряжения;
- включение/отключение питания катода пушки;
- регулятор тока бомбардировки;
- аварийное отключение ускоряющего напряжения и катода пушки;
- регулятор тока сварки;
- регулятор тока фокусировки.

#### *6. Турбомолекулярный насос*

Использование турбомолекулярного насоса производительностью не менее 100 л/с для дифференциальной откачки анодно-катодной области пушки обеспечивает получение в этой области



давления не более  $5 \cdot 10^{-5}$  торр при рабочем давлении в вакуумной камере не более  $6 \cdot 10^{-4}$  торр. Это значительно уменьшает вероятность возникновения пробоев в пушке, повышает надежность работы аппаратуры, продлевает срок работы катода.

### 7. Рабочее место оператора

Рабочее место оператора включает:

- стол для размещения монитора промышленного компьютера и пульта управления;
- стул.

Таблица 23

Основные технические характеристики аппаратуры ЭЛТА-60

	ЭЛТА-60.6	ЭЛТА-60.15	ЭЛТА-60.40
Максимальная мощность электронного пучка, кВт	6	15	40
Ускоряющее напряжение, кВ	60	60	60
Диапазон изменения тока электронного пучка, мА	1...100	1...250	1...650
Нестабильность ускоряющего напряжения, не более	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$
Нестабильность тока сварки, не более	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$
Диапазон изменения тока фокусировки, мА	400...999	400...999	400...999
Диапазон изменения тока бомбардировки, мА	10...50	10...50	10...50
Рабочее расстояние между пушкой и деталью, мм	100...500	100...500	100...500
Длина высоковольтного кабеля, м	до 15	до 15	до 15
Максимальная потребляемая мощность аппаратуры, кВА, не более	10	20	50
Вес аппаратуры, кг, не более	1000	1000	1000

1. *Параметры системы диагностирования.* Система диагностирования позволяет осуществлять контроль:

- функционирования системы охлаждения;
- ускоряющего напряжения;
- состояния клапана пушки;
- состояния клапана насоса;
- готовности рабочего объема;
- предельного значения тока фокусировки;

- отсутствия электронного пучка на лучепроводе пушки;
- состояния катодного узла пушки;
- эмиссионной способности катода.

2. *Параметры устройства технологической развертки электронного пучка.* Устройство (генератор) технологической развертки вырабатывает сигналы, позволяющие осуществлять технологическую развертку электронного пучка по окружности и линии.

Частота генератора регулируется в пределах от 20 до 1000 Гц с дискретностью 1 Гц.

Максимальный угол отклонения электронного пучка от оси электронно-лучевой пушки составляет 3 градуса. Установка размера технологической развертки электронного пучка осуществляется занесением в соответствующее окно пользовательского интерфейса управляющего компьютера числа от 0 до 999 с дискретностью 1.

3. *Параметры системы формирования начала и окончания сварочного процесса.* Система позволяет осуществлять управление током сварки в начале сварочного процесса и управление током сварки и током фокусировки при его окончании.

Ток сварки в начале сварочного процесса (переход из режима СТОП в режим СВАРКА) возрастает до установленного значения по заданной программе за установленное время. Программа изменения тока сварки разбита на 20 временных интервалов, на каждом из которых ток сварки может принимать значения от 0 до 1 крат установленной величины тока сварки. Длительность начала сварочного процесса может быть установлена от 1 до 10 секунд с дискретностью 1 секунда.

При окончании сварочного процесса (переход из режима СВАРКА в режим СТОП) по заданным программам за установленное время изменяется ток сварки и ток фокусировки. Программа разбита на 20 временных интервалов, на каждом из которых ток сварки может принимать значения от 0 до 1,2 крат установленной величины тока сварки, а ток фокусировки – от 0,9 до 1,1 крат установленной величины тока фокусировки. Длительность окончания сварочного процесса может быть установлена от 1 до 140 секунд с дискретностью 1 секунда.

4. *Параметры системы фиксированного отклонения электронного пучка.* Система позволяет отклонять электронный пучок на требуемый фиксированный угол от оси электронно-лучевой пушки в любом направлении. Осуществляется это подачей фиксированных токов на отклоняющие катушки X-X и Y-Y электронно-лучевой пушки.

Таблица 24

Основные технические характеристики системы

Максимальный угол отклонения от оси пушки, град., не более	7
Диапазон изменения токов отклонения в катушках X-X и Y-Y, мА	(-600)...0...(+600)
Нестабильность токов отклонения на величине $\pm 600$ мА	$\pm 0,5\%$

Установка величины фиксированного отклонения электронного пучка осуществляется с помощью управляющего компьютера. На пользовательском интерфейсе в соответствующие окна заносятся значения величин токов в катушках отклонения X-X и Y-Y от -600 до +600 мА с дискретностью 1 мА.

5. *Видеоконтрольное устройство.* Видеоконтрольное устройство позволяет осуществлять наблюдение поверхности свариваемого изделия и точное наведение электронного пучка на кромки стыка свариваемого изделия. Вывод изображения осуществляется на экран монитора индустриального компьютера.

Таблица 25

Основные характеристики

Размер получаемого изображения	256×256 пикселей
Размер наблюдаемого участка изделия при расстоянии от нижнего края ЭЛ пушки до изделия не менее 100 мм	20×20 мм
Формат изображения	jpg, bmp
Скорость вывода изображения на экран монитора, кадр/с:	
при медленной развертке	2
при быстрой развертке	4
Количество символов в строке «Комментарий», не более	20 шт.

Текущее изображение может быть сохранено с последующим его выводом на экран монитора.

Возможна печать запомненного изображения (принтер в комплект поставки ЭЛТА-60 не входит).

*6. Параметры системы регистрации и документирования процесса сварки.* Система регистрации и документирования процесса сварки осуществляет:

– запоминание в процессе сварки реально получаемых значений:

- тока сварки;
- тока фокусировки;
- напряжения «венельт–катод»;
- тока бомбардировки;
- ускоряющего напряжения;

– построение в одном из окон пользовательского интерфейса временных зависимостей реально полученных и заданных значений тока сварки и тока фокусировки, а также реально полученных значений напряжения «венельт–катод», тока бомбардировки и ускоряющего напряжения;

– запись полученных зависимостей на жесткий диск управляющего компьютера.

### ***Дополнительно поставляемые устройства и системы электронно-лучевой технологической аппаратуры ЭЛТА-60***

Базовая часть электронно-лучевой технологической аппаратуры ЭЛТА-60 может быть доукомплектована одним или несколькими дополнительно поставляемыми устройствами и системами, расширяющими ее специфические возможности. Следовательно, выбор необходимых дополнительно поставляемых устройств и систем позволяет получить электронно-лучевую технологическую аппаратуру ЭЛТА-60, максимально адаптированную для решения стоящих задач при минимальных затратах.

