

1.22. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Цель лекции: изучение методов электролучевой обработки материалов.

1.22.1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Электронно-лучевая обработка материалов (ЭЛО) основана на использовании теплоты, выделяющейся при резком торможении потока электронов поверхностью обрабатываемого изделия. Кинетическая энергия электронов преобразуется в тепловую и только незначительная часть (0,1 ... 3%) – в рентгеновское излучение.

В качестве источника свободных электронов используют металлическую проволоку из вольфрама, тантала и др. Нагрев осуществляют в глубоком вакууме. Высокая концентрация энергии при малой площади электронного луча позволяют вести обработку в ограниченной рабочей зоне, не подвергая перегреву все изделие. Температура обработки может достигать 8000⁰С и выше, многие металлы при этом мгновенно испаряются. Электронным лучом можно выполнять операции сверления, сварки, пайки, наплавки, модификации поверхности, термической очистки, закалки, зонального отжига. Электронный луч позволяет обрабатывать металлы, ферриты, стекла, графит, керамику, алмаз. На рис. 1.211. представлена схема электронной пушки, используемой при электронно-лучевой обработке.

Электронный луч получают в вакуумном приборе — электронной пушке. В вакууме с раскаленного катода выделяются электроны, которые направляются к аноду — свариваемому изделию. Для получения электронного луча электроны фокусируются магнитным полем, создаваемым специальным устройством.

Зависимость диаметра электронного пучка $d_э$ от тока в нем:

$$0,5d_э \approx c_{сф}^{1/4} \pi^{3/4} I \frac{\Delta V}{U_y j_{эм}},$$

где: $c_{сф}$ — коэффициент сферической aberrации электронной линзы; I — ток в электронном пучке в А; ΔV — тепловой разброс скоростей электронов при выходе из катода в эВ, $j_{эм}$ — плотность тока эмиссии катода в А/см²; U_y — ускоряющее напряжение в кВ.

При увеличении ускоряющего напряжения повышается плотность энергии электронного потока, но возникает опасность появления рентгеновского излучения при торможении электронов на веществе детали. Обработка базируется на нагреве заготовок в вакууме высококонцентрированным электронным лучом.

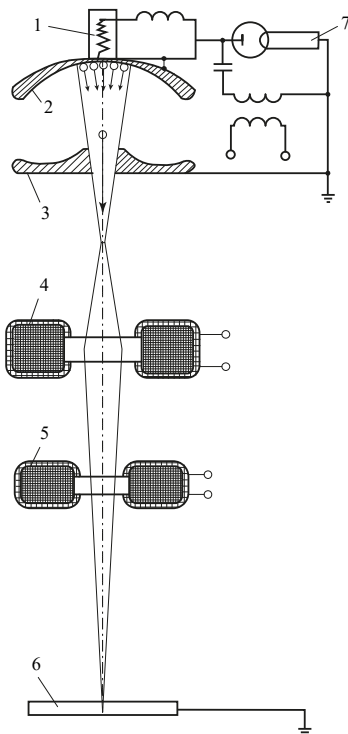


Рис. 1.211. Схема электронной пушки

1 — катодная спираль, 2 — фокусирующая головка катода, 3 — первый анод с отверстием, 4 — фокусирующая магнитная катушка для регулирования диаметра пятна нагрева на изделии, 5 — магнитная система отклонения пучка, 6 — свариваемое изделие (анод), 7 - высоковольтный источник постоянного тока для питания катода

Изменение плотности электронного луча и его развёртки в пространстве позволяют производить сварку, наплавку, пайку, термическую обработку и модифицирование поверхности.

1.22.2. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Распределение энергии в поверхностном слое сплавов железа - 75% - превращается в тепло, остальные 25% энергии тратятся на рентгеновское излучение, отраженные электроны, вторичные электроны, тепловое излучение.

Толщину слоя, в котором происходит выделение энергии, можно подсчитать по формуле:

$$h = \frac{2,1 \cdot 10^{-12} U}{\rho},$$

где: h — толщина слоя, см; U - ускоряющее напряжение, В; ρ - плотность ма-

териала, г/см².

Для сталей при ускоряющем напряжении 60 кВ глубина слоя составляет 10 мкм, при 200 кВ – 57 мкм, при 5 МВ – 2,8 мм, при 10 МВ – 5,7 мм.

