

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Б.М. Федоров, А.И. Мисюров,
Н.А. Смирнова

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

В двух частях

Часть 1

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

*Методические указания к лабораторным работам
по курсу «Технология машиностроительного производства»*

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2009

УДК 621.791.72
ББК 34.5
Ф333

Рецензент *В.П. Морозов*

Федоров Б.М., Мисюров А.И., Смирнова Н.А.

Ф333 Технология обработки материалов концентрированными потоками энергии: Метод. указания к лабораторным работам по курсу «Технология машиностроительного производства»: В 2 ч. – Ч. 1: Технология и оборудование электронно-лучевой обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 36 с.: ил.

В методических указаниях рассмотрены оборудование и технологические особенности процессов электронно-лучевой сварки, наиболее часто применяемые в машиностроении.

Для студентов, изучающих курс «Технология машиностроительного производства».

УДК 621.791.72
ББК 34.5

Учебное издание

**Борис Михайлович Федоров
Александр Иванович Мисюров
Наталья Анатольевна Смирнова**

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Часть 1

Редактор *А.К. Яковлева*
Корректор *Г.С. Беляева*
Компьютерная верстка *О.В. Беляевой*

Подписано в печать 23.04.2009. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 2,09. Тираж 50 экз. Изд. № 13.
Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009

Работа № 1. УСТРОЙСТВО И РАБОТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ УСТАНОВКИ

Цель работы – изучение состава, устройства, принципа работы электронно-лучевой установки (ЭЛУ) и последовательности действий по подготовке ее к работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основные теоретические сведения

Электронный пучок, как технологический инструмент, позволяет осуществлять нагрев, плавление и испарение практически всех материалов, а также сварку и размерную обработку, нанесение покрытий и запись информации. Такая универсальность электронного пучка дает возможность использовать одно и то же оборудование для различных технологических целей и совмещать в одном цикле обработки различные технологические процессы.

Формирование электронного пучка

Процесс формирования электронного пучка для технологических целей можно разбить на следующие основные стадии.

1. Получение свободных электронов.
2. Ускорение электронов электростатическим полем (магнитное поле не изменяет их энергию) и формирование электронного пучка.
3. Изменение поперечного сечения пучка (чаще всего фокусировка на обрабатываемой поверхности).
4. Отклонение электронного пучка для обеспечения требуемой траектории перемещения точки встречи с обрабатываемой поверхностью.

Электрон, как устойчивая материальная частица, может быть получен различными способами. Свободный, не связанный с атомом электрон можно получить, если сообщить атому избыточную

энергию, поглощая которую электрон переходит на более удаленные от ядра орбиты и может при этом потерять связь с ядром. Если это происходит в результате нагрева, то освобождающиеся электроны называются *термоэлектронами*, а процесс их выхода с поверхности твердых тел – *термоэлектронной эмиссией*.

Сила тока эмиссии в ЭЛУ лежит в широких пределах $10^{-6} \dots 30$ А. Ее значение зависит от вида обработки, технологического режима и определяется материалом и конструкцией катода электронной пушки.

Ускорение электронов (УЭ) осуществляется с помощью создаваемого в электронной пушке (ЭП) между катодом (К) и анодом (А) электрического поля, в котором на электрон действует сила

$$F = eE,$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; E – напряженность электрического поля, В/м.

При движении в электрическом поле с разностью потенциалов U , В, под действием силы F , Н, электрон приобретает энергию, равную eU , эВ. Приращение энергии происходит в результате увеличения кинетической энергии. Если начальная скорость электрона равна нулю, а конечная – v , км/с, то

$$eU = \frac{mv^2}{2},$$

где $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона. Отсюда получим выражение для скорости

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m}} U = 593,2 \sqrt{U} \text{ км/с.}$$

Величина ускоряющего напряжения в значительной мере зависит от назначения процесса. Электронно-лучевые установки с низковольтными ЭП ($U = 15 \dots 30$ кВ), более простые по конструкции и в эксплуатации, применяются для плавки и сварки металлов. Электронно-лучевые установки с промежуточным ускоряющим напряжением ($U = 50 \dots 80$ кВ) применяются для сварки металлов. Электронно-лучевые установки с высоковольтными ЭП ($U = 100 \dots 200$ кВ) являются наиболее сложными в изготовлении и эксплуатации, применяются для прецизионной обработки и сварки металлов сверхбольших толщин (до 400 мм). Мощность ЭП в зависимости от ее назначения колеблется от 0,5 до 1000 кВт. Установки с маломощными ЭП применяются для микросварки и размерной обработки, а с мощными – для вакуумной плавки металлов.

Изменять направление движения электрона можно с помощью электростатических и магнитных полей. Последние получили наибольшее распространение при реализации на практике систем проведения пучка. Согласно законам электродинамики, на движущийся в магнитном поле электрон действует сила, H :

$$F = Bv \sin \alpha,$$

где B – магнитная индукция поля, Тл $\left(\frac{H}{Kл} \right)$; v – скорость дви-

жения электрона, км/с; α – угол между вектором скорости и магнитной силовой линией поля, град. Под действием этой силы электрон будет двигаться в магнитном поле по окружности, перпендикулярной силовым магнитным линиям поля. Траектория движения электрона под действием магнитного поля и инерционных сил имеет вид спирали, радиус которой зависит от начальной скорости электрона и напряженности магнитного поля.

Воздействуя на движущиеся электроны электромагнитным полем, которое создают с помощью магнитной фокусирующей линзы (короткой катушки с током), можно обеспечить сходимость их траекторий в одной точке (фокусе линзы), т. е. осуществить фокусировку. Изменяя положение фокуса пучка по вертикали, перпендикулярно обрабатываемой поверхности, можно менять концентрацию энергии на обрабатываемой поверхности, что представляет интерес с технологической точки зрения.

Для перемещения электронного пучка по обрабатываемой поверхности обычно используют его взаимодействие со скрещенными поперечными магнитными полями, создаваемыми отклоняющими катушками. Благодаря малой массе электронов ЭЛ достаточно легко перемещать по обрабатываемой поверхности при практически любой форме траектории.

Электронный пучок можно получить только в вакууме, так как при соударениях с молекулами атмосферных газов электроны отдают свою энергию и пучок «рассеивается». Средняя длина свободного пробега электрона в газе, м, по газокинетической теории определяется выражением

$$\lambda_e = 1/(\pi n \sigma^2),$$

где n – молярная концентрация газа на пути движения электрона, м⁻³; σ – размер эффективного сечения ионизации молекулы газа пролетающим электроном, м.

Для воздуха (при $T = 293$ К) в зависимости от давления P средняя длина свободного пробега электрона составляет:

P , Па	λ_e , м
$1,01 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^{-7}$
133	$2,66 \cdot 10^{-4}$
1,33	$2,66 \cdot 10^{-2}$
$1,33 \cdot 10^{-2}$	2,66

Для надежной работы ЭП допустимое значение давления должно быть порядка 10^{-2} Па. На практике его стараются довести до $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па, так как при низком вакууме в ЭП увеличивается число ионизированных электронами молекул остаточных газов, что может привести к электрическому пробое зазора между анодом и катодом.

Оборудование для электронно-лучевой обработки

Широкие технологические возможности электронно-лучевой обработки привели к появлению в промышленности целого ряда специализированных установок для плавки, сварки, испарения, размерной обработки. По своим параметрам электронно-лучевое оборудование может сильно различаться. Вместе с тем во всех ЭЛУ имеются системы, сходные по своему функциональному назначению и принципам действия. Каждая установка (рис. 1.1) состоит из двух комплексов: электромеханического (вспомогательного) и энергетического (аппаратуры, предназначенной непосредственно для формирования пучка электронов, управления его интенсивностью и положением).

Электромеханический комплекс включает в себя вакуумную камеру с вакуумной системой, а также системы позиционирования и перемещения заготовки, наблюдения за ходом процесса и ряд других. В зависимости от технологического процесса некоторые составляющие электромеханического комплекса могут в нем отсутствовать.

Вакуумная камера, как базовый элемент ЭЛУ, определяется видом технологического процесса и является одним из наиболее важных и сложных узлов. К конструкции вакуумной камеры предъявляются следующие требования:

1) размеры камеры должны быть достаточными для размещения обрабатываемых заготовок, и вместе с тем необходимо стремиться к уменьшению ее объема, чтобы сократить время создания вакуума (откачки);

- 2) камера должна быть герметичной и одновременно обеспечивать легкий доступ к рабочей зоне на подготовительной стадии обработки;
- 3) конструкция камеры должна быть прочной и жесткой;
- 4) материал камеры должен обладать минимальным газовыделением и хорошо поглощать рентгеновское излучение, возникающее в зоне обработки.

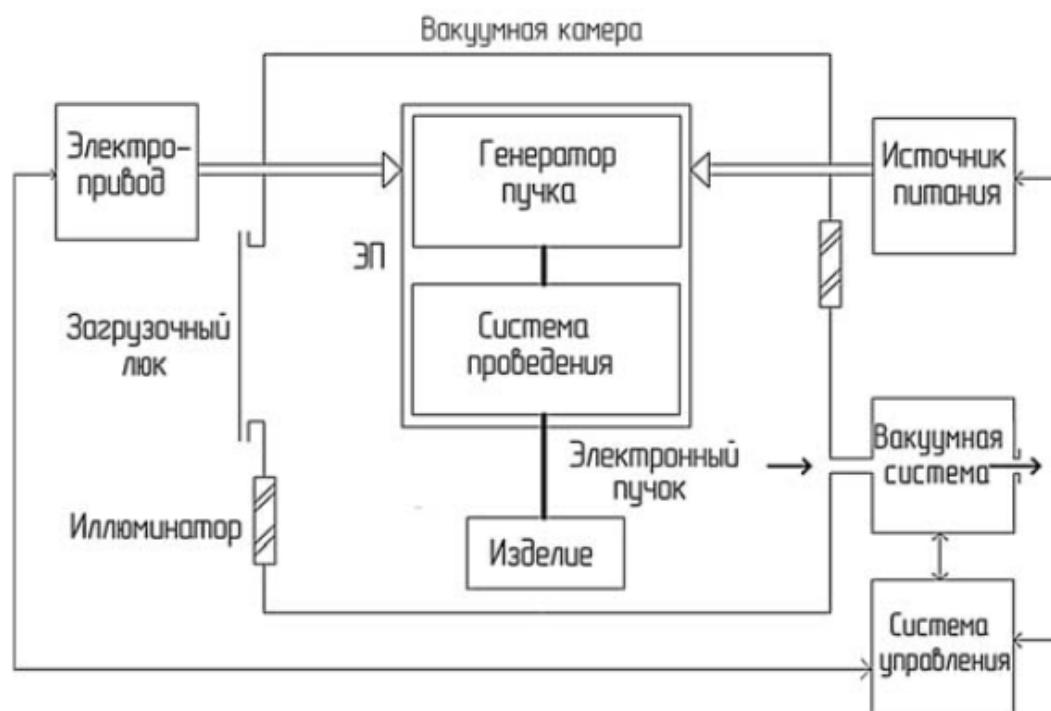


Рис. 1.1. Схема технологической ЭЛУ

В промышленности используются камеры, различные по форме и размерам (в основном цилиндрические и прямоугольные). Наиболее часто их изготавливают с помощью сварки из низкоуглеродистых конструкционных сталей (сталь 20). Камеры установок для размерной обработки и микросварки, где остаточное магнитное поле влияет на точность позиционирования электронного пучка, изготавливают из немагнитного материала (нержавеющая сталь). Толщина стенок в зависимости от размеров камеры лежит в пределах от 10 до 25 мм. Объем камер может достигать сотен кубических метров. В качестве вакуумных уплотнителей обычно используют эластичные упругие прокладки из вакуумной резины или фторопласта.