*1. Устройство низкочастотной технологической развертки.* Устройство обеспечивает низкочастотную технологическую развертку по окружности путем подачи на отклоняющие катушки X-X и Y-Y электронно-лучевой пушки токов синусоидальной и косинусоидальной формы соответственно. При этом обеспечиваются следующие параметры:

Диапазон изменения частоты	0,01...1 Гц
Дискретность установки частоты	0,01 Гц
Угол перекрытия сварки	0...180 град.
Угол нарастания/спада тока сварки	0...90 град.
Диапазон изменения амплитуды (диаметра) развертки при расстоянии от нижнего края пушки до изделия 200 мм	0...30 мм
Дискретность установки амплитуды развертки при расстоянии от нижнего края пушки до изделия 200 мм	0,03 мм

*2. Видеосистема.* Видеосистема обеспечивает:

- визуализацию на экране дополнительного монитора зоны «деталь—пушка» рабочего объема (вакуумной камеры);
- наблюдение в процессе сварки за формированием сварочного шва.

Использование видеосистемы позволяет оператору полностью исключить использование смотровых окон в рабочей камере в период всего сварочного процесса.

В состав видеосистемы входят CCD-видеокамера и монитор.

Видеосистема поставляется как отдельный узел.

*3. Принтер.* Принтер предназначается для вывода на печать (документирования) необходимой информации, а именно:

- изображения, полученного при использовании видеоконтрольного устройства;
- временных графиков, построенных с помощью системы мониторинга и документирования процесса сварки.

### ***Работа с пользовательским интерфейсом программы управления аппаратуры ЭЛТА-60***

Интерфейс управляющей программы содержит следующие панели:

- Параметры
- Блокировки
- Ручное управление
- Формирование шва
- Режимы работы

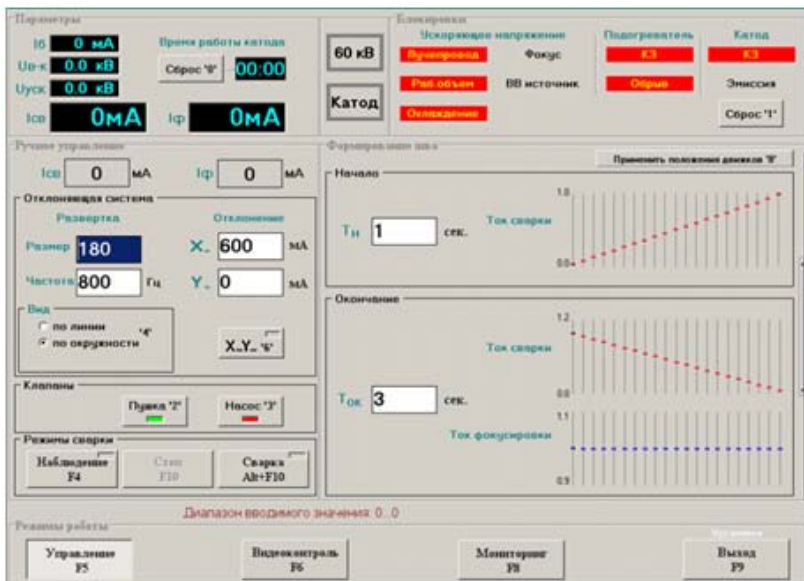


Рис. 23. Внешний вид панели «Параметры»

Панель «Параметры» является информационной панелью, отображающей следующую информацию:

- величина тока сварки  $I_6$ ;
- величина напряжения между вентилью и катодом  $U_{в-к}$ ;
- величина ускоряющего напряжения  $U_{уск}$ ;
- величина тока сварки  $I_{св}$ ;
- величина тока фокусировки  $I_ф$ ;
- время работы катода.

Клавишей «0» клавиатуры время работы катода можно сбросить в нуль.

После смены катода это позволяет оператору отслеживать общее время работы катода.

Красный фон полей 60 kV и КАТОД означает включенное состояние ускоряющего напряжения и катода, зеленый контур вокруг этих полей дает разрешение на включение ускоряющего напряжения и катода.

Панель «Блокировки» отображает состояние блокировок ускоряющего напряжения, подогревателя и катода. При срабатывании

блокировки соответствующая надпись окрашивается в красный цвет. Также на этой панели размещена кнопка **Сброс** (или клавиша **1** клавиатуры), которая позволяет отключить режим самоблокировки отдельных блокировок.

Панель «**Ручное управление**» отображает информацию о следующих задаваемых параметрах аппаратуры:

- ток сварки и ток фокусировки, задаваемые с пульта;
- параметры отклоняющей системы:
- размер, частота и вид развертки;
- величина постоянного отклонения электронного луча во взаимно перпендикулярных направлениях;
- состояние клапанов пушки и насоса (открыт/закрыт);
- режимы сварки, задаваемые с клавиатуры и характеризующие значение тока электронного луча.

Переключение между полями редактирования производится стрелками клавиатуры. Информация о допустимом диапазоне параметра выводится в строке подсказки. В случае попытки ввода неверного значения параметра его значение остается прежним, равным значению до начала его редактирования.

Значения параметров в полях редактирования можно изменять, увеличивая или уменьшая на единицу или на десять.

Для увеличения или уменьшения значений на **единицу** необходимо пользоваться клавишами вверх-вниз клавиатуры, удерживая нажатой при этом клавишу **Ctrl**.

Для увеличения или уменьшения значений на **десять** необходимо пользоваться клавишами вверх-вниз клавиатуры, удерживая нажатой при этом клавишу **Shift**.

Панель «**Отклоняющая система**» содержит окна редактирования для управления параметрами развертки. При развертке по линии взаимно перпендикулярные направления развертки **X** и **Y** можно менять местами нажатием клавиши **5**.

Введенные значения постоянного отклонения луча вступают в силу после нажатия соответствующей кнопки (или клавиши **6**). Если кнопка предварительно нажата, то изменение отклонения по **X** или по **Y** происходит сразу после его введения в окошко редактирования.

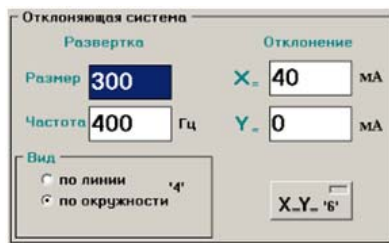


Рис. 24. Внешний вид панели «Отклоняющая система»

Панель «Режимы сварки» содержит кнопки выбора режима сварки: «Наблюдение», «Стоп» и «Сварка».



