

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ - технологические процессы обработки материалов электронным лучом высокой ($\sim 10^{13}$ Вт/м²) плотности энергии для получения микроотверстий, прецизионной сварки, упрочнения материалов и др.

Электронно-лучевая обработка основана на использовании кинетической энергии электронов, летящих с большой скоростью для направленного удаления материала путем нагрева, плавления и испарения его в зоне обработки.

Начало использования электронного луча для размерной обработки материалов следует отнести к 1959 – 1960 гг. В это время созданы первые установки для изготовления диафрагм, используемых в электронных микроскопах, и для фрезирования электронным лучом, хотя аналогичные установки для сварки начали изготавливать несколько ранее.

Теоретические сведения об электронно-лучевой обработке. Формирование электронного пучка

При нагревании в вакууме металла (вольфрама или тантала) пропусканием через него электрического тока с поверхности металла эмитируются электроны (термоэлектронная эмиссия). Кинетическая энергия этих электронов сравнительно невелика. Но если на электроны воздействовать электрическим полем, создавая высокую разность потенциалов между эмитирующей поверхностью — катодом и анодом,— скорость движения электронов можно значительно повысить.

Величину этой скорости можно определить из выражения

$$v = 5.93 \cdot 10^7 \sqrt{U}, \text{ м/сек},$$

где U — разность потенциалов между катодом и анодом (ускоряющее напряжение). При этом каждый электрон приобретает кинетическую энергию

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

где $m = 9.1 \cdot 10^{-28}$ г — масса электрона;

$e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ кул — заряд электрона;

v — скорость движения электрона, см/сек.

Законы движения электронов имеют много общего с законами световой (геометрической) оптики и их рассматривают в специальном разделе физики — электронной оптике. Сформированные электрические и магнитные поля при воздействии их на поток электронов имеют такое же значение в электронной оптике, как стеклянные линзы или призмы в световой оптике (фокусируют, отклоняют луч).

При переходе из одной области пространства в другую через границу раздела, где потенциал изменяется скачком, электронный луч изменяет свое направление, т.е. преломляется подобно световому лучу при переходе из одной среды в другую. Если потенциал от точки к точке по пути движения электронов изменяется непрерывно (т. е. не существует точной границы раздела), то непрерывно будет изменяться и направление движения электрона.

В электронно-лучевых установках продольное электрическое поле, созданное разностью потенциалов между катодом и анодом, обычно фиксировано. Поэтому в этих установках управление движением электронов осуществляется изменением поперечного поля. Создавая изменяющееся по определенному закону неоднородное поле, можно управлять движением потоков электронов.

Если электрическое поле сформировано так, что равноудаленные поверхности его подобны поверхностям стеклянных линз, то такое электрическое поле будет действовать на электронный луч подобно действию стеклянной линзы на световые лучи. Подбором формы и взаимного расположения электродов, создающих электрическое поле, можно получить различные системы электростатических линз (первый тип фокусирующих устройств).

Второй тип фокусирующих устройств для электронных лучей — это электромагнитные линзы. Применение таких линз основано на законах взаимодействия магнитного поля с электронным лучом (подобных законам воздействия магнитного поля на проводники с током). Если движущийся электрон попадет в однородное магнитное поле перпендикулярно к силовым линиям, то он будет описывать окружность, если под углом — то винтовые линии. Период обращения электрона по кругу зависит только от напряженности магнитного поля. Все электроны, вылетающие из какой-то точки в разных направлениях, описав винтовые линии различных радиусов с различными скоростями обращения, будут вновь сходить в какой-то другой точке. Расстояние этой точки от точки вылета электронов зависит от скорости движения электронов вдоль магнитного поля, которая определяется только значением ускоряющего электрического поля. В этом в основном и заключается принцип фокусирования электронного пучка с помощью однородного магнитного поля.

Фокусное расстояние электромагнитной линзы при заданном ускоряющем электрическом поле можно легко регулировать выбором величины тока, который протекает через катушку, создающую магнитное поле. С помощью электростатического или магнитного поля диаметр электронного луча можно сузить до 0,01 мм и менее, т. е. можно получить очень высокую концентрацию электронов в потоке.

Механизм разрушения материала

При воздействии электронного луча на материал электроны пучка проникают на некоторую глубину δ в материал. Глубина δ (пробег электрона) сравнительно невелика и зависит в первую очередь от ускоряющего напряжения U и плотности материала:

$$\delta = 2.1 \cdot 10^{-11} \frac{U^2}{\rho}$$

где U — ускоряющее напряжение, кВ;

ρ — плотность материала, г/см³.