На рис. 1.212. представлены основные схемы технологических процессов ЭЛО

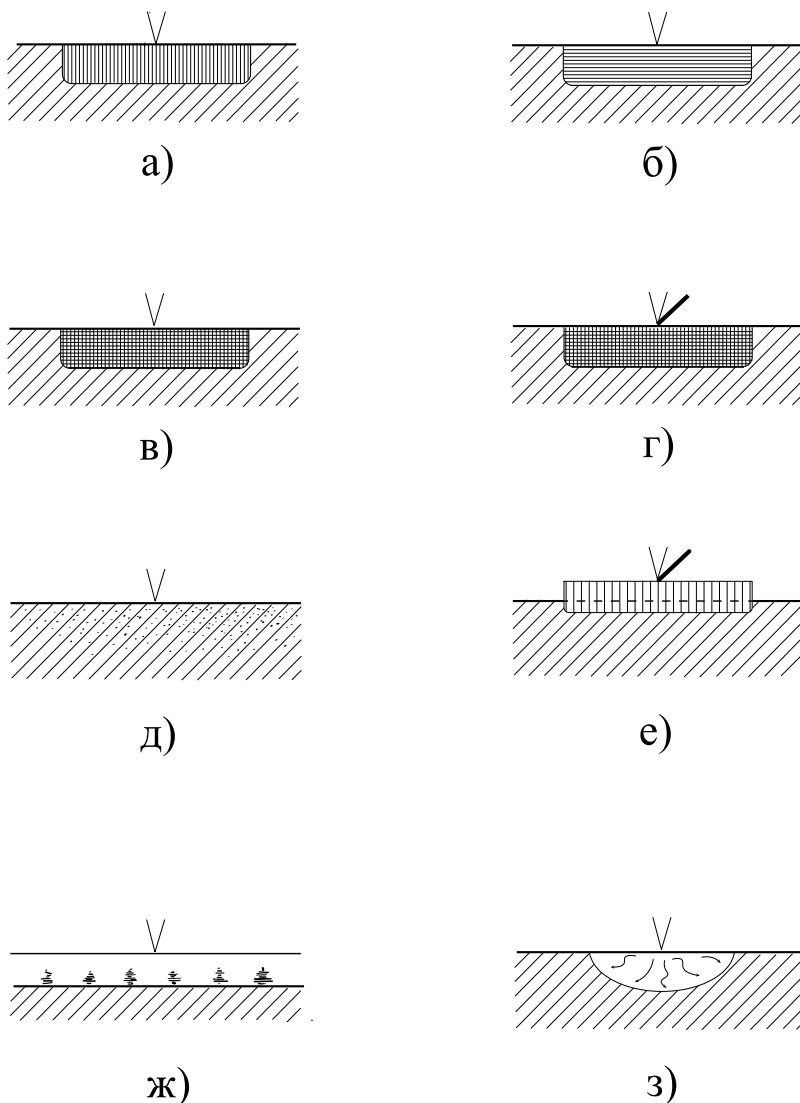


Рис. 1.212. Схема модифицирования поверхности ЭЛО:

а – рафинирующее оплавление, б – закалка из твердого состояния, в – закалка с фазовым превращением, г – легирование, внедрение, д – диффузия, е – наплавка, ж – обработка предварительно нанесенных покрытий, з – ударное упрочнение

Электронный луч, воздействующий на поверхность изделия, на рис. 1.212. представлен в виде галочки. Рафинирующее оплавление рис. 1.212. а) применяется для очистки металлов. Поскольку растворимость примесей различна в расплаве и в твердом состоянии, то проведя оплавление и последующее затвердевание с небольшими скоростями передвижения фронта фазовых превращений можно очистить металл от примесей.

ЭЛО позволяет проводить закалку металлов и сплавов из твердого состояния рис. 1.212 б) со скоростями нагрева и последующего охлаждения $\sim (100 - 10000) \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, а также закалку с фазовым превращением рис. 1.212. в). Поверхностное легирование рис.1.212. г) осуществляется путем введения в расплавленную область различных присадок (на рисунке показано в виде введения прутка).