Вакуумная система предназначена для создания и поддержания в рабочем объеме электронной пушки необходимого вакуума. Обычно вакуумная система включает в себя форвакуумный механический насос, который обеспечивает откачку, понижая давление

от атмосферного до 10^{-1} Па, и диффузионный паромасляный насос, который выполняет откачку до 10^{-3} Па и ниже. Если попадание паров рабочих жидкостей (масел) в откачиваемый объем недопустимо, то применяют насосы других типов (сорбционные, магниторазрядные, ионные, турбомолекулярные).

Система позиционирования имеет магнитный принцип функционирования.

Система перемещения является двухкоординатной или вращательной.

Иллюминаторы ЭЛУ (система наблюдения за ходом процесса) обычно выполняют из толстого стекла, выдерживающего давление атмосферного воздуха, и специального свинцового стекла для защиты от рентгеновского излучения. В результате испарения металла иллюминаторы интенсивно запыляются, что резко снижает видимость. Для борьбы с запылением используют различные устройства с защитными пленками, которые перематывают или меняют по мере запыления.

Энергетический комплекс обычно состоит из ЭП с источником питания и системой управления.

Электронная пушка может быть неподвижной, закрепленной на вакуумной камере, или подвижной, перемещаемой относительно неподвижного изделия (сварка крупногабаритных изделий сложной формы). В последнем случае особые требования предъявляются к высоковольтному кабелю, соединяющему пушку с источником питания. Основными факторами, определяющими пригодность пушки для работы, являются плотность мощности в фокальном пятне, Вт/м², которую рассчитывают по формуле

$$q = UI / (\pi r_f^2)$$

(I – сила тока в пучке, А; r_f – радиус пучка в фокальном сечении, м); характер распределения плотности мощности в фокальном пятне требуемого размера r_f , м, и работоспособность катодного узла ЭП – источника электронов.

Существует два основных типа катодов: катоды прямого накала, нагреваемые за счет джоулевой теплоты от протекающего по ним тока накала, и подогреваемые катоды, тела которых подвергают электронной бомбардировке от дополнительного катода-подогревателя.

Система электродов ЭП, служащая для формирования пучка электронов, называется электростатическим генератором. Наи-

большее распространение получил трехэлектродный генератор, где помимо катода и анода имеется управляющий электрод, позволяющий, подобно сетке в электронной лампе, управлять силой тока пучка. При управлении на этот электрод подается запирающее напряжение, которое в зависимости от его величины в той или иной степени «запирает» электронное облако в прикатодной области. По этой причине управляющий электрод еще называют модулятором. С его помощью можно обеспечить импульсный режим работы пушки.

Источник питания ЭЛУ служит для подачи высокого ускоряющего напряжения (20...150 кВ) на катод относительно анода и запирающего напряжения (до 3 кВ) на управляющий электрод относительно катода (плюс на катоде). Важным требованием является стабильность этих напряжений во времени, т. е. отклонение их значений не должно превышать 0,5...1 %, а исключение пульсаций тока пучка – 3...5 %. Это вынуждает использовать в источнике питания системы автоматической стабилизации напряжения и тока в результате отрицательной обратной связи. Обязательно предусматривается плавное регулирование указанных параметров источника при работе ЭП.

Блок питания отклоняющих и фокусирующих систем позволяет изменять силу тока в катушках соответствующих систем. В результате этого производится перемещение пучка по заданной траектории и достигается требуемый уровень его фокусировки.

Система управления ЭЛУ обеспечивает управление приводами перемещения свариваемого изделия и ЭП, а при высоком уровне автоматизации – также управление блоками источника питания и вакуумной системой, вплоть до полной автоматизации работы установки от момента загрузки свариваемого изделия в камеру до момента его выгрузки.

Описание лабораторной ЭЛУ «Луч-1»

Лабораторная установка практически полностью идентична ЭЛУ (см. рис. 1.1) и представляет собой вакуумную камеру с расположенной внутри трехэлектродной пушкой У-530М, изменяющей свое положение в пространстве, вакуумную систему и источник питания типа У-250А со шкафом управления.

Работа вакуумной системы по откачке камеры

Схема вакуумной системы (рис. 1.2), включает в себя вакуумную камеру электронно-лучевой установки ВК, имеющую загрузочный люк Л, вентиль K_1 , для напуска воздуха и датчик вакуума D_1 ; форвакуумный насос ФН (насос предварительного разряжения), который посредством вентиля K_2 и K_3 подсоединен к ВК, а через кнопку Вкл1 – к электрической сети; D_2 и D_3 – датчики вакуума системы соответственно трубопровода и диффузионного насоса ДН, который соединен через вентили K_4 и K_2 с ФН, а посредством затвора З – с внутренним объемом ВК. Кроме того, ДН через кран К подключен к магистрали водопровода для охлаждения, а через кнопку Вкл 2 – к электрической сети для питания нагревательного элемента. Датчики D_1 , D_2 и D_3 подключены к прибору измерения вакуума – вакуумметру (на схеме не показано).

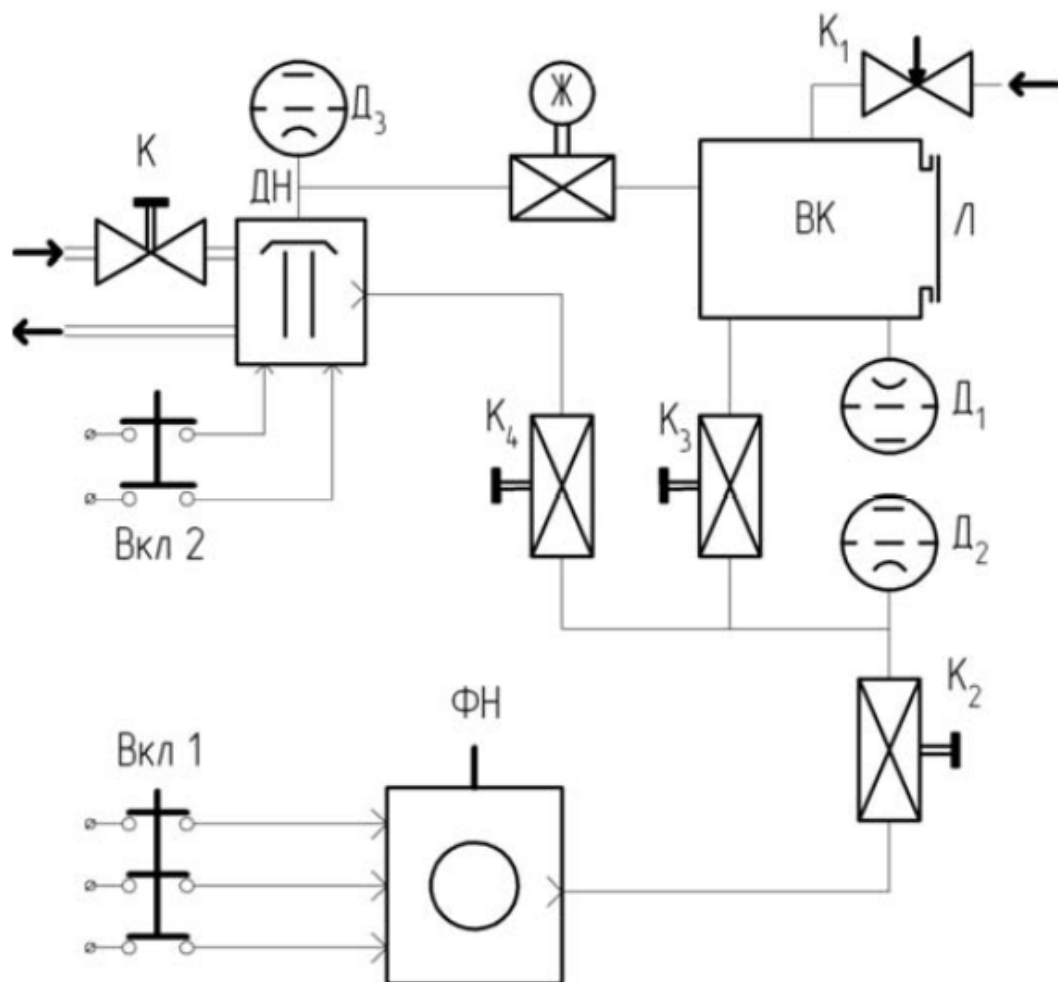


Рис. 1.2. Схема вакуумной системы ЭЛУ «Луч-1»

Откачку технологической камеры до высокого вакуума осуществляют в следующем порядке. Исходное положение: электропитание отключено; вентили, затвор и люк закрыты. Для пуска

установки необходимо подключить сеть к ФН с помощью кнопки Вкл 1 и открыть вентиль K_2 . Начинают откачку системы трубопроводов до низкого вакуума (~ 1 Па), затем выполняют откачку ВК до низкого вакуума. Для этого требуется открыть вентиль K_3 . Начинается откачка камеры. Достигнув низкого вакуума в ВК, необходимо закрыть K_3 и открыть K_4 для откачки до низкого вакуума рабочего объема ДН.

Обеспечив низкий вакуум в ДН, необходимо подготовить его к работе, для чего следует открыть кран К подачи воды в ДН и подключить кнопкой Вкл 2 нагревательный элемент ДН к сети. Диффузионный насос будет готов к работе спустя 45 мин после включения его нагрева. Затем необходимо открыть 3, соединяющий ВК с ДН. Начинается откачка камеры до высокого вакуума ($\sim 10^{-3}$ Па). После завершения откачки установка готова к сварке. Достижение нужной степени откачки контролируют вакуумметром с помощью манометрических преобразователей (датчиков) $D_1 - D_3$.

Сварка выполняется в высоком вакууме при работающем ДН. Для замены изделия необходимо закрыть 3 диффузионного насоса и открыть K_1 для напуска воздуха в камеру, после чего можно открыть Л и вынуть сварное изделие. Загрузив следующее изделие для сварки, закрыть K_1 и Л. Для повторения цикла откачки, по мере готовности ДН к работе, необходимо осуществить только откачку камеры.

Для отключения ЭЛУ необходимо закрыть 3; отключить Вкл 2, что приведет к остановке и охлаждению ДН, которое продлится 45 мин; закрыть К (при температуре корпуса ДН ниже 50°C); закрыть K_4 и K_2 ; отключить электропитание ФН с помощью Вкл 1.