Рис. 25. Внешний вид панели «Режимы сварки»

Кнопки меню дублируются указанными на них горячими клавишами клавиатуры.

В режиме «Наблюдение» реальное значение тока луча в сто раз меньше установленного с пульта значения тока сварки.

Панель «Формирование шва» содержит элементы управления процессом начала и окончания сварки.

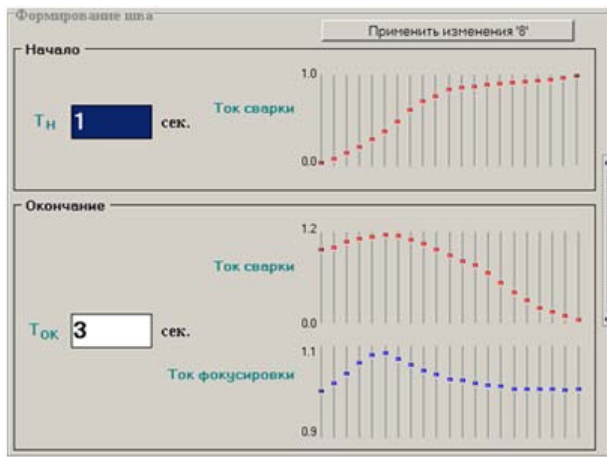


Рис. 26. Внешний вид панели «Формирование шва»



Время выхода тока сварки на значение, заданное с пульта ( $T_n$ ), и время окончания сварки ( $T_{ок}$ ) задаются с клавиатуры. Изменения тока сварки в начале и тока сварки и фокусировки при окончании сварки осуществлены в соответствии с кривыми, образованными движками. Управлять движками можно с помощью мыши (щелчком левой кнопки по движку) или стрелок клавиатуры. Список горячих клавиш для управления с клавиатуры можно вызвать непосредственно на интерфейс, нажав клавишу **F1**. Повторное нажатие на эту клавишу убирает панель подсказки.

Чтобы все произведенные с движками изменения вступили в силу, необходимо нажать клавишу **8** клавиатуры или кнопку **Применить изменения**.

Панель **«Режимы работы»** отображает текущий режим работы аппаратуры и содержит кнопки для переключения управления параметрами аппаратуры или вакуумной системы, кнопки включения видеоконтрольного устройства или мониторинга и кнопку выхода из программы.



Рис. 27. Внешний вид панели **«Режимы работы»**

Нажатие этих кнопок можно производить с клавиатуры функциональными клавишами, обозначенными на соответствующих кнопках.

Кнопка **Установки** (или клавиша **«С»** клавиатуры) позволяют включать аппаратуру в режиме настройки ее параметров.

Кнопка **Видеоконтроль** (или клавиша **F6** клавиатуры) позволяет включать/отключать видеоконтрольное устройство (**ВКУ**). Этот режим работы доступен только в режиме сварки **СТОП**. Панель **управления ВКУ** при нажатой кнопке ВКУ появляется на месте панели **«Формирование шва»**.

Кнопка **Мониторинг** (или клавиша **F8** клавиатуры) позволяет включать/отключать режим мониторинга основных параметров аппаратуры с возможностью архивирования временных изменений параметров.



Рис. 28. Панель установки режимов сварки

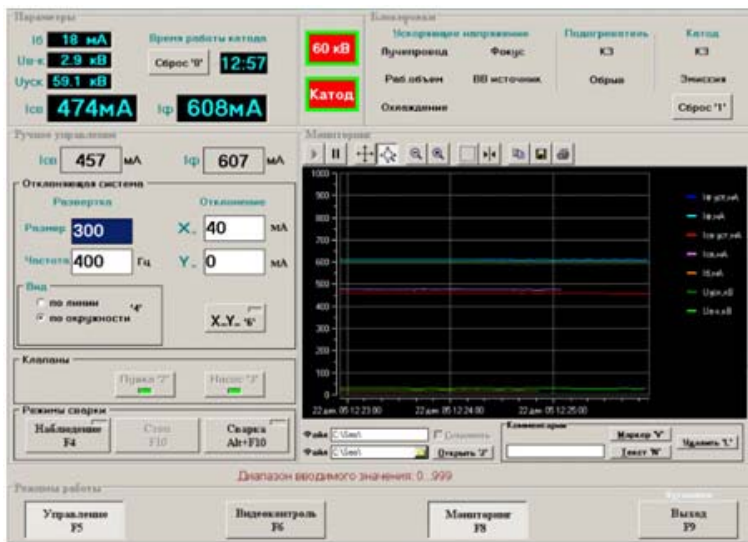


Рис. 29. Внешний вид панели «Мониторинг»

Панель «**Мониторинг**» в верхней части содержит набор инструментов, состоящих из пяти групп кнопок, позволяющих оптимально настроить окно просмотра графиков.

В нижней части панели расположены кнопки и окна редактирования, позволяющие сохранять сеансы работы аппаратуры в файл и помещать на графики комментарии.

Кнопка **Выход** (или клавиша **F9** клавиатуры) позволяет выйти из программы в Windows. При выходе из программы сохраняются настроечные и конфигурационные данные программного обеспечения. Весь сеанс работы аппаратуры сохраняется при выходе из программы в файл в том случае, если в панели «**Мониторинг**» присутствует галочка в окошке **Сохранять** на момент выхода из программы.

Панель «**ВКУ**» содержит: кнопку доступа к меню работы с файлом изображения 1, кнопку доступа к меню работы с настройками программы 2, окно изображения 3 и строку комментария к изображению 4.

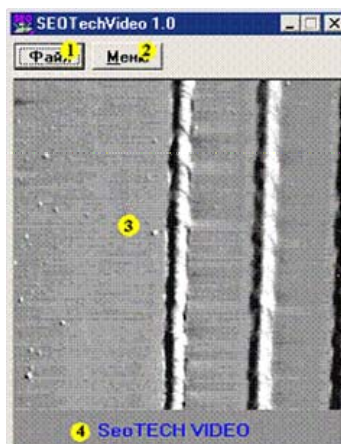


Рис. 30. Внешний вид панели «**ВКУ**»

#### **Файл:**

- сохранение файла изображения;
- открытие файла изображения;
- редактирование строки комментария.

### Меню:

- вывод маркера и прицела на изображение;
- регулировка яркости и контрастности изображения;
- уменьшение скорости сканирования, выбор режима развертки.

Файл содержит следующие пункты:

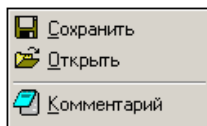


Рис. 31. Возможности панели меню «Файл»

«*Сохранить*» – сохранение файла изображения на диск.

