И.Г. Голованов

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Учебное пособие

И.Г. Голованов

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Учебное пособие

2014

Содержание

Введение…….3
1. Тема № 1. Основные задачи дисциплины «Промышленные электротехнологические установки»……..4
2. Тема №2. Термоэнергетические процессы в промышленных установках……..9
3. Тема № 3. Электротермические установки……..27
4. Тема №4. Электрическая сварка…….40
5. Тема № 5. Электролизные установки……53
6. Тема № 6. Электроэрозийные установки……..61
7. Тема №7. Ультразвуковые установки……83
8. Тема № 8. Установки электронно-ионной технологии……103
Список литературы……..116

Введение

Предметом изучения данной дисциплины являются «Промышленные электротехнологические установки» как преобразователи электрической энергии в другие виды энергии и процессы, происходящие в этих установках,

Главной целью дисциплины является подготовка бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника» в соответствии с требованями Государственного образовательного стандарта, формирование знаний по физическим основам, принципам действия, схемным и конструкторским решениям и управлению работой основных промышленных типов электротехнологических установок. В данном учебном пособие предлагается 8 тем лекционного материала по дисциплине «Промышленные электротехнологические установки». По тематическому плану в дисциплине изучаются установки электротермии, электрической сварки, электролиза, электрофизической и электрохимической обработки материалов, ультразвуковой, электронно-ионной технологии.

Задачи дисциплины: овладение теорией и практикой технологических процессов, овладение знаниями в области конструкции и принципа действия электротехнологических установок, овладение навыками электротехнических расчетов, методами измерения и контроля параметров процессов, навыками анализа показаний измерительных приборов и систем т.п.

Материал дисциплины базируется и тесно связан с курсами: «Физика», «Химия», «Теоретические основы электротехники», «Информационно-измерительная техника и электроника», «Автоматизированный электропривод» и используется в курсах «Оптимизация систем электроснабжения», «Электроснабжение промышленных предприятий», а также при выполнении курсовых и дипломных проектов и в практической деятельности бакалавра.

Тема № 1. Основные задачи дисциплины «Промышленные электротехнологические установки»

Предметом изучения являются электротехнологические установки и электротехнологические процессы, осуществляемые с помощью этих установок, особое внимание уделено влиянию их на электрическую сеть.

Целью дисциплины является подготовка инженеров-электриков в соответствии с Государственным профессиональным образовательным стандартом, формирование знаний по физическим основам, принципам действия, схемным и конструкторским решениям и управлению работой

основных типов электротехнологических установок: *электротермии, электрической сварки, электролиза, электрофизической и электрохимической обработки материалов, ультразвуковой, электронно-ионной технологии.*

Задачи дисциплины: овладение теорией и практикой технологических процессов, овладение знаниями в области конструкции и принципа действия электротехнологических установок, овладение навыками электротехнических расчетов, методами измерения и контроля параметров процессов, навыками анализа показаний измерительных приборов и систем и т.п.

Материал дисциплины базируется на курсах «Физика», «Химия», «Теоретические основы электротехники», «Промышленная электроника», «Электрические машины» и используется в курсах «Электроснабжение промышленных предприятий», «Типовой электропривод», при выполнении курсовых и дипломных проектов и в практической деятельности инженера-электрика.

Содержание дисциплины. Электротехнологические процессы (электротехнология) широко применяются в народном хозяйстве и в промышленности. *Электротехнология* использует электрическую энергию непосредственно для технологической обработки различных изделий.

Появление в промышленности ряда новых материалов, разработанных Появление в промышленности ряда новых материалов, разработанных конструкций машин, оборудования, деталей и узлов, появление новых требований в технологии производства различных машин и и оборудования вызвало затруднение в использовании традиционных технологий.

Электротехнолологические методы обработки различных изделий во многих случаях по технико-экономическим показателям превосходят многие физические и химические традиционные методы обработки материалов.

Электротехнолологические установки в общем виде – это преобразователи электроэнергии в другие виды энергии, и , именно в процессе преобразования или в результате преобразования осуществляются технологические операции. Причем, на основе различных преобразований электроэнергии созданы и создаются новые технологи. В настоящее время сильно расширилась область применения электротехнологических процессов, вытеснившие многие технологические процессы с топливным нагревом.

Переход на электротехнологию обеспечивает:

– повышение качества продукции и и производительности труда;

–проведение таких процессов, которые другим путем получить невозможно;

– улучшение санитарных условий труда;

– снижение вредного воздействия на окружающую среду.