Описание источника питания У-250А

Источник питания, входящий в состав энергоблока ЭЛУ, может быть использован при сварке изделий из металлов малых толщин и односторонней сварки толстолистовых металлов (алюминиевых сплавов толщиной до 60 мм, нержавеющей сталей – до 35 мм, сплавов на основе титана – до 50 мм). С помощью источника питания У-250А также можно осуществлять наплавку, напыление, термообработку и другие технологические процессы.

Энергоблок ЭЛУ (рис. 1.3) состоит из силового шкафа источника питания 1, шкафа управления 2 и соединительных кабелей 3, которые подсоединяют к электронной пушке 4.

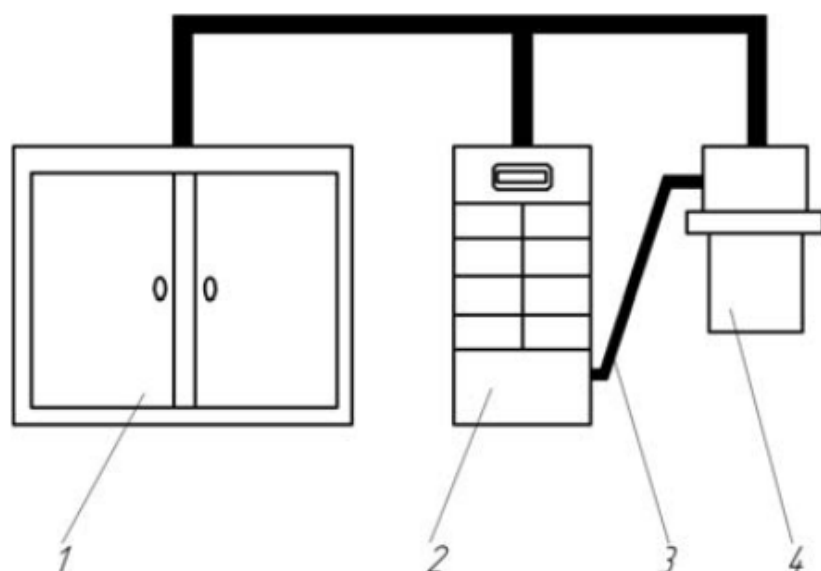


Рис. 1.3. Состав энергоблока ЭЛУ для сварки

Технические данные У-250А

Ускоряющее напряжение 22...30 кВ (отклонение не больше 1 %).

Ток пучка 5...450 мА (отклонение не больше 5 %).

Разогрев катода обеспечивается электронной бомбардировкой (отклонение не больше 5 %).

Фокусирующая электромагнитная линза сопротивлением 1 кОм питается током, регулируемым в диапазоне 20...90 мА (отклонение не больше 0,05 %).

Ток отклоняющих катушек регулируют в диапазоне 0...60 мА.

Источник работает в непрерывном импульсном режиме (частота модуляции пучка от 6 ± 2 до 200 ± 50 Гц).

Источник обеспечивает автоматическое плавное уменьшение тока пучка за время 1,5...15 с (режим заварки кратера).

Функциональная схема источника питания У-250А, содержащая три основных канала, представлена на рис. 1.4.

Канал ускоряющего напряжения питается от трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В, которое поступает на вход магнитного усилителя МУ. Силовые обмотки последнего подключены последовательно к первичной обмотке силового высоковольтного трансформатора ВТ. Выпрямленное высокое напряжение с помощью высоковольтного кабеля подается на ЭП. Регулировка и стабилизация высокого ускоряющего напряжения осуществляется в цепи первичной (низковольтной) обмотки трансформатора с помощью МУ. Сигнал обратной связи снимается с высоковольтного

делителя R_1 , R_2 . При отклонении ускоряющего напряжения от заданного, ток управляющей обмотки МУ изменяется пропорционально величине рассогласования. Это изменяет реактивное сопротивление силовой обмотки таким образом, чтобы падение напряжения на ней компенсировало возмущение по сети или нагрузке в первичной обмотке ВТ.

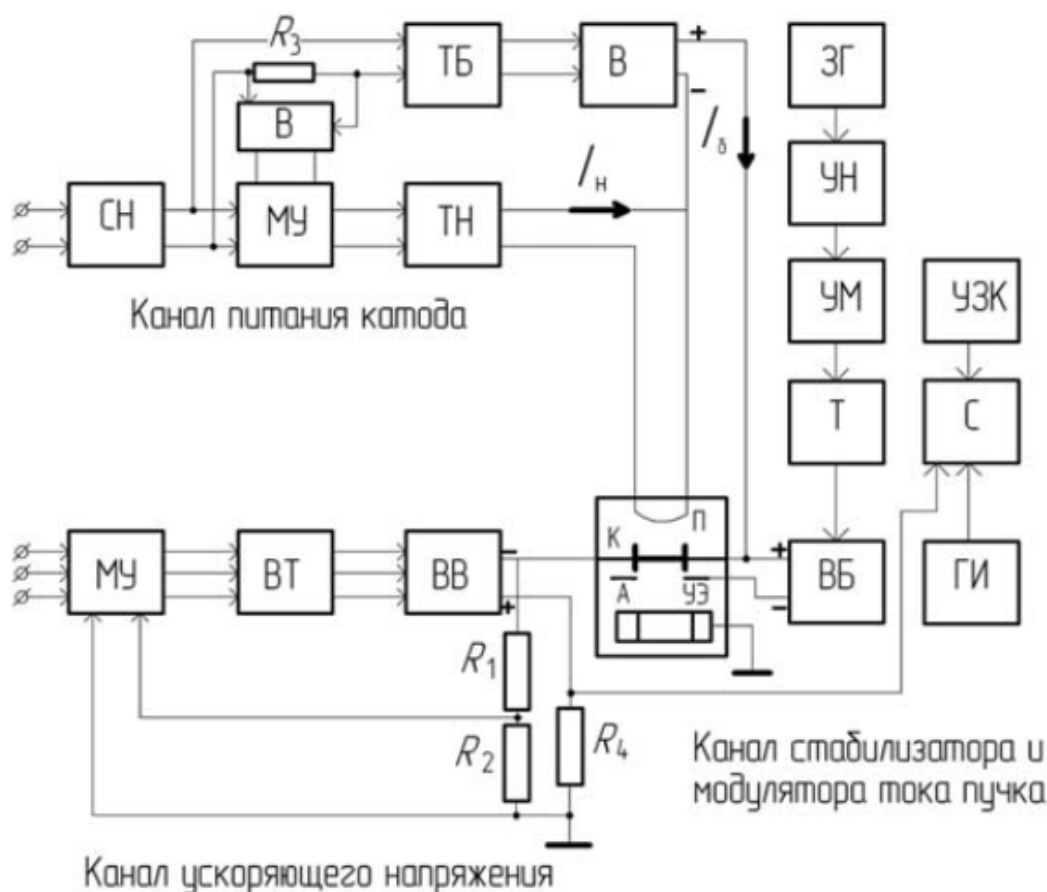


Рис. 1.4. Функциональная схема источника питания У-250А

Канал питания катода ЭП обеспечивает разогрев катода электронной бомбардировки. Для этого трансформатор бомбардировки ТБ, подключенный к стабилизатору напряжения СН через выпрямитель В, обеспечивает напряжение порядка 1000 В между подогревателем П и катодом К. Последовательно в первичную обмотку трансформатора бомбардировки включено сопротивление обратной связи R_3 , напряжение с которого выпрямляется и подается на обмотку управления МУ канала. Подогреватель питается посредством МУ, обеспечивающего плавную регулировку тока накала и трансформатора накала ТН. Эмитируемые подогревателем электроны бомбардируют катод, разогревая его до нужной температуры. При изменении эмиссионных свойств подогревателя ток бомбардировки I_6 катода меняется. Это приводит к изменению

тока в первичной обмотке ТБ. Из-за напряжения обратной связи, снимаемого с резистора R_3 , изменяется ток в обмотке управления МУ. Его реактивное сопротивление меняется так, чтобы компенсировалось возмущение из-за изменения тока накала подогревателя I_H .

Канал стабилизатора и модулятора управляет током пучка путем подачи на управляющий электрод запирающего напряжения от 0 до -3 кВ относительно катода. Нуль соответствует полностью открытой ЭП (ток пучка максимален), а -3 кВ – полностью запертой ЭП (ток пучка равен нулю). Запирающее напряжение формируется цепочкой блоков: задающий генератор ЗГ выдает переменное напряжение частотой 40 кГц, которое усиливается по напряжению УН, по мощности УМ; трансформируется в более высокое по амплитуде Т и выпрямляется высоковольтным блоком ВБ, находящимся под высоким потенциалом катода. Развязка данных блоков от высокого потенциала катода осуществляется трансформатором Т.

Стабилизация тока в процессе сварки обеспечивается подачей напряжения обратной связи с резистора R_4 , которое пропорционально текущему значению тока пучка. Напряжение обратной связи, которое в стабилизаторе С сравнивается с «уставкой» – напряжением, соответствующим установленному току пучка. При этом формируется управляющий сигнал, изменяющий в ту или иную сторону потенциал управляющего электрода для восстановления исходно установленного значения тока пучка.

Кроме того, имеется возможность модуляции тока пучка (импульсная сварка) и его плавного спада по окончании процесса в результате подачи на вход С сигнала управления от генератора импульсов ГИ или устройства заварки кратера УЗК.

Канал фокусирующих катушек питается стабилизированным напряжением, предусматривающим плавную регулировку тока фокусировки. Питание отклоняющих катушек не стабилизировано.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Оборудование: электронно-лучевой сварочный комплекс У-250.

Включение установки и работа на ней проводятся под наблюдением учебного мастера или преподавателя!

Порядок выполнения работы

1. Подготовить источник питания к сварке.

1.1. Перед включением источника установить исходное положение: тумблеры включения на передней панели блоков шкафа управления в положении «Откл», а ручки управления – в крайнем левом положении (рис. 1.5).