«*Открыть*» – при выборе этого пункта меню выводится запрос, какое именно изображение из памяти компьютера вывести на экран монитора, после чего выбранное изображение появится в окне просмотра, рядом с текущим изображением:

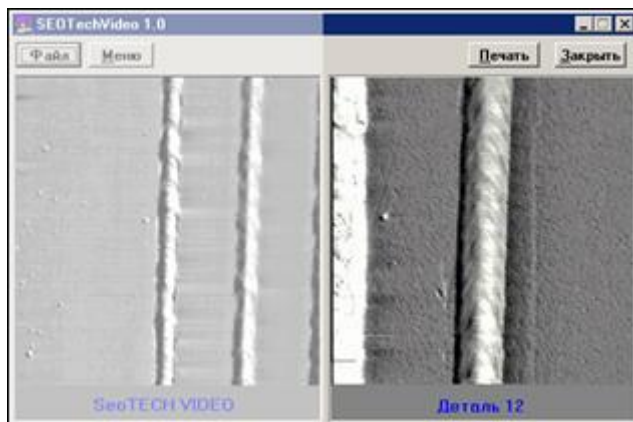


Рис. 32. Изображение, появляющееся при выборе пункта «Открыть»

«*Печать*» – вывод на принтер открытого из файла изображения.

«*Закреть*» – закрытие окна просмотра.

«*Комментарий*» – при выборе этого пункта меню можно изменить текст комментария. Новый текст нужно внести в предлагаемую строку, ограниченную двадцатью символами. Этот комментарий сохранится под изображением и при сохранении файла.

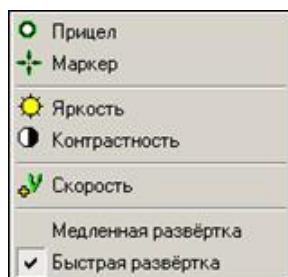


Рис. 33. Возможности панели меню «Комментарий»

Меню содержит следующие пункты:

«*Прицел*» – на изображении появляется метка в виде окружности. Диаметр окружности изменяется перемещением скrolла вправо-влево либо соответствующими клавишами клавиатуры.

«*Маркер*» – на изображении появляется метка в виде перекрестия, с помощью которой осуществляется точное наведение электронного пучка на требуемую точку поверхности изделия.

«*Яркость*» – регулировка производится перемещением скrolла вправо-влево либо соответствующими клавишами клавиатуры.

«*Контрастность*» – регулировка производится перемещением скrolла вправо-влево либо соответствующими клавишами клавиатуры. Нажатие правой кнопкой мыши позволяет выбирать грубую или плавную регулировку контрастности.

«*Скорость*» – при уменьшении скорости сканирования улучшается качество изображения за счет накопления замеров в точке. Регулировка производится перемещением скrolла вправо-влево или соответствующими клавишами клавиатуры.

Медленная развёртка обеспечивает высокое качество изображения, используется при точном наведении на стык.

Быстрая развёртка используется в качестве обзорного режима.

Оптимальное по четкости и резкости изображение достигается помимо регулировок находящихся в *Меню* программы установкой максимально допустимого значения тока электронного пучка в пределах 0,5...1,5 мА и тока фокусирующей линзы электронно-лучевой пушки.

### **Установка ЭЛТУ-60.15/1.1**

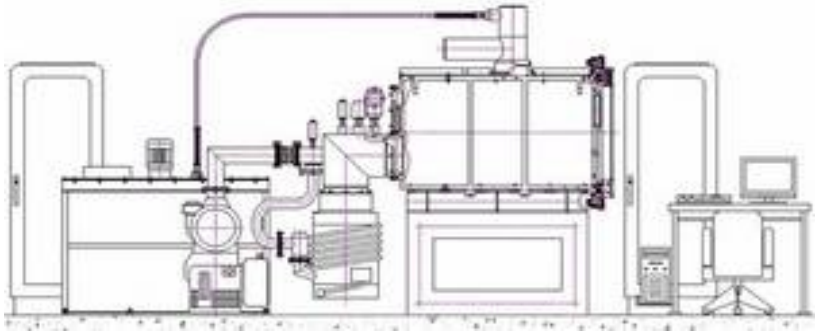


Рис. 34. Схема установки ЭЛТУ-60.15/1.1

Электронно-лучевая сварочная установка ЭЛТУ-60.15/1.1 предназначена для однопроходной сварки в вакууме по линейной и кольцевой траектории различных по твердости и химической активности металлов и сплавов толщиной до 30 мм за счет преобразования высокой кинетической энергии ускоренных электронов в тепловую энергию при их соударении с металлом.

Оборудование для электронно-лучевой сварки спроектировано и изготовлено НИТИ «Прогресс».

### **Установка для электронно-лучевой сварки прецизионных изделий УЭЛС-905А**

Установка предназначена для прецизионной сварки в вакууме точных изделий и узлов приборов из конструкционных сталей, алюминия, меди и их сплавов, тугоплавких и активных металлов толщиной от 0,05 до 5 мм; электронно-лучевой пайки; термообработки; электронно-ионной модификации поверхностей.

Установка может быть использована в производстве авиаконструкций, электроклапанов,



Рис. 35. Внешний вид установки УЭЛС-905А

датчиков скоростей, углов и высоты; чувствительных элементов, гироскопических приборов, изделий электронной техники, мед-техники, а также в пищевой промышленности и в производстве товаров народного потребления.

*Преимущества:*

- длительный ресурс работы электронно-ионного источника (до 550 А·ч);
- возможность работы в широком диапазоне давлений вакуумной камеры (0,1333...0,001333 Па);
- возможность обработки деталей с горизонтальной, вертикальной и наклонной осями вращения, выполнение линейных швов.

Таблица 27

Технические характеристики

Параметр	Значение
Максимальная мощность электронного луча, кВт	2,5
Диаметр электронного луча в фокусе, мм	0,3...0,5
Внутренние размеры вакуумной камеры, мм	340×240×315
Производительность, шов/ч	до 60
Время откачки камеры до рабочего давления, с	180
Напряжение питающей сети, В	380/220
Частота тока, Гц	50
Давление проточной воды, ат	3...4
Потребляемая мощность, кВт, не более	5
Габаритные размеры установки, мм	340×285×322

В установке УЭЛС-905АМ используется **электронно-лучевая пушка ПЭЛ-901** с плазменным источником электронов, имеющая существенные преимущества по сравнению с термокатодными источниками электронов:

- возможность работы в широком диапазоне давлений;
- высокий ресурс (~550 А·ч);
- возможность сварки сильногазящих материалов (в том числе циркония и его сплавов), сварка которых с использованием термокатодных источников затруднена из-за быстрой их окисляемости;
- высокая производительность за счет исключения потерь времени на нагрев, остывание, смену катода;

- исключение образования пустот в шве при высоковольтных пробоях ускоряющего промежутка электронной пушки.