Термины «электротехнология», «электротехнологические процессы» весьма широки, по существу они охватывают все виды процессов, которые характеризуются использованием электроэнергии, когда она превращается в тепловую, механическую или химическую виды энергии. Термин «электротехнологические установки» включает агрегаты, в которых осуществляются различные электрофизические и электрохимические процессы, а также вспомогательные электротехнические аппараты и приборы (источники питания, устройства защиты, контроля, управления и др.).

Наряду с широко применяемыми технологическими процессами таким, как электросварка, электроплавка, гальванотехника и электролиз, появились новые электротехнологические способы обработки материалов, при которых эрозия и даление частиц вещества или изменение формы изделия и другие операции происходят под воздействием электрической энергии, вводимой непосредственно в зону обработки материала. При этих способах обработки используются тепловое и и химическое действие электрического тока, механичекое действие электрического поля на заряженные чстицы, воздействие электрического искрового разряда, воздействие электрического и

электромагнитного поля на обрабатываемую деталь через кавитацию жидкости в ультразвуковых установах.

Некоторые из вновь разработанных технологических процессов являются поистинно прорывом в техническом прогрессе. До некоторого времени практически было невозможно сверление кривых отверстий в металле, сверление круглых, квадратных, прямоугольных, треугольных отверстий в алмазе, стекле, фарфоре, термореактивной пластмассе. Сейчас электротехнология стоит в ряду наиболее передовых способов обработки металлов и токопроводящих материалов.

В курсе данной дисциплины будут рассмотрены следующие основные технологические процессы и методы обработки материалов [1]:

1. Электротермические процессы, в которых используется превращение электрической энергии (ЭЭ) в тепловую для нагрева материалов и изделий в целях изменения их свойств или формы, а также для плавления и испарения.

2. Электросварочные процессы, в которых получаемая из ЭЭ тепловая энергия используется для нагрева тел в целях осуществления неразъемного соединения с обеспечением непосредственной сплошности в месте сварки.

3. Электрохимические процессы и методы обработки и получения материалов, при которых с помощью ЭЭ осуществляются разложение химических соединений и их разделение путем перемещения заряженных частиц (ионов) в жидкой среде под действием электрического поля (электролиз, гальванотехника, анолная и электрохимическая обработка).

4. Электрофизические методы обработки, при которых для воздействия на материалы используется превращение ЭЭ как в механическую, так и в тепловую (электроэрозионная, ультразвуковая, магнитоимпульсная, электровзрывная технологии).

5. Аэрозольная технология, при которой энергия электрического поля используется для сообщения электрического заряда взвешенным в газовом потоке мелким частицам вещества с целью перемещения их под действием поля в нужном направлении, В соответствии с вышеупомянутыми электротехнологическими процессами и методами обработки материалов в курсе лекций рассматриваются следующие основные виды электротехнологического оборудования:

а) электрические печи и электронагревательные установки;

б) электросварочные установки;

в) установки для размерной электрофизической и электрохимической обработки материалов;

г) установки электроаэрозольной технологии.

Историческая справка [1]

Впервые возможность использования ЭЭ проведения технологических процессов была показана в России в 1803 г. ИВ.В.Петровым, осуществившим с помощью электрической дуги плавление различных материалов и восстановление металлов из иъ окислов.

Однако в 19 веке это открытие применялось лишь в лабораторной практике из-за отсутствия мощных источников электроэнергии. Только в конце века появились первые промышленные электропечи и электролизные установки.

Бурное развитие получила электротехнология в 20 веке. Появились: электрометаллургические процессы, электролиз, электротермическая обработка металлов и изделий.

Многие сделали в этой области как в теории самих процессов, так и в разработке и создании для них электрооборудования отечественные ученые и конструкторы.

Вот их имена.

Ижевский В.П. – создатель «русской электрической печи» для плавки цветных металлов, работы в области металлографии и термообработки.

Лодыгин А.Н. (1847-1923 г.г.) – изобретатель угольной лампы накаливания (1872 г.) , труды в области электрометаллургии. В 1908 г. в журнале «Электричество»Ладыгин А.Н. опубликовал работу по индукционному нагреву металла в тигле без сердечника. Промышленное применение индукционных печей без сердечника началось после разработки источников переменного тока повышенной и высокой частоты.

Славянов Н.Г. (1854-1897 г.г.) – создатель дуговой сварки, разработал сварку металлов металлическим электрододом (1888 г.) с предварительным нагревом изделия. Впервые применил генератор для электросварки.