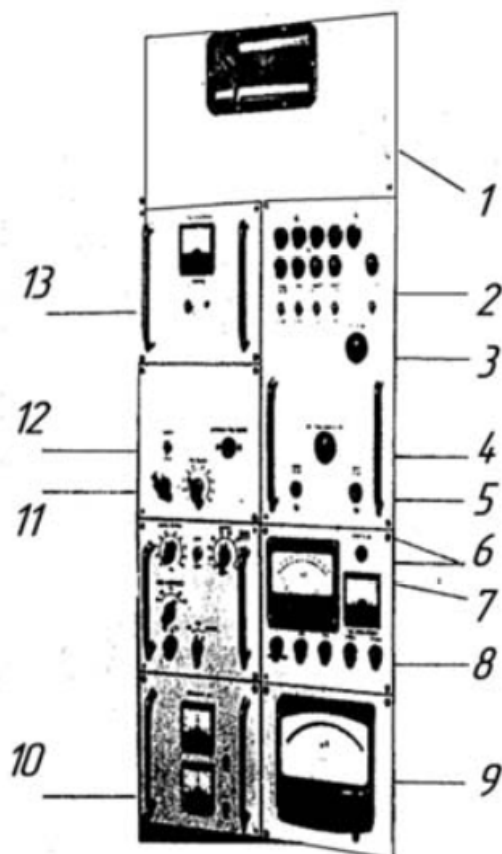


Рис. 1.5. Передняя панель шкафа управления:

1 – прибор индикации ускоряющего напряжения; 2 – индикаторные лампы и тумблеры включения: стабилизации 30 кВ канала ФОС, накала кенотронов, накала ЭП, стабилизатора тока; 3 – ручка регулировки «окончательной» ускоряющего напряжения; 4 – ручка регулировки тока накала; 5 – кнопка включения 30 кВ; 6 – кнопка отключения 30 кВ; 7 – прибор индикации тока сварки; 8 – ручки регулировки «предварительной» ускоряющего напряжения, отклонения и фокусировки пучка; 9 – прибор индикации тока фокусировки; 10 – тумблеры включения и приборы индикации тока отклоняющих катушек; 11 – ручки регулировки тока сварки; 12 – тумблер включения тока сварки; 13 – тумблер включения опорного напряжения

1.2. Для включения источника:

1) подключить его пакетным выключателем к сети напряжением 380 В;

- 2) включить накал кенотронов высоковольтного выпрямителя;
 - 3) включить накал и установить ток бомбардировки катода 30...35 мА;
 - 4) включить систему фокусирующих и отклоняющих катушек (ФОС);
 - 5) включить тумблеры «стабилизация 30 кВ» и «опорное напряжение»;
 - 6) включить канал стабилизатора и модулятора тока;
 - 7) дать прогреться источнику в течение 5 мин;
 - 8) включить ускоряющее напряжение: нажать кнопку «Вкл 30 кВ» (при этом включится табло «30 кВ» на силовом шкафу и вентиляторы); ручкой регулировки «предварительно» установить опорное напряжение (ток 130 мА по прибору) и величину предварительного ускоряющего напряжения 18...22 кВ, затем ручкой регулировки «окончательно» установить требуемое значение ускоряющего напряжения (до 30 кВ);
 - 9) ручкой «ток сварки» установить нужный ток сварки и сфокусировать электронный пучок;
 - 10) проверить отклонение электронного пучка, включив поочередно тумблеры отклонения по «Х-Х», а затем по «У-У» и повернув ручки соответствующих потенциометров, которые отклоняют электронный пучок по взаимно перпендикулярным направлениям.
- 1.3. Для выключения источника выполнить обратный порядок действий.

2. Ознакомиться с описанием конструкции ЭЛУ и инструкцией по технике безопасности.

3. Изучить устройство и принцип работы лабораторной ЭЛУ.

4. Изучить порядок выполнения операций по подготовке ЭЛУ к работе.

5. Составить блок-схему алгоритма подготовки ЭЛУ к работе и предъявить ее преподавателю.

6. Осуществить подготовку ЭЛУ к сварке (под наблюдением учебного мастера) согласно составленному алгоритму.

7. Наблюдать в процессе сварки электронный пучок и его взаимодействие с металлом.

8. Записать длительность неодномоментных этапов подготовки ЭЛУ к работе и параметры режима обработки: ускоряющее напряжение, силу тока пучка, ток фокусировки и скорость сварки.

9. Сделать выводы по проделанной работе.

Содержание отчета

1. Краткое описание и схема технологической установки.
2. Описание работы и схема источника питания, его основные технические характеристики.
3. Алгоритм подготовки ЭЛУ к работе с указанием длительности протяженных этапов.
4. Числовые значения давлений и режимов обработки.
5. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные энергетические параметры электронного пучка?
2. Каковы основные стадии формирования электронного пучка?
3. При каких условиях и с помощью какого оборудования можно получить электронный пучок и почему?
4. Что можно менять, регулируя положение фокуса пучка по вертикали перпендикулярно к обрабатываемой поверхности?
5. Для чего предназначена ЭЛУ?
6. Каковы основные технические данные установки У-250?
7. В чем заключается принцип работы ЭЛУ?
8. Какова последовательность действий при подготовке ЭЛУ к работе?

Работа № 2. СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ С ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СВАРНОГО ШВА

Цель работы – ознакомиться с технологическими особенностями и методикой подбора оптимального режима электронно-лучевой сварки (ЭЛС); выявить влияние основных технологических параметров ЭЛС на геометрические характеристики сварного шва.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основные теоретические сведения

Физическая сущность ЭЛС

Электронным лучом (ЭЛ), или электронным пучком, называют поток электронов, эмитированных катодом, ускоренных в вакууме разностью потенциалов, создаваемой между катодом и анодом, а затем сфокусированных в пучок с размерами пятна на поверхности обрабатываемой детали 0,1...3,0 мм.

Сущность процесса ЭЛС состоит в использовании кинетической энергии сформированного в вакууме ЭЛ (импульсного или непрерывного), при взаимодействии с обрабатываемым материалом превращающейся в тепловую [1]. В отличие от традиционных источников тепла для сварки, при использовании которых нагрев обрабатываемого материала осуществляется путем теплопередачи через его поверхность, при ЭЛС высвобождение энергии происходит внутри самого материала, причем наиболее интенсивное тепловыделение происходит на некотором расстоянии от его поверхности.

Максимальная глубина проникновения электронов в твердые тела (пробега электронов) δ в соответствии с существующими моделями поглощения энергии электронов при их торможении получается различной и зависит от плотности обрабатываемого материала ρ и ускоряющего напряжения $U_{\text{уск}}$ [2]:

$$\delta = 2,35 \cdot 10^{-12} \frac{U_{\text{уск}}}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ – плотность обрабатываемого материала, г/см³; $U_{\text{уск}}$ – ускоряющее напряжение, создаваемое между катодом и анодом электронной пушки (ЭП) либо между катодом и обрабатываемой деталью, В.

Зависимость (1) является одной из основных для расчета глубины пробега электронов, которой пользуются при оценке режимов электронно-лучевой обработки. Расчет значения δ по этой формуле показывает, что, например, при сварке сталей электроны могут проникать в обрабатываемый материал на глубину в несколько микрометров. Длина пробега электронов в других металлах (Ni, Cu, Cr, Al, W, Ta и др.) может быть определена по форму-

ле [3] $\delta = 10^{-5} \frac{\sqrt[3]{U_{\text{уск}}^2}}{\rho}$, где $U_{\text{уск}}$ – ускоряющее напряжение, кВ.

Хотя глубина проникновения электронов в обрабатываемый металл невелика, ее учет является весьма существенным аспектом в понимании основных закономерностей электронно-лучевой обработки, в особенности при больших значениях удельной мощности в ЭЛ, при которых осуществляется процесс ЭЛС.

Тепловая мощность q_1 и удельная тепловая мощность q_2 в ЭЛ таковы, что существует возможность обеспечения всех видов термического воздействия на обрабатываемый материал: нагрев до заданной температуры, плавление и испарение. Иными словами, существует возможность реализации различных технологических процессов: резки металла путем нагрева до температур выше температуры испарения, соединения отдельных частей металла с образованием неразъемного соединения (сварки) путем нагрева до температур выше температуры плавления и термической обработки путем нагрева до температуры ниже температуры плавления [4].

Тепловая мощность ЭЛ q_1 прямо пропорциональна току луча $I_{\text{л}}$ и ускоряющему напряжению $U_{\text{уск}}$: $q_1 = \eta I_{\text{л}} U_{\text{уск}}$, где $I_{\text{л}}$ – ток луча, мА; $U_{\text{уск}}$ – ускоряющее напряжение, кВ; η – эффективный КПД (0,96...0,98), учитывающий потери кинетической энергии ЭЛ при ее переходе в тепловую энергию.

Отношение тепловой мощности q_1 ЭЛ к скорости его перемещения по поверхности обрабатываемой детали (скорости сварки $v_{\text{св}}$, см/с) называется погонной энергией: $q_{\text{пог}} = \frac{q_1}{v_{\text{св}}} = \frac{\eta I_{\text{л}} U_{\text{уск}}}{v_{\text{св}}}$. Эта

величина позволяет сравнить тепловвод в свариваемый металл при одном и том же способе сварки на разных режимах.

Важной характеристикой процесса электронно-лучевой обработки является удельная тепловая мощность q_2 (плотность мощности), которая представляет собой отношение мощности луча q_1 к площади пятна нагрева: $q_2 = \frac{4q_1}{\pi d^2} = \frac{4\eta I_{\text{л}} U_{\text{уск}}}{\pi d^2}$, где d – диаметр ЭЛ, см.

Высокая концентрация энергии ($10^5 \dots 10^6$ Вт/см²) в зоне воздействия ЭЛ на обрабатываемый материал при сварке сопровождается феноменом «кинжального» (глубокого), проплавления с отношением высоты шва H (глубины проплавления) к его ширине B , рав-

ным 10:1 (рис. 2.1 в) и более, когда $B = D$, $H = S$, где D – ширина сквозного шва, а S – толщина образца (рис. 2.1, з). Увеличение концентрации энергии до $10^7...10^8$ Вт/см² приводит к переходу от «кинжального» проплавления к образованию отверстия в обрабатываемом материале или «резу» (рис. 2.1, д), если ЭЛ перемещается с оптимальной для конкретного случая сварки скоростью. Нагрев при концентрациях энергии менее 10^5 Вт/см², например при плавке или термообработке, сопровождается либо обычной (полусферической) формой проплавления (рис. 2.1, б), либо отсутствием проплавления (рис. 2.1, а).