Рис. 36. Электронно-лучевая пушка ПЭЛ-901

Электронно-лучевые пушки с плазменным источником электронов технологичны (не имеют спаев металла с керамикой), просты в изготовлении и могут использоваться в установках электронно-лучевой сварки с ускоряющим напряжением до 25 кВ.

***Установка АСТК-30/6-10***

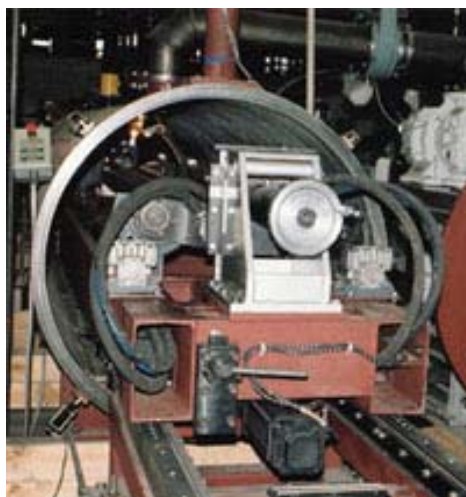


Рис. 37. Внешний вид установки АСТК-30/6-10



### *Назначение*

Установка изготовлена в 2005 году, эксплуатируется ОАО «ЧМЗ» (г. Глазов). Предназначена для сварки в автоматическом режиме брикетов из спрессованного порошка или губки циркония.

### *Особенности*

Вакуумная система реализована с применением насосов фирмы LEYBOLD. Электронно-лучевая пушка с плазменным катодом. В источнике питания применен высоковольтный блок SPELLMAN SR6.

Система управления установкой обеспечивает:

- управление вакуумной системой установки;
- управление всеми механическими перемещениями;
- управление скоростью перемещения;
- управление током электронного луча;
- управление развертками и модуляцией луча;
- автоматический контроль и документирование параметров процесса сварки;
- видеонаблюдение за процессом сварки.

Система управления имеет централизованную структуру и реализована с применением электрооборудования ведущих фирм производителей (Siemens, Lenze и др.)

### *Состав системы управления:*

- центральный пульт управления Siemens Panel PC 670;
- блок управления вакуумом;
- блок приводной (механических перемещений) – позиционирующая система на базе Lenze Position Controlle;
- блок управления ЭЛА – ICP Electronics.

Таблица 28

### Технические характеристики

Объем камеры, м <sup>3</sup>	10
Время откачки до давления $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па, мин	менее 25
Грузоподъемность сварочного манипулятора, кг	1500
Наибольшее перемещение по продольной координате, мм	3600
Максимальный диаметр свариваемого изделия, мм	300
Максимальная скорость сварки, мм/с	5,56

Количество управляемых координат: сварочный манипулятор	2 (вращение и продольное перемещение)
электронный луч	3
Энергоблок: электронно-лучевая пушка источник питания, кВ/кВт	Элион-30/6  30/6

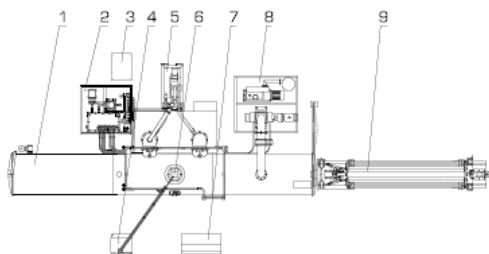


Рис. 38. Внешний вид пульта управления установкой и откачивающей системы: 1 – вакуумная камера; 2 – станция охлаждения; 3 – электрооборудование; 4 – источник питания; 5 – высоковакуумный блок; 6 – электронно-лучевая пушка; 7 – пульт управления; 8 – форвакуумный блок; 9 – сварочный манипулятор

## 16. СРАВНЕНИЕ СВАРКИ ЛАЗЕРОМ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Электронно-лучевая сварка частей зубчатых колес более экономична, чем сварка лазером.

### *Сравнение почасовых показателей для установки*

Расчет стоимости за единицу при сварке синхронизаторов автомобильных передач в соответствии с DVS 3211 (стандарт немецкого общества сварщиков) (табл. 29).

Таблица 29

	Электронный луч		Лазер		Единица измерения
	1 смена	3 смены	1 смена	3 смены	
Капиталовложения	500000		500000		Евро
Амортизация 6 лет (1 смена)	65,10		65,10		Евро/ч
Амортизация 3 года (3 смены)		46,30		46,30	Евро/ч
Вмененный процент (12% капиталовложение /2)	23,44	8,33	23,44	8,33	Евро/ч
Плата за аренду помещения (100 м <sup>2</sup> при 4 евро/мес.)	0,25	0,08	3,75	1,34	Евро/ч
Плата за техническое обслуживание (2% от капвложений)	7,81	2,78	7,81	2,78	Евро/ч
Стоимость эксплуатации					
Установочная мощность	10	10	85	85	кВт
Стоимость электроэнергии (0,1 евро/кВт/ч)	1,00	1,00	8,50	8,50	Евро/ч
Газы для лазера: CO <sub>2</sub> 2,8 л/ч			0,02	0,02	Евро/ч
He 54 л/ч			0,54	0,54	Евро/ч
N <sub>2</sub> 29 л/ч			0,15	0,15	Евро/ч
Инертный газ He 20 л/ч			12,00	12,00	Евро/ч
Рабочее питание	1	1	1	1	Евро/ч
Показатель для установки, ч	98,60	59,49	122,31	80,95	Евро/ч
Время нетто для 1 смены 1600 ч/год	в наличии		80%	1280	ч/год
Время нетто для 3 смен 4800 ч/год	в наличии		75%	3600	ч/год

	Электронный луч		Лазер		Единица измерения
	1 смена	3 смены	1 смена	3 смены	
Капиталовложения	500000		500000		Евро
Цена за единицу при сварке синхронизаторов					Евро/ч
Глубина сварки: 5 мм / сварка – диаметр	85 мм				Евро/ч
Скорость прихватки (время) 100 мм/с	100 мм/с		2,67	2,67	Евро/ч
Скорость сварки (время)	50 мм/с		5,34 с	5,34 с	Евро/ч
Вспомогательное время	2,0	2,0	2,0	2,0	с
Время такта	10,0	10,0	10,0	10,0	с
Стоимость за единицу при полном использовании	0,27	0,17	0,34	0,23	Евро
Единиц в год	460291	1294569	460291	1294569	единиц