Возможно проведение диффузии различных примесей рис.1.212.д). Метод ЭЛО позволяет проводить наплавку металлов на поверхность изделия рис.1.212. е) путем введения в зону оплавления прутка соответствующего металла. При помощи метода ЭЛО можно обрабатывать покрытия, предварительно нанесенные на поверхность изделия рис.1.212. ж). Ударное упрочнение поверхности изделия рис.1.212. з) проводят при очень кратковременном воздействии электронного луча в диапазоне от одной сотой микросекунды до одной микросекунды.

Преимущества поверхностной ЭЛО:

- постоянная глубина обработки (закалки и т.п.);
- минимальное коробление изделия;
- высокий КПД (низкие затраты энергии);
- поглощение энергии не зависит от оптических свойств, шероховатости, наличия покрытий;
- высокая стабильность и воспроизводимость параметров излучения, простота контроля характеристик;
- возможность сканирования луча с высокой частотой и большой амплитудой, высокая надежность электромагнитной системы сканирования;
- экологическая чистота.

В промышленности все более широкое применение находят тугоплавкие и химически активные металлы и сплавы. Поэтому для их сварки необходимо применять источники с высокой концентрацией теплоты, а для защиты расплавленного и нагретого металла использовать среды, содержащие минимальное количество водорода, кислорода и азота. Этим условиям отвечает электронно-лучевая сварка, или сварка электронным лучом рис.1.213.

Преимущества электронно-лучевой сварки:

- высокая концентрация ввода теплоты в изделие, которая выделяется не только на поверхности изделия, но и на некоторой глубине в объеме основного металла;
- фокусировкой электронного луча можно получить пятно нагрева диа-

метром 0,0002—5 мм, что позволяет за один проход сваривать металлы толщиной от десятых долей миллиметра до 200 мм;

- отсутствие насыщения расплавленного и нагретого металла газами,наоборот, в целом ряде случаев наблюдается дегазация металла шва и повышение его пластических свойств;
- уменьшение протяженности зоны термического влияния снижает вероятность рекристаллизации основного металла в этой зоне;
- малое количество вводимой теплоты,как правило, для получения равной глубины проплавления при электронно-лучевой сварке требуется вводить теплоты в 4—5 раз меньше, чем при дуговой,в результате резко снижаются коробления изделия.

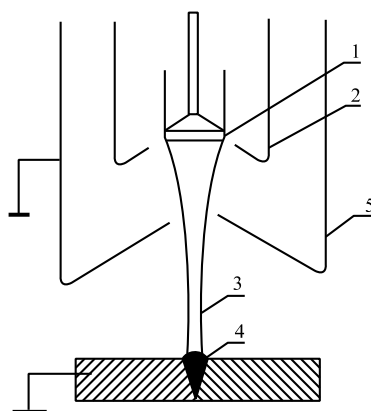


Рис. 1.213. Схема сварочной пушки для ЭЛО:

1 – катод; 2 – прикатодный электрод; 3 – граница электронного пучка; 4 – сварной шов на изделии; 5 – ускоряющий электрод (анод)

Лучшими характеристиками обладают пушки, имеющие ускоряющий электрод 5, находящийся под потенциалом изделия

1.22.3. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛО

При помощи технологии ЭЛО можно наносить покрытия из различных металлов. На рис. 1.214. представлена схема такой установки. Электронная пушка 1 формирует поток электронов, который при помощи отклоняющей системы 2 попадает на источник материала покрытия 8 и испаряет его. Атомы материала покрытия летят к детали 4 и осаждаются на ее поверхности. Из бункера 5 по желобу 7 постоянно подаются новые порции материала покрытия.

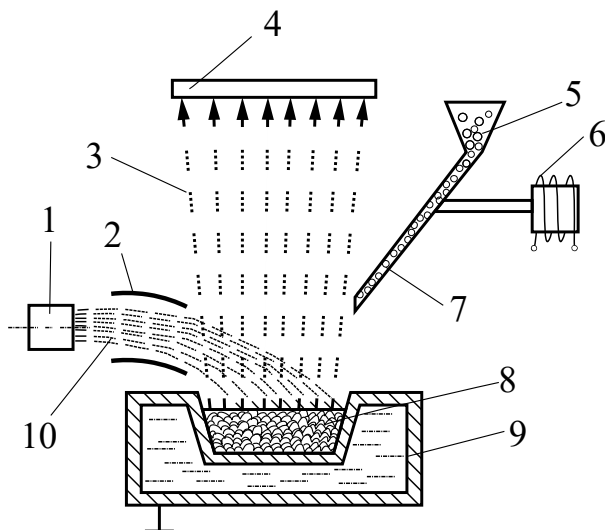


Рис. 1.214. Схема нанесения покрытий при помощи ЭЛО

1 – электронная пушка, 2 – отклоняющая система, 3 – поток испаряемого материала покрытия, 4 – деталь, 5 – бункер, 6 – виброподача, 7 – желоб, 8 – материал покрытия, 9 – охлаждаемый тигель; 10 – поток электронов изогнут до 270 град.