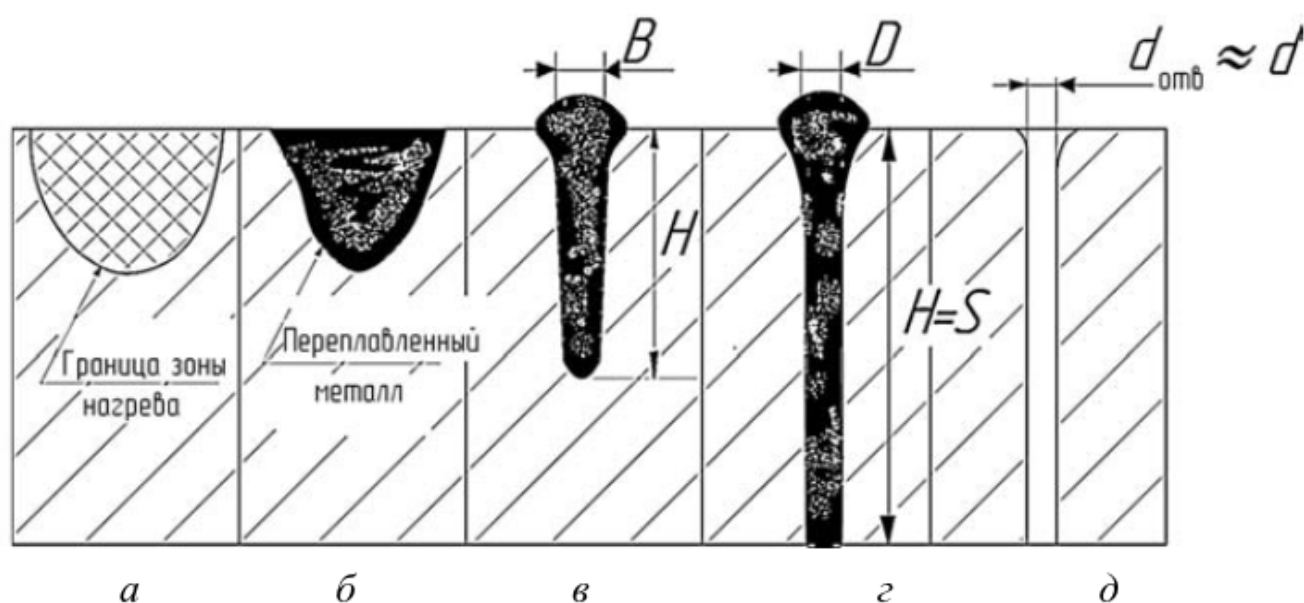


Рис. 2.1. Поперечные сечения зон обработки при электронно-лучевом воздействии

Электронно-лучевой сварочный комплекс У-250

В сварочных установках формирование ЭЛ осуществляется с помощью ЭП. На рис. 2.2 представлена принципиальная схема ЭП модели У-530М. Основным элементом этой ЭП является катод 2, в качестве которого служит таблетка из гексаборина лантана (LaB_6), обеспечивающая эмиссию (генерацию) свободных электронов. Эмиссия электронов с катода происходит при бомбардировке таблетки электронами подогревателя 1, к которому приложено постоянное напряжение накала $U_{\text{нак}} = 40...60$ В. Между подогревателем и катодом создается напряжение бомбардировки $U_6 = 800...1000$ В. Электроны, эмитированные подогревателем, ускоряются напря-

жением U_6 и, попадая на таблетку катода, разогревают ее. Облако свободных электронов 3, эмитированных таблеткой-катодом, формируется управляющим электродом 4, находящимся под отрицательным по отношению к катоду потенциалом $U_\phi = -3$ кВ. Между катодом и анодом 5 прикладывается постоянное напряжение, называемое ускоряющим напряжением $U_{\text{уск}} = 30$ кВ. Под его действием электроны ускоряются в промежутке катод-анод (прожектор ЭП) и, проходя анодное отверстие, попадают в поле электромагнитной линзы 6, с помощью которой луч 8 фокусируется на поверхности обрабатываемой детали 9. С помощью отклоняющей системы 7 ЭЛ можно перемещать (сканировать) по поверхности детали в пределах 10 град телесного угла без заметного увеличения его диаметра. Анод ЭП, фокусирующая и отклоняющая системы охлаждаются водой.

Электронно-оптическая и фокусирующая системы ЭП У-530М обеспечивают получение ЭЛ диаметром от 0,2 мм (при $U_{\text{уск}} = 30$ кВ и $I_{\text{л}} = 50$ мА) до 0,6 мм (при $U_{\text{уск}} = 30$ кВ и $I_{\text{л}} = 500$ мА). Электронная пушка и обрабатываемая деталь расположены в вакуумной камере, в которой с помощью системы откачки обеспечивают вакуум порядка $1,33 \cdot 10^{-2} \dots 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Схема системы откачки установки У-250А представлена на рис. 2.3. В состав системы входят форвакуумный насос 11 и диффузионные насосы 6, снабженные вакуумными затворами 4. Для измерения давления на выходе из насосов и запуска в них воздуха имеются

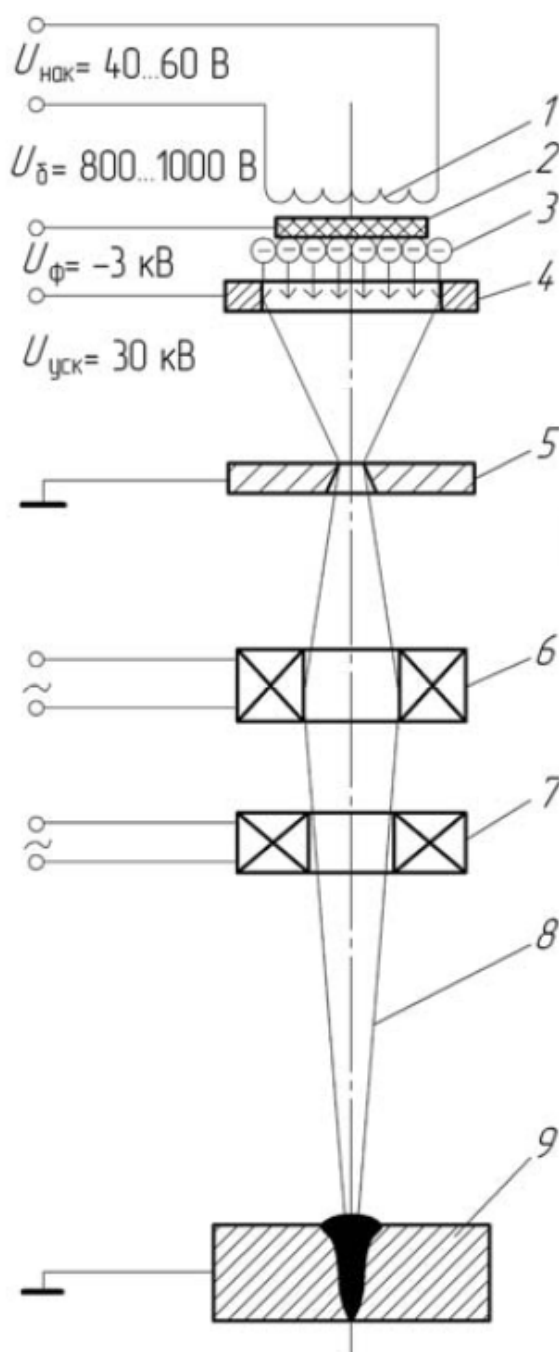


Рис. 2.2. Принципиальная схема электронной пушки модели У-530 М

датчики давления 3 и вентили 8. Предварительная откачка камеры выполняется через вакуум-провод 10, который соединен с угловым патрубком 9 через клапаны 5. После снижения давления в сварочной камере 14 до давления примерно 1 Па и разогрева диффузионного насоса открывают клапаны 7, закрывают клапаны 5 основного вакуум-провода и закрывают затвор 4. В таком положении элементов системы выполняется откачка камеры до рабочего давления. Для откачки прожектора ЭП 2 имеется дополнительная откачная система меньшей производительности. Между ЭП и камерой установлен вакуумный затвор 1, который позволяет производить перезагрузку камеры без запуска воздуха в ЭП или заменять катодный узел ЭП без запуска воздуха в камеру. В камере предусмотрены загрузочные и смотровые окна, через которые производят установку и закрепление свариваемых деталей 12 на механизме их перемещения 13 и осуществляют наблюдение за процессом сварки.

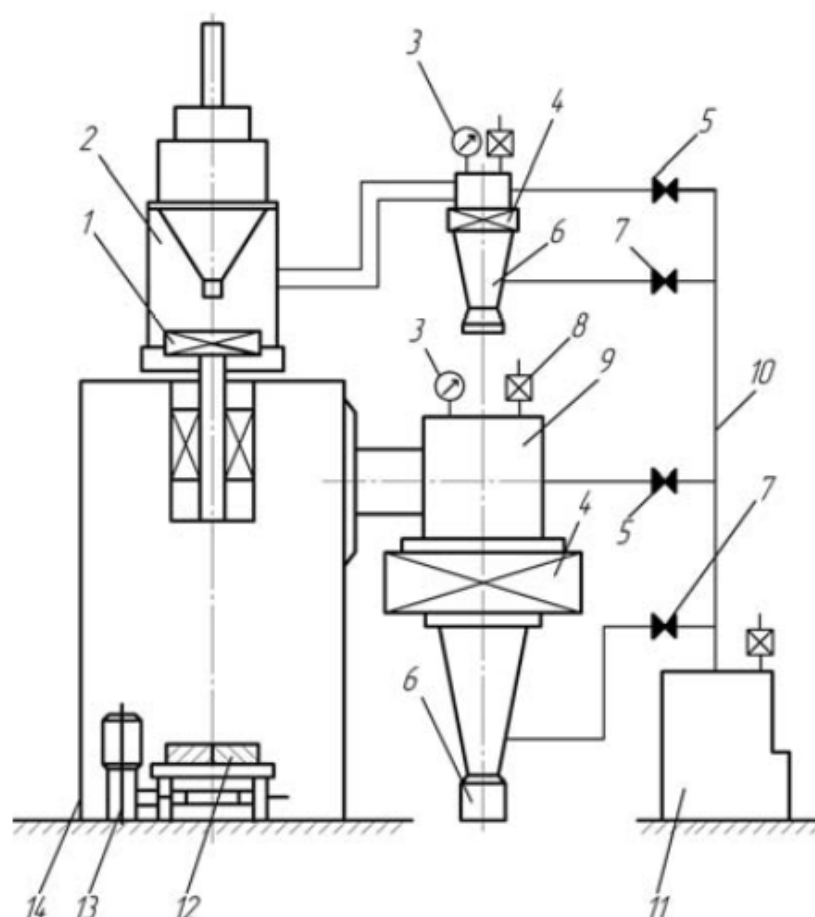


Рис. 2.3. Схема системы обеспечения вакуума в установке У-250А

Таким образом, электронно-лучевые сварочные установки состоят из двух основных комплексов: энергетического и электромеханического.

К энергетическому комплексу относится также аппаратура, предназначенная для формирования ЭЛ с заданными параметрами, управления его мощностью и положением относительно свариваемой детали. Он включает в себя ЭП, источник питания и аппаратуру управления.

Электромеханический комплекс установки предназначен для герметизации и вакуумирования рабочего объема, а также выполнения всех сварочных, установочных и транспортных операций со свариваемой деталью или ЭП.

Технологические особенности процесса ЭЛС

Основными параметрами процесса ЭЛС являются:

- а) ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}}$, кВ;
- б) ток луча $I_{\text{л}}$, мА;
- в) ток фокусировки $I_{\text{ф}}$, мА;
- г) скорость сварки $v_{\text{св}}$, м/с;
- д) рабочее расстояние между ЭП и деталью h , см;
- е) диаметр электронного луча d , мм.

Все параметры процесса ЭЛС оказывают влияние на геометрию зоны проплавления, а следовательно, на форму и геометрию сварного шва, основными характеристиками которого являются глубина проплавления H и ширина шва B (рис. 2.4).