Славянов Н.Г. впервые дал электросварке широкое практическое применение. Он отработал технологический процесс дуговой сварки металлическим электродом, сконструировал и построил сварочные генераторы и вспомогательную аппаратуру. Работы Славянова Н.Г. получили всемирную известность, и в 1893г. он был награжден дипломом и золотой медалью на Всемирной выставке в г. Чикаго. Однако, широкое применение в промышленности в России изобретение Славянова Н.Г. получило только после 1924 г., когда в Ленинграде на заводе «Электрик» началось произодство сварочных машин и аппаратов.

Грамолин А.Ф., Штейнберг С.С. (1872-1940 г.г.) – металлурги, создатели печи для плавки стали с угольными стержневыми нагревателями, труды по обработке и легированию стали (Уральская научная школа).

Тельный С.И. – разработчик теории электрической цепи с дугой переменного тока.

Максименко М.С. – основатель рудной электротермии.

Вологдин В.П. (1881-1953 гг) – создатель индукционной плавки металлов и индукционной поверхностной закалки, высокочастотных генераторов. С помощью в/ч генераторов впервые осуществлена радиосвязь Москва – Нью-Йорк (1925 г.). Разработаны высоковольтные ртутные выпрямители. Создатель института ВНИИТВЧ, который носит его имя (г. Парголово под Петербургом). Пионер высокочастотной техники.

Патон Евгений Оскарович (1870-1953 г.г.) – создатель НИИ сварки (1934 г.). Фундаментальные труды по сварке. Автоматическая сварка под флюсом. В 1943 г. – Герой соц. Труда. Впервые построен цельносварной мост через Днепр в Киеве.

Патон Борис Евгеньевич (род. в 1918 г.), сын Патона Е.О., - создатель электрошлакового переплава. Исследования по электрошлаковой сварке и специальной электрометаллургии. Директор НИИ, дважды Герой соц. Труда.

Неоценимый вклад в развитие электротехнологии внесли отечественные ученые: А.Д. Свенчанский, И.П. Евтюкова, Фомичев Е.П., Болотов А.В., Холопов Ю.В., ЛазаренкоБ.Р., Лазаренко Н.И., Гусев В.А., и др.

Без электротехнологии невозможен технический прогресс. Высококачественные стали, жароупорные металлы и сплавы,

полупроволниковые материалы для современной авиационной, ракетной космической техники, для для энергетики – все это достижения электротехнологии.

Однако, электротехнологические процессы являются весьма энергоемкими. Потребление ЭЭ на электротехнологию в настоящее время составляет 30% общего производства ЭЭ. Вместе с тем, наблюдается рост электротехнологии, поскольку эта техника будущего - это особо прочные материалы, жаропрочные изделия, точные высококачественные обработки.

Контрольные вопросы к лекции

1.Назовите основные виды преобразования электрической энергии в другие виды энергии.

2.Какие наиболее выдающиеся достижения в развитии электротехнологических установок в нашей стране Вам известны?

3.Какими основными параметрами характеризуются электротехнологические установки?

4.По каким признакам осуществляется классификация электротехнологических установок?

5.Назовите нормативно-технические документы, регламентирующие устройство, параметры и эксплуатацию электротехнологических установок.

Тема №2. Термоэнергетические процессы в промышленных установках

Основу термодинамики составляют два закона, так называемые начала термодинамики, которые были выведены при обобщении накопленных опытных фактов.

Первый закон термодинамики - это закон сохранения энергии применительно к тем превращениям, при которых происходит преобразование термической энергии, сопровождаемое выделением тепла.

Все разнообразные формы энергии, встречающиеся в природе, можно с точки зрения термодинамики объединить в три группы:

1) внутренняя энергия;

2) тепло;

3) работа.

Согласно этой классификации, под внутренней энергией (U) понимают всю энергию, содержащуюся в данном теле (например в 1моле), т.е. суммарную энергию вращательного и поступательного движения молекул, колебания атомов, движения электронов, а также движения атомных ядер как целого и элементарных частиц, из которых они состоят, и т.д. Таким образом, внутренняя энергия объединяет термическую и химическую энергии, не включая ни кинетической, ни потенциальной энергии тела как целого.

Наши ученые пока еще не могут даже для простейших тел точно определить величину внутренней энергии. Непосредственно же в эксперименте проявляются только изменения внутренней энергии (A U), и все закономерности, установленные на основании эксперимента, также относятся лишь к изменениям внутренней энергии. Эти изменения проявляются либо в виде тепла (Q), либо в виде какой-то другой формы энергии. Поскольку все виды энергии, за исключением тепла, могут быть в принципе без всяких ограничений превращены в работу или друг в друга, в термодинамике все они объединяются под одним названием - работа (A).