При проникновении электронов в материал их движение постепенно тормозится вследствие взаимодействия с электронами и ядрами атомов вещества. При этом большая часть энергии электронов переходит в тепловую.

Удельную мощность (плотность мощности) в пятне нагрева можно определить по формуле

$$W = KU^{7/4} j_a \text{ Вт/м}^2$$

где K — постоянная, зависящая от конструкции и соотношения геометрических размеров электроно-оптической системы;

U — ускоряющее напряжение, В;

j_a — плотность тока эмиссии на катоде, А/м².

Часть кинетической энергии электронов преобразуется в световое и рентгеновское излучение.

Мощность рентгеновского излучения можно определить из выражения

$$W_p = 3 \cdot 10^{-6} I_z U^{1.75}$$

где I — сила тока электронного пучка, мА

z — порядковый номер элемента в периодической системе;

U — ускоряющее напряжение, кВ.

При падении электронного луча достаточной мощности на поверхности материала образуется лунка-кратер определенной глубины. Следует учитывать, что глубина лунки и глубина проникновения электронов — понятия не тождественные. Как показано выше, глубина проникновения электронов (свободный пробег электрона) очень мала, в то время как глубина лунки может достигать нескольких миллиметров.

Технологические характеристики и типовые процессы электронно-лучевой обработки.

Технологические характеристики электронно-лучевой обработки (производительность обработки, обрабатываемость различных материалов, скорость съема материала, точность обработки и т. д.) во многом определяются возможностями оборудования, энергетическими параметрами электронного пучка, свойствами обрабатываемого материала.

Производительность электронно-лучевой обработки зависит от мощности луча, размеров участка, на котором он фокусируется, скважности импульсной подачи луча и длительности каждого импульса. Кроме того, она зависит от тепло-физических констант и толщины обрабатываемого материала. Зависимость производительности обработки от свойств металлов и сплавов характеризуется относительной обрабатываемостью.

Скорость съема материала электронным лучом может достигать $20\text{—}30 \text{ мм}^3/\text{мин}$, но при высококачественной обработке скорость съема не превышает $1 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Поэтому метод целесообразно использовать только для микрообработки.

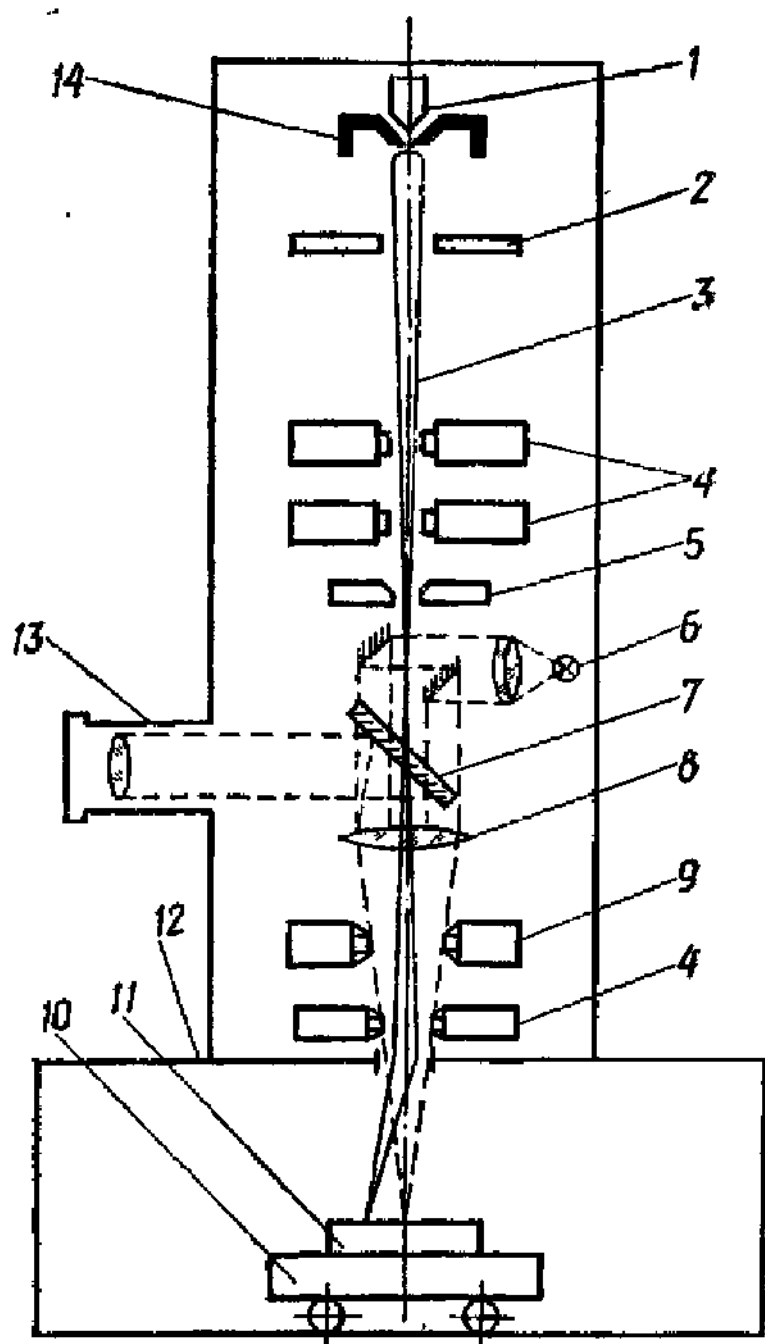
Для интенсификации обработки заготовок перед обработкой электронным лучом в некоторых случаях целесообразно применять предварительный нагрев. В частности, нагрев стального образца до температуры 400°C значительно повышает производительность обработки (до 50%).