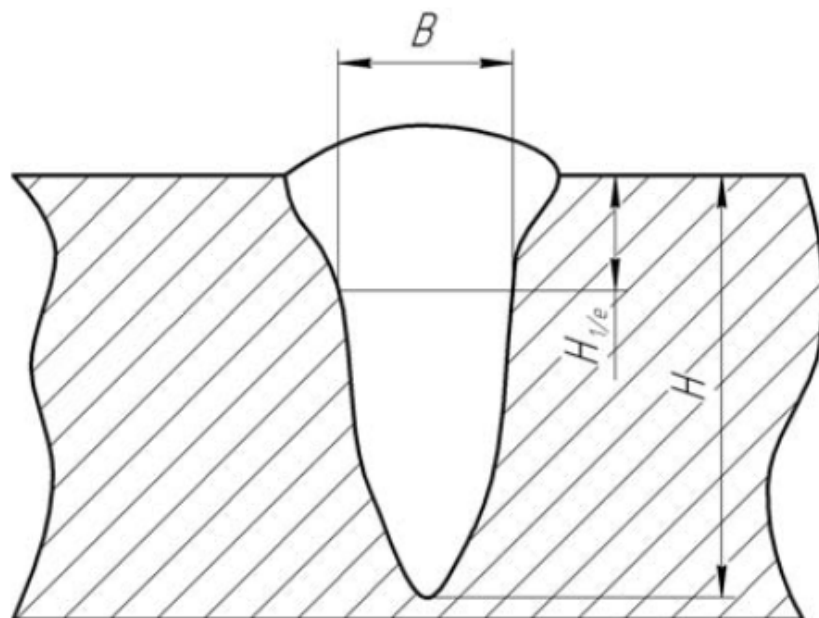


Рис. 2.4. Геометрические характеристики зоны проплавления при ЭЛС ($H_{1/e} = H_{0,37} = 0,37 H$)

Связь параметров ЭЛС с характеристиками зоны проплавления для секундного объема плавления металла шва имеет вид [2]

$$I_{\text{л}} U_{\text{уск}} \eta = \rho v_{\text{св}} F_{\text{пр}} S_{\text{м}}, \quad (2)$$

где η – КПД процесса, определяющий количество тепловой энергии, расходуемое на нагрев и плавление металла объемом $\pi B^2 H/4$; ρ – плотность металла, г/см³; $F_{\text{пр}}$ – площадь поперечного сечения проплава, см²; $S_{\text{м}}$ – теплосодержание металла при наличии парового канала, Дж/г.

Известно, что чем выше погонная энергия $q_{\text{пог}} = (\eta I_{\text{л}} U_{\text{уск}}) / v_{\text{св}}$, тем больше должна быть площадь проплавления, что действительно имеет место при дуговой сварке. При ЭЛС погонная энергия не является определяющей при количественной оценке процесса проплавления, так как при одном и том же ее значении можно получить глубины проплавления H , отличающиеся на порядок. Это связано с формированием шва в условиях «кинжального» проплавления, которое зависит не только от тепловой мощности луча q_1 , но и от плотности мощности луча q_2 . В свою очередь, q_2 зависит от тока фокусировки $I_{\text{ф}}$ и расстояния между ЭП и деталью h при постоянных значениях $I_{\text{л}}$, $U_{\text{уск}}$ и $v_{\text{св}}$, которые определяют диаметр ЭЛ d , а следовательно, и q_2 . Изменяя $I_{\text{ф}}$, можно в широких пределах регулировать d на поверхности детали, q_2 , а следовательно, и геометрию шва и зоны проплавления сварного соединения.

Объем расплавленного в единицу времени металла V при нормальном законе распределения плотности мощности энергии в пятне нагрева описывается уравнением $V = \frac{\pi B^2 H}{4}$. Из уравнения

(2) следует, что

$$v_{\text{св}} F_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{л}} U_{\text{уск}} \eta}{\rho S_{\text{м}}}. \quad (3)$$

Поскольку $v_{\text{св}} F_{\text{пр}} = V/t$ (t – время воздействия электронного луча), уравнение (3) можно представить в виде

$$\frac{\pi B^2 H}{4t} = \frac{I_{\text{л}} U_{\text{уск}} \eta}{\rho S_{\text{м}}}. \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4) выражения $t = d / v_{\text{св}}$ и $I_{\text{л}} U_{\text{уск}} \eta = q_{\text{пог}} v_{\text{св}}$, получим

$$q_{\text{пог}} d \eta = \frac{\pi B^2 H}{4} \rho S_{\text{м}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) связывает параметры процесса ЭЛС и теплофизические свойства свариваемого материала с геометрией металла шва.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Оборудование: электронно-лучевой сварочный комплекс У-250, измерительный микроскоп.

Включение установки и работа на ней проводятся под наблюдением учебного мастера или преподавателя!

Порядок выполнения работы

1. Изучить особенности процесса формирования сварного соединения при ЭЛС.

2. Изучить схему и последовательность включения элементов системы обеспечения вакуума в рабочей камере и ЭП установки У-250А; зарисовать схему откачной системы установки с указанием основных элементов, входящих в ее состав, и записать их назначения.

3. По паспортным данным определить основные параметры установки У-250А и пределы их регулирования. Полученные значения занести в отчет в виде таблицы.

4. Провести сварку пластин из стали на трех (заданных преподавателем) режимах.

5. Провести измерения H и B на шлифах сварных швов из нержавеющей стали 12Х23Н17М2Т. Результаты этих измерений записать в отчет в виде таблицы.

6. Вычислить значения d , q_1 , q_2 , $q_{\text{пог}}$ и записать их в таблицу. При расчете значения теплофизических констант принять: $\rho = 7,9 \text{ г/см}^3$; $\eta = 0,484$.

7. Построить зависимости:

а) $d = f(I_{\text{ф}})$ при $v_{\text{св}} = 10 \text{ м/ч}$ и $I_{\text{л}} = 200 \text{ мА}$;

б) $H = f(v_{\text{св}})$ при $I_{\text{ф}} = 66 \text{ мА}$ и $I_{\text{л}} = 200 \text{ мА}$;

в) $q_{\text{пог}} = f(v_{\text{св}})$ при $I_{\text{ф}} = 66 \text{ мА}$ и $I_{\text{л}} = 200 \text{ мА}$;

г) $q_2 = f(I_{\text{л}})$ при $I_{\text{ф}} = 66 \text{ мА}$ и $v_{\text{св}} = 10 \text{ м/ч}$.

8. Провести анализ полученных зависимостей и сформулировать результаты в виде выводов.

Содержание отчета

1. Описание процесса ЭЛС и особенностей формирования металла шва.
2. Схемы электронно-лучевого комплекса и ЭП.
3. Параметры режимов сварки на установке У-250А и ее технические данные.
4. Результаты измерений H и B по шлифам.
5. Расчет значений d , q_1 , q_2 и $q_{\text{пог}}$ для рассмотренных режимов сварки.
6. Графики зависимостей $d(I_{\phi})$, $H(v_{\text{св}})$, $q_2(I_{\phi})$, $q_{\text{пог}}(v_{\text{св}})$.
7. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие технологические параметры процесса ЭЛС влияют на размеры литой зоны?
2. От чего зависит максимальная глубина проникновения электронов в твердые тела?
3. Как влияет тепловая мощность и плотность мощности ЭЛ на форму и геометрию сварного шва?
4. Как зависит тепловая мощность ЭЛ от ускоряющего напряжения и тока луча?
5. От чего зависит плотность мощности ЭЛ?
6. Как влияет скорость сварки на форму и геометрию сварного шва?
7. Какое влияние оказывает рабочее расстояние между ЭП и деталью на размеры литой зоны?
8. Чем можно регулировать диаметр ЭЛ на поверхности детали?
9. Какой оптимальный режим необходим для ЭЛС используемых образцов?

Работа № 3. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ СКАНИРУЮЩИМ ЛУЧОМ

Цель работы – ознакомление с физическими основами, аппаратурой и технологией электронно-лучевой сварки (ЭЛС) сканирующим лучом.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Физические основы процесса сканирования электронным лучом

Электронный луч (ЭЛ), сформированный в электронной пушке (ЭП), характеризуется рядом технологических параметров: диаметром пятна нагрева, плотностью мощности в нем, углом сходимости и др. Формирование технологических параметров ЭЛ осуществляется с помощью специальных фокусирующих систем. В зависимости от особенностей технологического электронно-лучевого оборудования диаметр ЭЛ d может изменяться от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров, а плотность мощности в ЭЛ q_2 – от 10^4 до 10^6 Вт/см².

Кроме того, плотность мощности ЭЛ в пятне нагрева можно регулировать путем развертки ЭЛ (пространственным перемещением ЭЛ по обрабатываемой поверхности). На практике широко используются следующие виды разверток ЭЛ (рис. 3.1): круговая, поперечная, продольная, Х-образная, по эллипсу, по дуге окружности и др. (стрелками указано направление сканирования). Это позволяет регулировать геометрические параметры сварного шва. Выбор формы развертки ЭЛ, как правило, осуществляется экспериментальным путем применительно к конкретному технологическому процессу и используемой электронной сварочной пушке [4].

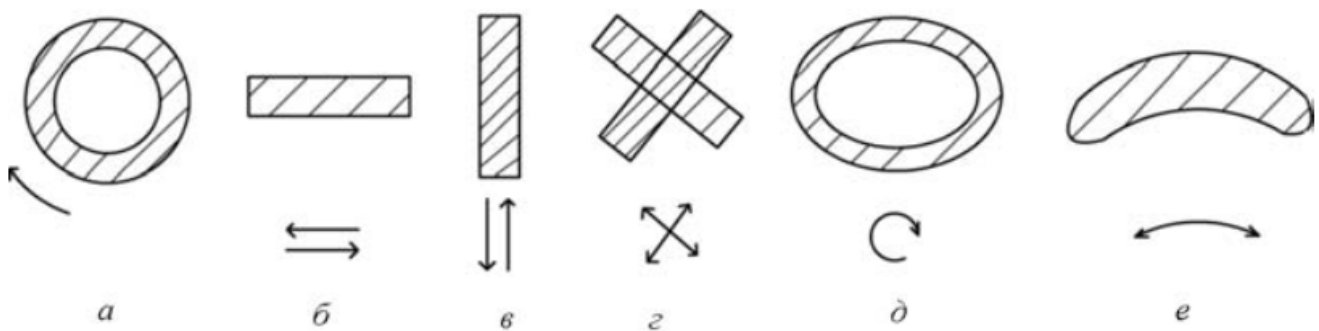


Рис. 3.1. Виды разверток электронного луча (поперечное сечение):

а – круговая; *б* – поперечная относительно свариваемого стыка; *в* – продольная; *г* – Х-образная; *д* – по эллипсу; *е* – по окружности

На рис. 3.2 показана схема сканирования ЭЛ по круговой развертке. Для сканирования ЭЛ используют приборы управления лучом на базе специальных генераторов или отдельные генераторы сигналов определенной (заданной) формы, подключаемые к электромагнитным отклоняющим системам ЭП. Заданные траектории раз-

вертки ЭЛ получают, формируя специальные электрические сигналы отклоняющей катушкой.