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА ВЫШЕ, ЧЕМ ЛАЗЕРНОГО**

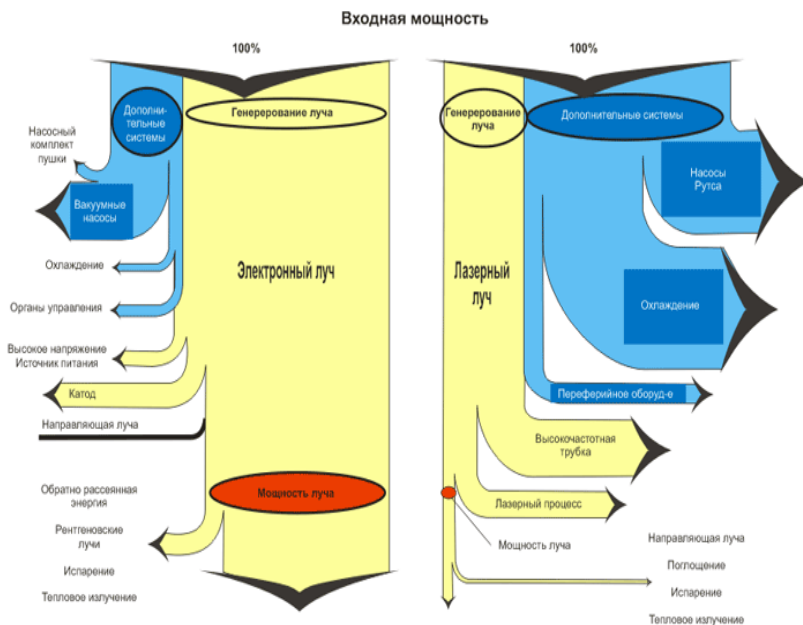


Рис. 39. Диаграммы баланса мощности при ЭЛС и ЛС

## Вопросы для самоконтроля

1. Что дает применение импульсной электронно-лучевой сварки?
2. На каком принципе основаны перемещение электронного пучка по детали и фокусировка пучка?
3. Для чего необходима фокусирующая система при электронно-лучевой сварке?
4. На каком принципе работает фокусирующая система при ЭЛС?
5. Влияние времени импульса и паузы на размеры сварного шва при лучевой сварке.
6. Целесообразно ли использование электронно-лучевой сварки при серийном и массовом производстве?
7. С какой целью производят поперечные колебания луча относительно направления сварки?
8. Для каких целей используют при электронно-лучевой сварке двухкамерные установки?
9. Как увеличить глубину проплавления детали при электронно-лучевой сварке?
10. За счет чего регулируют ток луча?
11. Каким параметром регулируют кинетическую энергию электронов луча?
12. С какой целью в электронной пушке применяют поперечное магнитное поле?
13. Для чего необходима система отклонения луча при электронно-лучевой сварке?
14. Какая концентрация энергии рекомендуется при электронно-лучевой сварке легкоплавких материалов?
15. Для чего применяется запирающий катод при электронно-лучевой сварке?
16. Достоинства ЭЛС.
17. Каков верхний предел степени вакуума в электронной пушке?
18. Каков верхний предел степени вакуума в сварочной камере в двухкамерной ЭЛУ?
19. Какой электрод испускает электроны при ЭЛС?
20. За счет чего электронный луч погружается в изделие?
21. Основные элементы установок для ЭЛС.
22. Дефекты, присущие ЭЛС.

23. Укажите основные параметры процесса ЭЛС.
24. Почему при расчете ЭЛС можно использовать схему линейного источника тепла?
25. Каковы требования к точности поддержания зазора в стыке при ЭЛС?
26. Какой способ дефектоскопии наиболее применим к соединениям при ЭЛС?
27. При каком условии возможно образование подрезов при ЭЛС?
28. Какие меры принимаются для обеспечения качества сварного соединения при ЭЛС деталей с большой разницей толщин?
29. При какой разнице толщин соединяемых деталей необходимо принимать специальные технологические меры?
30. В чем отличие сварки однородных и разнородных металлов?
31. Область применения ЭЛС по типам свариваемых металлов.
32. Ограничения применения ЭЛС.
33. Какой способ сварки наиболее близок к ЭЛС по сущности формирования сварочной ванны?
34. Почему интегральная скорость при ЭЛС намного выше, чем при дуговой сварке?
35. Каков максимальный объем сварочной камеры современных ЭЛУ?
36. Сколько времени уходит на создание вакуума в самых больших современных ЭЛУ?
37. Какие параметры режима сварки добавляются при переходе от стационарного процесса ЭЛС к импульсному?
38. Какова частота следования импульсов и пауз при импульсной ЭЛС?
39. В чем причина повышения качества сварного соединения при ЭЛС высокопрочных сталей?

## ТЕСТЫ

1. Для каких из перечисленных металлов наиболее целесообразно применение электронно-лучевой сварки?

- 1) низкоуглеродистых конструкционных
- 2) низколегированных конструкционных
- 3) титановых конструкционных сплавов

2. Одна из сил, действующих в сварочной ванне при ЭЛС – это:

- 1) электромагнитная сила от протекающего в сварочной ванне тока
- 2) сила отдачи испаряющегося металла
- 3) сила статического электричества

3. Форма сварочной ванны при ЭЛС:

- 1) цилиндр
- 2) конус
- 3) параллелепипед

4. Какие значения коэффициента формы шва характерны для ЭЛС?

- 1) единица
- 2) два
- 3) 10 и более

5. Каков максимальный диаметр пятна нагрева при ЭЛС?

- 1) 0,1 мм
- 2) 1,0 мм
- 3) 5 мм

6. Зачем при ЭЛС создают вакуум в зоне сварки?

- 1) для защиты металла от кислорода воздуха
- 2) во избежание рассеивания электронного пучка
- 3) для удаления газов из свариваемого металла

7. Зачем в пушках для ЭЛС используют высокий вакуум?

- 1) для получения максимальной энергии электронного пучка
- 2) во избежание рассеяния электронного пучка
- 3) А и Б

8. Какова длина пробега пучка электронов в металле?

9. Требования к зазору при электронно-лучевой сварке:

- 1) не более 1 мм
- 2) не более 0,1 мм
- 3) не более 0,4 мм

10. Почему конструкции, сваренные электронно-лучевой сваркой, меньше деформируются, чем при дуговой сварке?

- 1) из-за значительного снижения площади проплавления
- 2) из-за отсутствия разделки кромок
- 3) А и Б

11. Каковы значения токов электронного луча при ЭЛС?

- 1) десятки микроампер
- 2) десятки миллиампер
- 3) несколько ампер

12. Каковы значения напряжения электронного луча при ЭЛС?

- 1) десятки киловольт
- 2) несколько сотен вольт
- 3) несколько вольт

13. Какая интегральная скорость сварки достигается при ЭЛС?