Точность электронно-лучевой обработки также определяется энергетическими параметрами луча, стабильностью этих параметров при управлении процессом, системой фокусировки излучения, точностью управления частотой следования и длительностью импульсов, точностью выполнения механической части оборудования. На существующем оборудовании точность управления параметрами электронного луча может быть очень высокой (не ниже 0,1 % номинала). При оптимальном выборе режимов точность электронно-лучевой обработки может составлять $10\text{—}20 \text{ мкм}$.

Электронно-лучевая обработка успешно применяется для изготовления отверстий микронных размеров с большим отношением глубины к диаметру. Например, в стеклянной пластине толщиной 2 мм отверстие диаметром 48 мкм получают за 1 сек .

Ширина щели или диаметр отверстия зависит от толщины обрабатываемого материала. Оптимальное соотношение между шириной щели или диаметром отверстия и толщиной материала не должно превышать $1/20$. С уменьшением этого соотношения увеличивается клиновидность паза или конусность отверстия.

250 л/сек. Диффузионный насос (например, типа ВП-2) обеспечивает высокий вакуум (до 10^{-5} — 10^{-7} кГ/см²) со скоростью откачки до 7 л/сек. Среднее время достижения рабочего вакуума 7—15 мин. При больших объемах вакуумных камер используются более производительные откачивающие станции.



1 — катод, 2 — анод, 3 — пучок электронов, 4 — электростатические и электромагнитные линзы, 5 — диафрагма, 6 — подсветка, 7 — полупрозрачное зеркало, 8 — оптическая система с объективом, 9 — система отклонения луча, 10 — рабочий стол, 11 — обрабатываемая деталь, 12 — вакуумная камера, 13 — окуляр, 14 — фокусирующий электрод

Рисунок 1 — Схема электронно-лучевой установки

Источник питания электронно-лучевой установки включает в себя высоковольтный силовой трансформатор, высоковольтный выпрямитель (до 100—150 кВ), сглаживающие фильтры и систему коммутации. Ускоряющее напряжение регулируется с помощью автотрансформатора, включенного в цепь первичной обмотки высоковольтного трансформатора. В одном корпусе с высоковольтным выпрямителем устанавливается накальный трансформатор с выпрямителем накала катода. Для питания катушек электромагнитной фокусирующей и отклоняющей систем используют электронные или селеновые выпрямители с высокой стабильностью.

В современных установках предусмотрена система модуляции луча, дающая возможность регулировать частоту импульсов излучения, длительность импульса и ток в импульсе. Частота следования импульсов с помощью таких модуляторов обеспечивается в пределах 1 300 *Гц* при длительности импульса 0,01 0,00005 *сек*. Модуляция электронного луча осуществляется подачей импульсов отрицательного напряжения на управляющий (фокусирующий) электрод электронной пушки.

Преимущества и недостатки ЭЛО

Преимущества электронно-лучевой обработки перед другими методами:

- электронный луч можно легко сфокусировать, модулировать по мощности;
- луч безынерционен, его можно мгновенно и сравнительно легко перемещать в любую точку обрабатываемой поверхности.

К недостаткам электронно-лучевой обработки следует отнести:

- необходимость проведения обработки в вакууме;
- сложность и высокую стоимость выпускаемого оборудования.

Список литературы

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов.
Коваленко В.С. М.: Высшая школа, 1975, 236с.
2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки.
П/ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. 1988. – 719с.