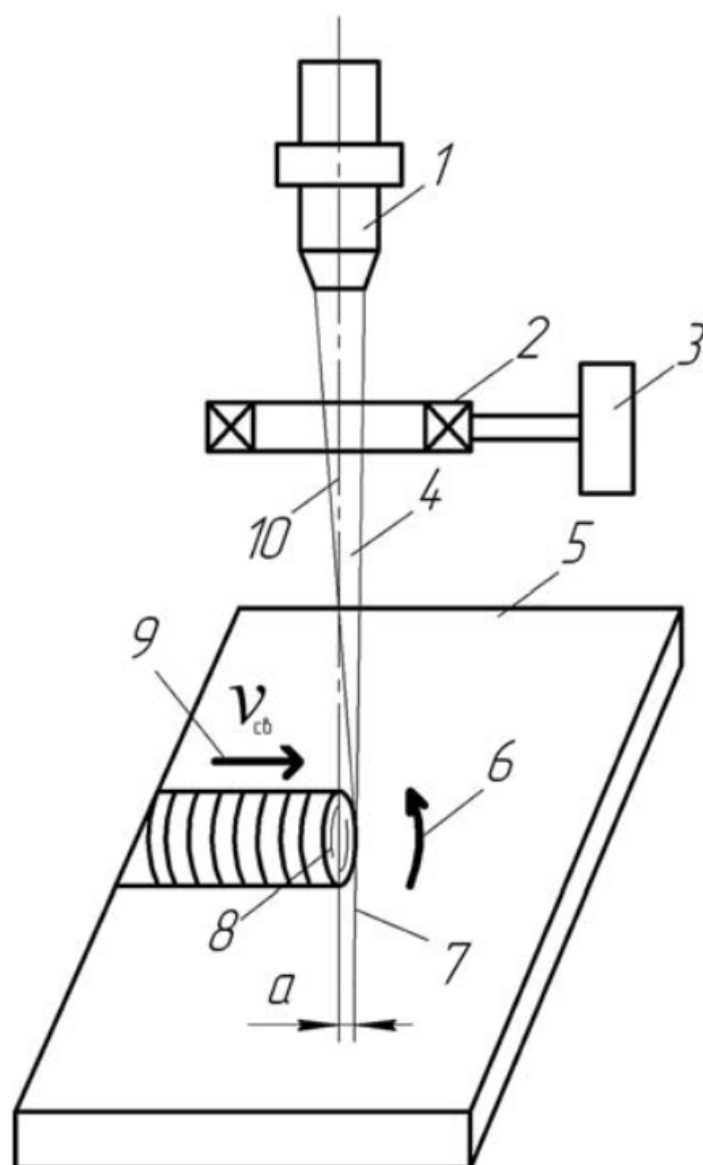


Рис. 3.2. Сканирование луча по круговой развертке:

1 – электронная сварочная пушка; 2 – отклоняющая система; 3 – генератор развертки луча; 4 – электронный луч; 5 – деталь; 6 – направление движения луча при сканировании; 7 – траектория движения луча; 8 – пятно нагрева; 9 – направление сварки; 10 – продольная ось неотклоненного луча; a – амплитуда сканирования; v_{cb} – скорость сварки

Технологические особенности сварки сканирующим лучом

Сканирование ЭЛ в зоне сварки по заданной траектории при той же плотности мощности q_2 в поперечном сечении ЭЛ позволяет получать плотность мощности в зоне его воздействия на обрабатываемый материал $q_F = q/F$, где F – площадь поперечного сечения развертки луча в зоне обработки, мм^2 . Это приводит к изменению

характера гидродинамических процессов в сварочной ванне и ее конфигурации. Благодаря этому, например при сварке металлов большой толщины, повышается устойчивость канала проплавления в сварочной ванне, а следовательно, и стабильность формирования шва: уменьшается разбрызгивание расплавленного металла, предотвращается вытекание расплава из ванны, уменьшается склонность к образованию корневых дефектов и несплошностей в металле шва.

При сварке сканирующим лучом в дополнение к основным параметрам процесса важными являются частота f и амплитуда a сканирования. При небольших значениях частоты ($f = 10 \dots 20$ Гц) паровой канал слабо реагирует на мгновенное положение места бомбардировки поверхности обрабатываемого металла ЭЛ и схема процесса сварки схожа со схемой, наблюдаемой при сварке стационарным (несканирующим) лучом (рис. 3.3 а, б). При этом наблюдают увеличение ширины шва B , уменьшение глубины проплавления $H_{\text{пр}}$ и уменьшение пульсации глубины проплавления.

При частоте $f = 100 \dots 1000$ Гц происходят расширение парового канала и увеличение размеров и объемов сварочной ванны, уменьшение объема газовой и паровой фазы внутри канала проплавления, повышение интенсивности процесса испарения летучих компонентов из расплава сварочной ванны, уменьшение вероятности образования пор в металле шва. В результате изменяются форма проплава и геометрические размеры шва, а пульсация глубины проплавления практически не наблюдается (рис. 3.3, в).

Увеличение амплитуды сканирования ЭЛ поперек шва приводит к росту ширины шва, а при увеличении ее вдоль шва возрастает время пребывания материала в расплавленном состоянии. Направление сканирования луча не оказывает влияния на глубину проплавления! Вместе с тем при заданной глубине проплавления сканирование требует повышенного расхода энергии, что приводит к перегреву металла шва и зоны термического влияния.

Таким образом, изменение частоты и амплитуды сканирования позволяет получать сварные швы с требуемой формой проплава и с определенными геометрическими размерами и свойствами металла шва. На практике амплитуду сканирования выбирают в пределах диаметра ЭЛ, а частоту – в пределах $100 \dots 1000$ Гц.

Электронно-лучевые технологии со сканированием ЭЛ находят все более широкое применение в различных областях промышленности. Так, для сварки кольцевых швов на изделиях с врезной ар-

матурой или заглушками, на изделиях типа «труба – трубная доска» и т. д. целесообразно, по возможности, отказываться от вращения изделия, перемещения сварочной пушки или вращения отклоняющей системы. Практичнее использовать перемещение ЭЛ по круговой траектории путем развертки его с помощью специальных генераторов.

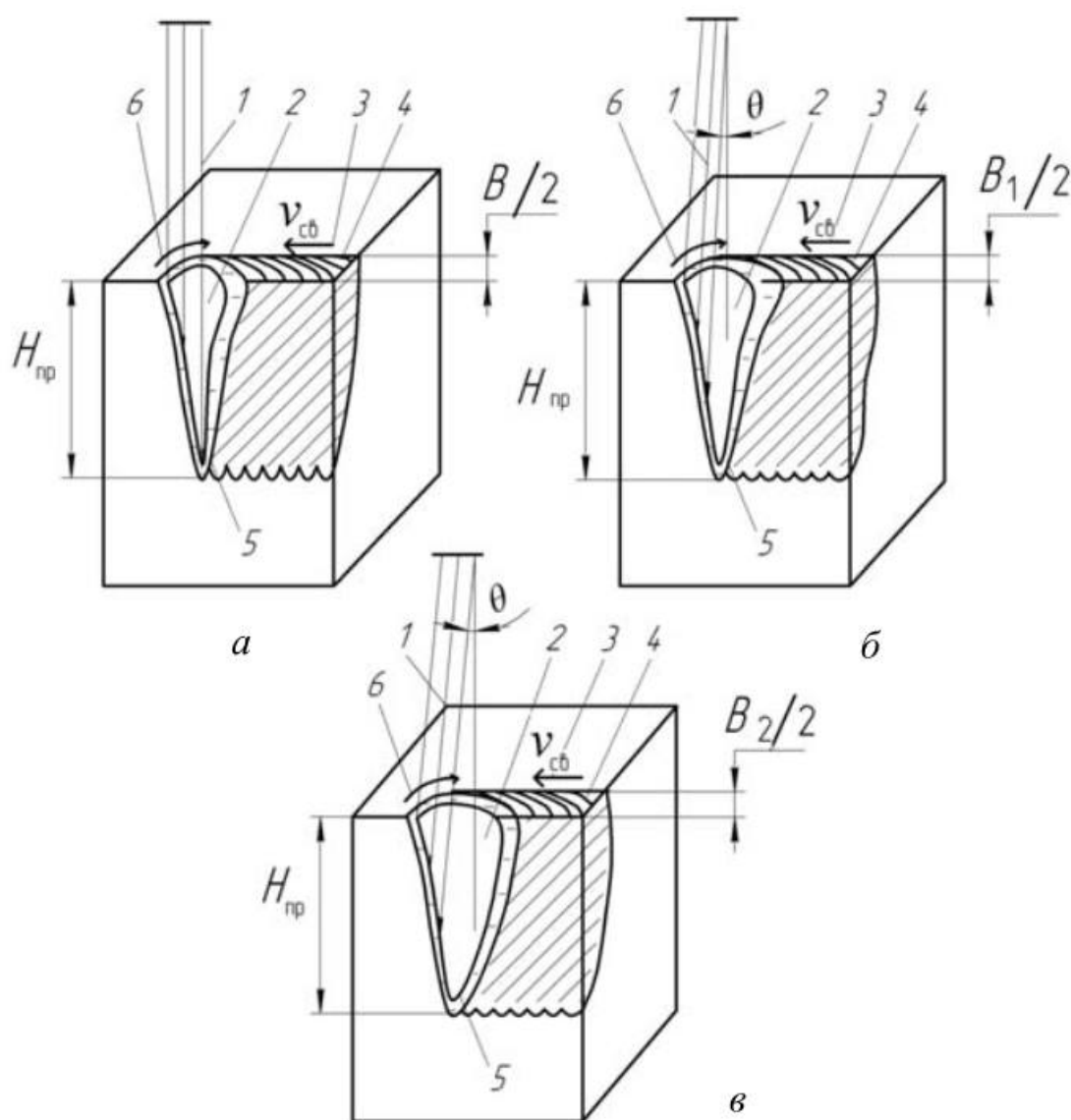


Рис. 3.3. Схемы формирования металла шва при сварке неподвижным и сканирующим лучами:

a – неподвижный луч; *б* – сканирующий луч (частота сканирования $f = 10$ Гц); *в* – сканирующий луч ($f = 800$ Гц): 1 – электронный луч; 2 – паровой канал; 3 – направление сварки; 4 – сварной шов; 5 – сварочная ванна; 6 – направление переноса жидкого металла; θ – угол отклонения луча от его исходной продольной оси; B, B_1, B_2 – ширина сварного шва

Применение сканирования ЭЛ при электронно-лучевой наплавке или термообработке значительно повышает производительность процесса из-за увеличения зоны проплава или нагрева.

Генератор развертки луча Г6-26

Для ЭЛС сканирующим лучом может быть использован генератор типа Г6-26, предназначенный для создания электрических сигналов специальной формы. Генератор включает в себя три блока: управления, питания и собственно генератор. Передняя панель генератора показана на рис. 3.4. На ней расположены органы управления и контроля, а также присоединительные разъемы (гнезда) для подключения его к отклоняющим катушкам ЭП.