- 1) 0,1 см<sup>2</sup>/с
- 2) 5 см<sup>2</sup>/с
- 3) 1 см<sup>2</sup>/с

14. Чем свариваемый металл защищается от кислорода воздуха при ЭЛС?

- 1) инертным газом
- 2) вакуумом
- 3) азотом

15. В чем причина низкой общей производительности ЭЛС?

- 1) низкие скорости сварки
- 2) значительное время на создание вакуума в сварочной камере
- 3) затраты времени на разделку кромок и ее заполнение



16. Какой показатель лучше характеризует энергетическую эффективность ЭЛС?

- 1) удельная энергия сварки
- 2) погонная энергия сварки
- 3) термический КПД

17. Какой показатель лучше характеризует технологическую производительность ЭЛС?

- 1) скорость сварки
- 2) удельная скорость сварки  $\frac{V}{\delta}$ , где  $\delta$  – толщина детали
- 3) интегральная скорость сварки  $V_c \cdot \delta$

18. В каких пределах варьируется эффективный КПД процесса ЭЛС различных металлов?

- 1) 0,4...0,5
- 2) 0,6...0,8
- 3) 0,8...0,9

19. За счет чего обеспечивается высокая производительность процесса ЭЛС?

- 1) высокого эффективного КПД луча
- 2) высокой равномерной концентрации энергии по толщине детали
- 3) высокой концентрации энергии луча на поверхности детали

20. Каким показателем следует оценивать, насколько узкий шов получен при ЭЛС при сварке разных толщин?

- 1) средней шириной шва  $B_{cp}$
- 2) коэффициентом формы шва  $\psi = \frac{\delta}{B_p}$
- 3) максимальной шириной шва  $B_{max}$

21. Верхний предел свариваемых толщин на современных ЭЛУ?

- 1) 30 мм
- 2) 100 мм
- 3) 400 мм

## ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Разработать технологию электронно-лучевой сварки продольного шва обечайки.

Первая цифра варианта означает вид металла, вторая цифра варианта – толщину обечайки, третья – длину обечайки, четвертая – ее диаметр.

Таблица 31

Цифра варианта	1	2	3	4	5
Тип металла	Сталь 30ХГСА	X18H10T	AMг6	BT-20	Сталь 20
Толщина, мм	30	40	50	80	100
Длина	500	600	800	1000	1200
Диаметр	300	400	500	600	800

### Порядок выполнения работы

1. В рекомендованной литературе найти и описать особенности ЭЛС заданного типа материала.

2. Рекомендовать зазор для заданного соединения.

3. Подобрать установку для ЭЛС минимально возможных габаритов, исходя из того, чтобы обечайка по своим размерам могла быть установлена под сварку.

4. Определить режимные параметры, которые может обеспечить данная установка по току луча и напряжению.

5. Задать коэффициент формы сварного шва по отношению к толщине, учитывая рекомендации, приводимые в специальной литературе.

6. Рассчитать среднюю ширину сварного шва.

7. Рассчитать значение безразмерного параметра  $П1 = \frac{2\delta\Delta T}{q_u}$ .

8. С помощью номограммы, приводимой в данном учебном пособии, по параметру  $П1 = \frac{2\delta\Delta T}{q_u}$  определить критерий Пекле  $П2 = \frac{V_c B}{2a}$ .

9. Исходя из установленной ширины шва, по критерию Пекле  $\frac{V_c B}{2a}$  рассчитать необходимую скорость сварки  $V_c$ .

10. По аналогичной методике определить ширину зоны термического влияния для характерной температуры, найденной в разделе 1.

11. Рассчитать показатели эффективности полученного режима сварки: скорость соединения, удельную энергию сварки, частоту и период сварки.

12. Сравнить полученные расчетные значения режимов сварки с рекомендуемыми в литературе.

13. Сравнить показатели эффективности ЭЛС с показателями одного из рекомендуемых для данного способа и широко используемых способов сварки.

14. Сделать выводы по работе.

### ***Пример выполнения контрольной работы***

Номер варианта: 1234

Исходные данные:

- 1) материал обечайки – сталь 30ХГСА;
- 2) толщина обечайки – 40 мм;
- 3) длина обечайки – 780 мм;
- 4) диаметр обечайки – 580 мм.

#### *Особенности электронно-лучевой сварки стали 42Х2ГСНМА*

Этот вид сварки целесообразен во всех случаях, когда необходимо с высокой производительностью и при ограниченной термообработке получать сварные соединения, равнопрочные с основным металлом – высококачественной, металлургически и термически улучшенной среднелегированной сталью. Соединения, сваренные электронным лучом, отличаются высокой стойкостью против образования холодных трещин, а также минимальной величиной сварочных деформаций. Отмеченные преимущества способа обусловлены высокой концентрацией и большой скоростью нагрева, кинжальной формой проплавления основного металла, большими скоростями кристаллизации и охлаждения сварочной ванны и сварного соединения в целом.

Удельная энергия однопроходной ЭЛС в несколько раз меньше, чем при других способах сварки плавлением. Так, в случае стыкового соединения металла толщиной 30 мм она составляет примерно 4180 Дж/см<sup>2</sup>, что в 10 раз меньше, чем при дуговой сварке под флюсом. Благодаря большим скоростям нагрева и охлаждения в электронно-лучевых соединениях формируется весьма мелкозернистая структура металла шва и предельно ограничиваются

перегрев и разупрочнение околошовной зоны. Ширина столбчатых кристаллитов и ликвационных прослоек по их границам при ЭЛС значительно меньше, чем при дуговой однопроходной сварке стали такой же толщины.

ЭЛС с большой скоростью значительно повышает производительность процесса в особенности при замене многослойной электродуговой сварки однопроходной электронно-лучевой.

Сталь 42ХГСНМА относится к высокопрочным легированным. Ее химический состав... Ее механические свойства:  $\sigma_b = 2050$  МПа.

Таблица 1

Режимы ЭЛС стали 42ХГСНМА разной толщины.  $U_n = 25$  кВ

Толщина, мм	$I_n$ , МА	$V_c$ , см/с	J, Дж/см <sup>2</sup>
2,2	100	2,5	3954
3,0	140	2,5	4060
4,5	180	2,5	3464
5,0	200	2,5	3464
15,0	240	1,25	2784
20,0	250	0,56	4855
30,0	400	0,56	6214

Примечание: эффективный КПД принят 0,87.

Из данных табл. 1 следует, что с увеличением толщины металла при малых толщинах удельная энергия сварки имеет тенденцию к снижению, а в области больших толщин начинает возрастать.