Поток электронов 10, выходя из электронной пушки 1, проходит через отклоняющую систему 2 и попадает на материал покрытия 8, который находится в охлаждаемом тигле 9. Материал покрытия 8 испаряется и поток испаряемого материала 3 поднимается вверх и осаждается на поверхности детали 4. Из бункера 5 при помощи виброподачи 6 материал покрытия ссыпается в тигель 9.

1.22.4. РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ

Размерная обработка электронным лучом (ЭЛО) применяется для получения:

отверстий фигурной или цилиндрической формы малых диаметров (2-500 мкм), тонких пазов, щелей, прорезей размерами от нескольких десятков микрометров в материалах малой толщины (пленки, фольги), для разрезки материалов (полупроводников, ферритов, сверхчистых материалов и др.), особенно когда к поверхностям реза предъявляются особые требования.

Размерная обработка материалов электронным лучом осуществляется при плотности тепловой энергии выше 10^6 - 10^9 Вт/см². Материал при такой плотности вскипает и испаряется, образуя на детали углубление (отверстие), а при перемещении луча - сквозной или глухой паз. В зоне обработки температура может достигать 6000 °С, а на расстоянии всего лишь 1 мкм от последней -

280-300 °С - отсюда высокая локализация процесса.

Достоинства размерной ЭЛО:

- возможность широкой регулировки режимов и тонкого управления тепловыми процессами;
- пригодность для обработки металлических и неметаллических материалов;
- повышенная чистота среды при обработке;
- высокий КПД (до 98%);
- возможность автоматизации процесса.

Недостатки размерной ЭЛО:

- необходимость защиты от рентгеновского излучения, возникающего при работе на напряжениях свыше 20 кВ; относительно высокая стоимость;
- сложность оборудования;
- необходимость высокого вакуума;
- трудность непосредственного наблюдения за процессом.

В промышленности размерная ЭЛО применяется для: изготовления деталей с числом отверстий от нескольких тысяч до нескольких миллионов, для получения отдельных отверстий в кварцевых пластинах, для обработки микроминиатюрных электронных схем, резки ферритов для «памяти» ЭВМ и т.д. локального легирования, прецизионной пайки. На рис. 1.215. представлена схема вырезания отверстий сложного профиля при помощи ЭЛО.

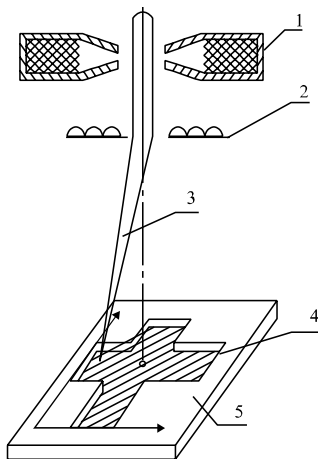


Рис. 1.215. Схема вырезания отверстий сложного профиля

1 – линза объектива; 2 – регулятор отклонения луча; 3 – электронный луч; 4 – крестообразный вырез; 5 – обрабатываемая деталь

Электронный луч 3 фокусируется линзой 1 и отклоняется регулятором 2. Затем луч 3 попадет на деталь 5 и вырезает на ней заданный рисунок.

Выращивание нитевидных кристаллов и поверхностная полировка

Выращивание нитевидных монокристаллов с использованием электронно-лучевого нагрева (применяется в исследовательских целях) позволяет с высокой точностью поддерживать температуру расплава, доводить её до любой требуемой величины и получать монокристаллы, однородные по составу, приемлемых геометрических размеров.