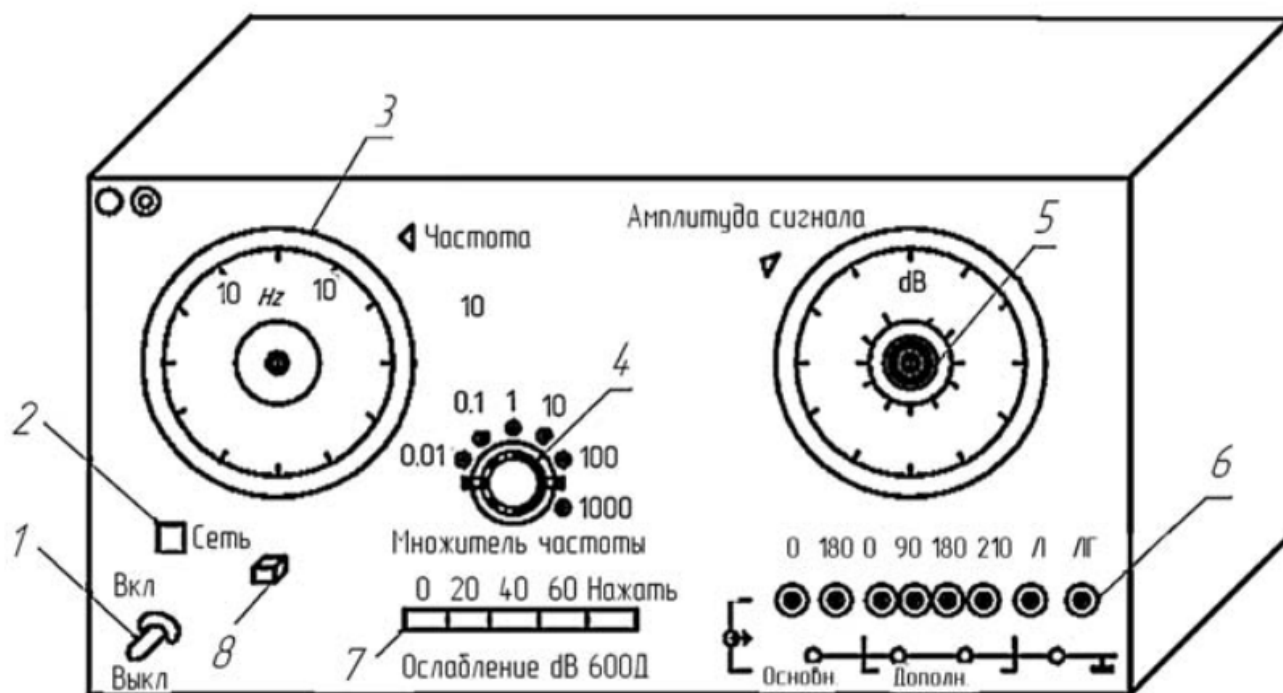


Рис. 3.4. Передняя панель генератора Г6-26:

1 – тумблер включения сети; 2 – индикаторная лампочка; 3 – лимб регулирования частоты; 4 – переключатель диапазонов частоты; 5 – регулятор выходного напряжения; 6 – основные и дополнительные гнезда; 7 – переключатель на основных выходах на 0, 20, 40 и 60 дБ; 8 – переключатель «Подготовка работы»

Генератор формирует два основных сигнала синусоидальной формы с противоположными фазами. На дополнительных выходах генератора формируются синусоидальные сигналы с фазовыми сдвигами по отношению к основным на 0, 90, 180 и 270 град, а также сигнал прямоугольной формы и синхроимпульс. Генератор позволяет изменять частоту сканирования от 0,001 до 10 000 Гц, при номинальном выходном напряжении (амплитуде) от 10 мВ до 10 В.

Для включения генератора в сеть необходимо тумблер 1 (см. рис. 3.4) поставить в положение «ВЫКЛЮЧЕНО», присоединить к сети шнур питания и включить тумблер 1. При этом должна заго-

реться сигнальная лампочка 2. Ручками 3 и 5 установить требуемые значения частоты и напряжений на основных выходах. Во включенном и подготовленном к работе состоянии генератор необходимо выдерживать в течение 30 мин.

Для проведения экспериментальной части работы нужно подать с входных гнезд заданный сигнал на электромагнитные отклоняющие катушки. Например, для круговой развертки следует использовать дополнительные гнезда «90» и «180» и два гнезда общей заземленной точки. При необходимости изменения частоты сканирования f (переключателем 4 в положениях «0,001», «0,01», «0,1» и «1») – перед началом сварки нажать кнопку 8 и удерживать ее 4...6 с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Оборудование: электронно-лучевой сварочный комплекс У-250, генератор развертки луча Г6-26, измерительный микроскоп.

Включение установки и работа на ней проводятся под наблюдением учебного мастера или преподавателя!

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с общими правилами по технике безопасности при работе на электронно-лучевой установке У-250.

2. Изучить устройство и принцип работы генератора Г6-26.

3. Установить образец в сварочной камере.

4. Закрыть сварочную камеру и создать в ней необходимый вакуум в пределах $1,33 \cdot 10^{-1} \dots 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па.

5. Произвести сварку неподвижным лучом в режиме: $U_{\text{уск}} = 30$ кВ; $I_{\text{л}} = 200$ мА; $I_{\text{ф}} = 66$ мА; $\nu_{\text{св}} = 20$ м/ч. Во время сварки осуществлять визуальный контроль за процессом через смотровые окна в сварочной камере.

6. Подготовить генератор к работе.

6.1. Установить частоту сканирования 800 Гц (ручку 3 (см. рис. 3.4) поставить в положение 8, а переключатель 4 – в положение 100).

6.2. Установить напряжение на основных выходах равным 1 В (переключатель 5 (см. рис. 3.4) установить в положение 1, а переключатель 7 – в положение 0).

6.3. Установить кольцевую развертку луча, используя приведенную на рис. 3.5 схему подключения генератора к электромагнитным отклоняющим катушкам.

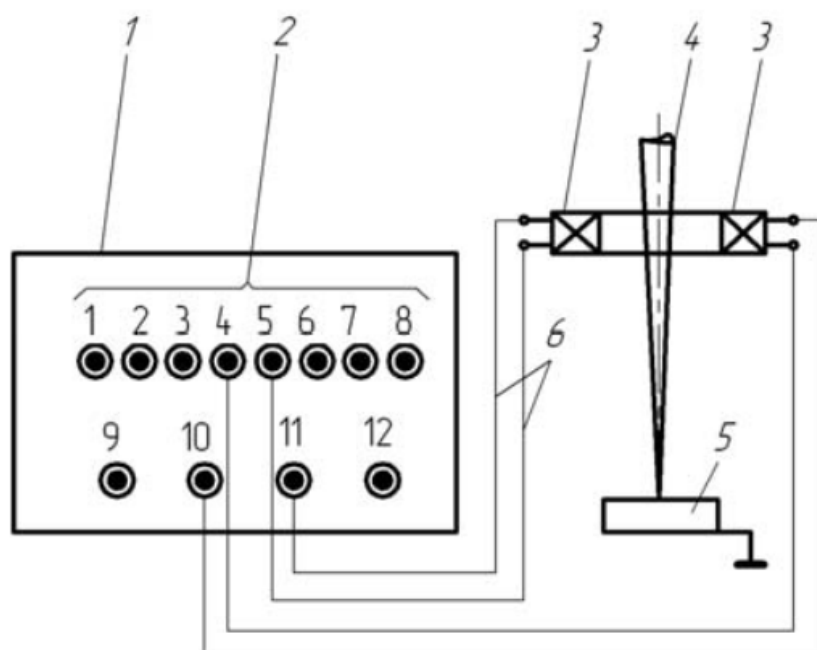


Рис. 3.5. Схема подключения генератора к отклоняющим катушкам электронно-лучевой пушки:

1 – генератор; 2 – выходные гнезда; 3 – электромагнитные отклоняющие катушки; 4 – электронный луч; 5 – свариваемое изделие; 6 – соединительные провода

7. Установить частоту сканирования 500 Гц (по аналогии с действиями, описанными в п. 6.1) и выполнить проплав.

8. Установить частоту сканирования 300 Гц и выполнить проплав.

9. По указанию преподавателя выполнить проплавы со сканированием луча при других формах его развертки.

10. Используя поперечные шлифы проплавов, выполненных неподвижным и сканирующим лучом с различной формой развертки и при различной частоте сканирования, провести анализ отличительных особенностей формирования металла шва (по форме проплава, качеству поверхности шва, чешуйчатости, наличию подрезов и др.).

10.1. Зарисовать в отчете формы проплавов.

10.2. Замерить ширину швов B , глубину проплавов $H_{\text{пр}}$ и высоту усиления h . Результаты измерений занести в отчет.

11. Определить площадь сканирования (развертки) F , приняв диаметр неподвижного (без развертки) луча равным 3,0 мм, и подсчитать плотность мощности на единицу площади развертки:

$$q_F = q / F \text{ Вт / мм}^2,$$

где $q = \eta U_{\text{уск}} I_{\text{л}}$, Дж/с; $\eta = 0,95$.

Результаты занести в таблицу отчета.

Определить F , мм², при различных формах развертки луча можно по следующим формулам:

а) без развертки: $F = \pi d^2 / 4$;

б) кольцевая: $F = \pi d (B - d)$;

в) поперечная: $F = Bd$;

г) продольная: $F = Bd$;

д) эллиптическая: $F = \pi Bd (1,7 - d / B)$.

12. Сделать выводы по проделанной работе.

Содержание отчета

1. Схема сварки сканирующим лучом.
2. Краткое описание генератора и его технические характеристики.
3. Режимы сварки и параметры сканирования луча.
4. Эскизы проплавов с указанием геометрических размеров, выполненных неподвижным электронным лучом (без развертки) и сканирующим лучом при разных формах развертки с разной частотой сканирования.
5. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как можно регулировать плотность мощности в пятне нагрева и геометрические параметры сварного шва?
2. Какие технологические параметры процесса ЭЛС сканирующим лучом в дополнение к основным являются важными?
3. Какое влияние оказывает частота и амплитуда сканирования луча на форму и геометрию сварного шва?
4. В чем заключается принцип работы генератора Г6-26 развертки луча?
5. Какие оптимальные режимы необходимы для ЭЛС сканирующим лучом данных образцов?

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Назаренко О.К.* Основы электронно-лучевой сварки. Киев: Наук. Думка, 1975.
2. *Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зув И.В.* Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978.
3. *Мамутов Е.Д.* Электронно-лучевая сварка деталей большой толщины. Инженерный поиск. М.: Машиностроение, 1992.
4. *Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З.* Электронно-лучевая технология: Пер. с нем. М.: Энергия, 1980.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко и др.; Под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наук. Думка, 1987.
2. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учеб. пособие: В 2 т. Т. 2: Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалов и др.; Под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высш. шк., 1983.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Работа № 1. Устройство и работа технологической электронно-лучевой установки	3
Работа № 2. Связь параметров электронно-лучевой сварки с геометрическими характеристиками сварного шва	17
Работа № 3. Технология электронно-лучевой сварки сканирующим лучом	26
Список используемой литературы	35
Список рекомендуемой литературы	35