Таблица 2

Режимы сварки, прочность и степень разупрочнения для сварных соединений стали 42ХГСНМА (после низкого отпуска). Толщина 4,5 мм

Способ	I, А	U, В	$V_c$ , см/с	J, Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , МПа	Степень разупрочнения, %
АРДС	240	27	1,52	5675	1600	22
ЭЛС	0,18	$24 \cdot 10^3$	2,50	3464	1920	6

К трудностям ЭЛС среднелегированных сталей средних и больших толщин относится чувствительность к повышенному содержанию в основном металле углерода, легирующих элементов и газов,

в частности, кислорода. Так, например, при сварке сталей толщиной более 30 мм с содержанием более 0,2% углерода в швах возникают кристаллизационные трещины. Если содержание кислорода в стали превышает 0,02%, ЭЛС становится практически невозможной из-за повышенного разбрызгивания жидкого металла и образования пор в шве. В то же время при сварке сталей толщиной до 25 мм при соответствующем выборе режимов сварки обеспечивается качественное соединение без пор и трещин даже при содержании 0,3% углерода (например, сварка трубчатых узлов из стали 30ХГСНА). Для данной толщины стыкового соединения (40 мм) зазор не должен превышать 0,1 мм.

### **Расчетная часть**

Рассмотрев приведенные в пособии [1] установки, находим, что для сварки данной обечайки подходит установка ЭЛСМ –60/15-3,5. Первое число означает напряжение электронно-лучевой пушки 60 кВ, второе число – мощность пушки 15 кВт. Определяем максимальный ток луча  $I = 15000/60000 = 0,25 \text{ А} = 250 \text{ мА}$ .

Установка предназначена для выполнения сварки в автоматическом режиме деталей типа тел вращения диаметром до 600 мм, под различными углами к оси вращения (0...90°), прямолинейных, продольных швов длиной до 800 мм. Поэтому данная установка подходит для сварки данной обечайки.

Задаем коэффициент формы шва – отношение толщины к средней ширине шва примем 10. Тогда средняя ширина шва  $B_{\text{ш}} = 4 \text{ мм}$ .

Эффективный КПД электронного луча при сварке стали 30ХГСА согласно табл. ... пособия [1] составляет 0,8. Тогда эффективная мощность луча при токе 0,2 А

$$q_u = 60 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 0,8 = 9600 \text{ Вт.}$$

Рассчитываем параметр  $\Pi_1 = \frac{2\delta\Delta T}{q_u}$  номограммы. Теплофизические свойства сплава принимаем на основе табл. ...

$$K_1 = \frac{2 \cdot 3,14159 \cdot 0,4 \cdot 1500}{9600} = 0,393.$$

По номограмме отыскиваем параметр  $\frac{V_c B}{2a} = 3,5$ . Отсюда

$$V_c = \frac{3,5 \cdot 2 \cdot 0,08}{0,4} = 1,4 \text{ см/с.}$$

Скорость соединения при сварке

$$J = \delta V_c = 4 \cdot 1,4 = 5,6 \text{ см}^2/\text{с.}$$

Удельная энергия сварки

$$E = \frac{q_u}{J} = \frac{9600}{5,6} = 6860 \text{ Дж/см}^2.$$

Частота сварки

$$f = \frac{J}{F_{uu}} = \frac{5,6}{4 \cdot 0,4} = 3,5 \text{ Гц.}$$

Таким образом, за 1 секунду получаем площадь соединения, равную 3,5 площади поперечного сечения шва.

Период сварки

$$t = \frac{1}{f} = 0,29.$$

Площадь соединения, равная площади поперечного сечения шва, образуется за 0,29 секунды.

В литературе находим режим сварки данной толщины. В задаче 2 пособия [1] для сварки легированной стали толщиной 30 мм при ускоряющем напряжении 25 кВ ток луча составлял 400 мА, эффективная мощность 8700 Вт. Скорость соединения при сварке 1,68 см<sup>2</sup>/с, удельная энергия сварки  $E = 8700/1,68 = 5179$  Дж/см<sup>2</sup>. Значение  $E$  из опытных данных на 25% меньше, чем в приведенном выше расчете. Однако в расчете получили интегральную скорость сварки в 3,3 раза выше. Это говорит о возможностях получения оптимальных режимов. К сожалению, для экспериментальных режимов отсутствуют данные о средней ширине сварного шва.

## Библиографический список

1. Банов, М.Д. Специальные способы сварки и резки / М.Д. Банов, В.В. Масаков, Н.П. Плюснина. — М. : Академия, 2009. — 208 с.
2. Теория сварочных процессов / под ред. В.В. Фролова. — М. : Высш. шк., 1988. — 559 с.
3. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов [и др.]. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 752 с.
4. Сидоров, В.П. Теория и технология сварочных процессов : сб. задач / В.П. Сидоров. — Тольятти : ТГУ, 2009. — 228 с.
5. Электронно-лучевая сварка деталей большой толщины. Инженерный поиск / Е.Л. Мамутов. — М. : Машиностроение, 1992. — 232 с.
6. Дьяконов, В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ / В.П. Дьяконов. — М. : Наука, 1987. — 240 с.
7. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. — М. : Машиностроение, 1974. — 768 с.
8. Акулов А.И. Технология и оборудование сварки плавлением / А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич. — М. : Машиностроение, 1977. — 432 с.
9. Кайдалов, А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии / А.А. Кайдалов. — Киев : Экотехнология, 2004. — 260 с.

## Содержание

Введение.....	3
1. Сущность процесса.....	5
2. Свариваемые материалы.....	14
3. Особенности сварных соединений при ЭЛС.....	18
4. Технологические схемы сварки.....	21
5. Подготовка поверхности к сварке.....	22
6. Факторы, сдерживающие применение электронно-лучевой сварки.....	24
7. Тенденции развития ЭЛС .....	26
8. Схемы установок для ЭЛС.....	28
9. Рабочие камеры.....	31
10. Слежение за положением пятна нагрева.....	33
11. Области применения электронно-лучевых установок.....	34
12. Техника безопасности при работе на установках ЭЛС.....	35
13. Тепловые процессы при ЭЛС.....	36
14. Примеры решения задач.....	40
15. Обзор оборудования для электронно-лучевой сварки.....	46
16. Сравнение сварки лазером и электронно-лучевой сварки.....	82
Вопросы для самоконтроля.....	84
Тесты .....	86
Варианты заданий контрольной работы .....	89
Библиографический список.....	94



Учебное издание

*Сидоров Владимир Петрович*  
*Мельзитдинова Анна Викторовна*

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА.  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
И ОБОРУДОВАНИЕ

Учебное пособие

Редактор *О.И. Елисеева*  
Технический редактор *З.М. Малявина*  
Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*  
Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 11.07.2013. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 5,58.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-49-12.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