Такая классификация различных видов энергии позволяет сформулировать первое начало термодинамики: увеличение внутренней энергии (A, U) какого-либо тела определяется количеством подведенного тепла и работой, произведенной над этим телом или системой (работу производят внешние силы). Математически этот закон выражается так:

$$AU = Q + A. \qquad (2.1)$$

Если в изучаемом процессе тело теряет тепло, то Q отрицательно (если тело производит внешнюю работу, то отрицательно A).

Из первого начала термодинамики вытекает целый ряд закономерностей, представляющих не только теоретический интерес, но и имеющих важное практическое значение, например при конструировании тепловых двигателей. Однако этот закон, несмотря на его особую важность и всеобщность, отражает лишь одну сторону явления. Первое начало термодинамики показывает взаимосвязь различных видов энергии в процессе их превращения, но не говорит о том действительно ли произойдет в данных условиях это превращение, в каком направлении пойдет процесс и каков будет результат

превращения: возникнет ли один или несколько видов энергии. Первое начало термодинамики не указывает на особенности термической энергии или тепла, отличающих их от других видов энергии. Особые свойства термической энергии и ограничения, наложенные на возможность ее превращения в другие виды энергии отражены во втором начале термодинамики, Этот закон отвечает на основной вопрос: при каких условиях и в каких соотношениях тепло может быть превращено в работу или другие виды энергии?

Второй закон термодинамики можно формулировать как невозможность создания вечного двигателя второго рода – устройства, в котором рабочее тело совершало бы в периодическом цикле работу, находясь в тепловом контакте с одним источником теплоты (В. Оствальд, 1888). Во всех реальных тепловых двигателях превращение теплоты в работу обязательно сопровождается передачей определенного кол-ва теплоты окружающим телам и изменением их термодинамического состояния, т.е. необратимо. Согласно второму началу термодинамики, необратимость того или иного процесса означает, что систему, в которой произошел процесс, невозможно вернуть в исходное состояние без каких либо изменений в окружающей среде.

Согласно наиболее общей формулировке второе начало термодинамики, бесконечно малое количество тепла δQ, переданное системе в обратимом процессе, отнесенное к абсолютной температуре T, является полным дифференциалом функции состояния S, называемой энтропией. Для обратимых процессов $\delta Q/T = dS$ для необратимых $\delta Q/T < dS$. Для любых процессов (обратимых и необратимых) может быть обобщено записью $dS \geq \delta Q/T$. В изолированных (замкнутых) системах δQ = 0 и $dS \geq 0$, т.е. возможны лишь процессы, сопровождающиеся увеличением энтропии (закон возрастания энтропии). В состоянии равновесия энтропия изолированной системы достигает максимума и никакие макроскопические процессы в такой системе невозможны.

Совокупность значений температуры во всех точках тела в данный момент времени называется т е м п е р а т у р н ы м п о л е м. Если температура тела не изменяется во времени, т.е. $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$, то поле будет с т а ц и о н а р н ы м,

в противном случае – нестационарным. Поверхность, во всех точках которой температура одинакова, называется изотермической. Вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры и численно равный частной производной от температуры по этому направлению, называется градиентом температур:

$$\operatorname{grad} t = \left(\vec{n}_0\right)\frac{\partial t}{\partial n}, \qquad (2.2)$$

где $\vec{n}_0$ – единичный вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры.

Передача теплопроводности происходит от одной изотермической поверхности к другой в сторону понижения температуры. Количество теплоты, проходящее в единицу времени через произвольную поверхность, называется тепловым потоком. Тепловой поток обозначается символом Q и измеряется в ваттах (в ккал/ч).

Тепловой поток, отнесённый к единице поверхности, называется плотностью теплового потока, обозначается символом Q и измеряется в Вт/м^2 [в ккал/(м^2-ч)]. Вектор, проекция которого на произвольное направление есть местная плотность теплового потока, проходящего через площадку, перпендикулярную к избранному направлению, называется вектором плотности теплового потока (обозначается символом **q**).

По закону Био–Фурье вектор плотности теплового потока пропорционален градиенту температуры:

$$\left.\begin{aligned} \vec{q} &= -\lambda \operatorname{grad} t, \\ q_n &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}, \end{aligned}\right\} \qquad (2.3)$$

где λ – физический параметр, называемый коэффициентом теплопроводности [λ=Вт/(м·°С)] и характеризующий способность вещества (материала) проводить теплоту.

Тепловой поток через поверхность $\mathbf{F_n}$:

$$Q = \int_F q_n \, dF_n. \tag{2.4}$$

Количество теплоты, протекающее через поверхность F_n за время Т:

$$Q_\tau = \int_0^\tau Q d\tau.$$

Коэффициент теплопроводности λ зависит от природы вещества, температуры и, в меньшей степени, от давления. Для большинства чистых металлов *λ* с увеличением температуры снижается, для сплавов возрастает. Для неметаллических строительных и теплоизоляционных материалов % с увеличением температуры увеличивается и зависит от пористости (объемной массы) и влажности.