Электронно-лучевая полировка поверхности происходит без съёма материала и основана на поверхностном оплавлении выступов и впадин полируемого материала с последующей его кристаллизацией. Например, полировку поверхности кремниевых подложек до 13-го класса чистоты осуществляют при скорости перемещения подложки относительно пучка ~ 100 см/с, ширине ленточного пучка $\sim 40-80$ мм, толщине пучка $\sim 0,2-0,5$ мм, удельной мощности $\sim (1,25-2,5) \cdot 10^4$ Вт/см², в вакууме $(1,33-6,65) \cdot 10^{-3}$ Па, предварительном нагреве подложки до $\sim 1073-1123$ °К.

Очистка поверхности подложек

Очистка поверхности подложек электронным пучком происходит следующим образом. При соударении электронов с загрязнениями последние удаляются частично за счёт разрыхления, выброса, ионизации примесей и окислов, а оставшиеся – по мере повышения температуры подложки.

Микрофрезерование электронным пучком

Для получения микро- и наноразмеров, а также подгонки номиналов резисторов используют микрофрезерование электронным пучком. Применяя электронный пучок диаметром $< 0,1$ мкм, можно изготовить элементы субмикронных размеров. Микрофрезерование электронным пучком успешно используют для подгонки номиналов тонкоплёночных резисторов с точностью до 0,1-0,5%. Электронным пучком также можно сверлить отверстия малых диаметров (от 1 до 30 мкм) и сложной формы в различных материалах

Дополнительные возможности электронного пучка

Перекристаллизацией слоёв можно выращивать монокристаллические слои на подложках с ориентирующей и неориентирующей структурами. При этом на подложки в вакууме наносится поликристаллический слой, который впоследствии оплавляется электронным пучком.

С помощью электронного луча можно вызвать ускорение процессов диффузии. Локальная обработка полупроводниковых пластин остросфокусированным электронным пучком вызывает интенсивное образование дефектов ($\sim 10^6 - 10^7$ см⁻²), которые существенно влияют на диффузионные свойства мате-

риала. Подсоединение выводов микросваркой и микропайкой и сваркой электронным пучком позволяет формировать надёжные контактные соединения. Контакт получается прочным и выдерживает многократный перегиб у места сварки.

Герметизация корпусов позволяет формировать прецизионные любой конфигурации – прямоугольные, кольцевые, круговые неправильной формы без ограничения габаритов корпуса. Использование бесконтактных методов контроля на основе электронного пучка даёт возможность достаточно легко контролировать параметры ИС бесконтактным методом.

Электронный пучок позволяет измерять потенциал и наблюдать распределение зарядов на поверхности твёрдого тела, определять ширину р-n-перехода и концентрацию примесных атомов, измерять удельное сопротивление материалов, время жизни неосновных носителей, вычислять контактную разность потенциалов и многое другое.

Нетепловое воздействие электронного пучка на химические соединения позволяет получать тонкие слои, которые могут найти применение в микроэлектронике. Полимеризация органических соединений с помощью электронного пучка, происходящая вследствие разрыва определённых связей между атомами и перестройки диссоциированных молекул, позволяет создавать диэлектрические слои тонкоплёночных конденсаторов заданной конфигурации.

ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ

Вопрос 1	На чем основана электронно-лучевая обработка материалов?
Ответы:	
1	На использовании теплоты, выделяющейся при резком торможении потока электронов поверхностью обрабатываемого изделия
2	На эффекте туннелирования электронов через материал заготовки
3	На эффекте возникновения рентгеновского излучения
Вопрос 2	Какими преимуществами обладает электронно-лучевая сварка?
Ответы:	
1	Высокая концентрация ввода теплоты в изделие, высокая степень фокусировки луча
2	Низкая стоимость
3	Возможность сваривать детали на воздухе

Вопрос 3	Для чего применяется размерная обработка электронным лучом?
Ответы:	
1	Для получения отверстий фигурной или цилиндрической формы малых диаметров, тонких пазов, щелей
2	Для получения измерительных инструментов
3	Для резки заготовок с большим припуском
Вопрос 4	Каким преимуществом обладает размерная обработка электронным лучом?
Ответы:	
1	Пригодность для обработки металлических и неметаллических материалов
2	Обработка в среде вакуума
3	Легкость в наблюдении за техпроцессом
Вопрос 5	В чем суть технологии Electron Beam Melting (EBM) или электронно-лучевой плавки
Ответы:	
1	Это 3d-печать при помощи металлического порошка и электронного луча в вакууме
2	Это расплавление металла электронным лучем в вакууме с последующей заливкой расплава в форму
3	Это расплавление полупроводниковых пластин с целью образования в них окон