Связь между изменениями температуры в пространстве и во времени устанавливается на основе первого закона термодинамики и закона Био – Фурье и выражается дифференциальным уравнением теплопроводности, которое имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho c} \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + \frac{q_\vartheta}{\rho c}, \tag{2.5}$$

если λ зависит от температуры.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 t + \frac{q_\vartheta}{\rho c}, \tag{2.6}$$

если λ величина постоянная, где $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$ – коэффициент температуропроводности, м^2/с, характеризует скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретом теле; с — теплоёмкость, Дж/(кг·°С); ρ - плотность, кг/м^3; q_U – мощность внутренних источников тепла, Вт/м^3 численно равная количеству тепла, выделяемому (поглощаемому) источниками (стоками) в единице объема тела в единицу времени; div(λgradt) – расхождение (дивергенция) вектора λgradt; ∇^2 – дифференциальный оператор второго порядка (оператор Лапласа).

Для стационарного режима уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\nabla^2 t + \frac{q_\vartheta}{\lambda} = 0, \qquad (2.7)$$

а при отсутствии внутренних источников тепла:

$$\nabla^2 t = 0. \qquad (2.8)$$

Для расчёта процессов теплопроводности к дифференциальному уравнению присоединяют условия однозначности, включающие:

а) геометрические условия, которые задают форму и размеры тела;

б) физические условия, которые задают значения физических параметров (α, λ; если ρ, c и λ зависят от температуры, то эти зависимости также должны быть заданы) и закон распределения в пространстве и изменения во времени мощности внутренних источников тепла;

в) начальные условия, которые задают распределение температуры внутри тела в начальный момент времени;

г) граничные условия, которые задают распределение температуры или плотности теплового потока на поверхности тела или температуру окружающей среды и закон теплообмена между телом и средой.

В качестве простейшего соотношения, связывающего плотность теплового потока на границе тела q_c и температуры поверхности тела t_c и окружающей среды, т. е. жидкости или газа $t_ж$, принимается закон Ньютона – Рихмана:

$$q_c = \alpha(t_c - t_ж), \qquad (2.9)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·°С), численно равный q_c при $t_c - t_ж = 1$°С и характеризующий интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей его жидкостью или газом. В зависимости от постановки задачи α может рассматриваться как постоянная величина или же как функция времени и координат для различных поверхностей (плоской стенки, цилиндрической стенки, шаровой стенки, стержня бесконечной длины, стержня конечной длины, конических шин, ребристой стенки) при стационарном и нестационарном режимах.

При стационарных режимах теплообмена температурное поле не изменяется по времени и в дифференциальном уравнении теплопроводности Фурье-Кирхгофа производная $\partial t / \partial \tau = 0$. Однако целый ряд практических задач

теплообмена не может быть рассмотрен в рамках предположения о неизменности параметров процесса по времени.

Нестационарные тепловые процессы сопровождаются не только изменением температурного поля по времени, но почти всегда связаны с изменением энтальпии тела, т.е. с его нагревом и охлаждением.

В большинстве нестационарных тепловых процессов можно выделить три этапа, характеризующиеся различными режимами, из которых собственно нестационарными будут лишь два первых. На первом этапе поле температур в теле определяется не только изменившимся тепловым воздействием, например изменением температуры окружающей среды, но и начальным распределением температуры в теле. Поскольку начальное температурное поле в общем случае можёт быть весьма произвольным, то и тепловой режим на этом первом этапе носит характер неупорядоченного процесса. На втором этапе влияние начального состояния всё более и более ослабевает, и дальнейшее протекание процесса управляется лишь условиями на границе тела, т.е. наступает режим упорядоченного процесса, в частности регулярный режим. Для большинства процессов первой группы характерен ещё и третий этап, в котором температура тела во всех точках одинакова и равна температуре окружающей среды. Это состояние называют состоянием теплового равновесия.

Основные параметры электроэнергетических установок (мощность, коэффициент полезного действия, удельный расход электроэнергии) определяют в результате расчёта теплоты, требуемой для технологического процесса, а также расчёта процессов теплообмена между источником теплоты и окружающей средой. Теплообмен определяется законами теплопередачи. Процесс теплообмена является сложным, поэтому в инженерных расчётах его подразделяют на более простые составляющие – теплопроводность, конвекцию и излучение (лучистый теплообмен).

Теплопроводность – это передача теплоты внутри твёрдого тела или неподвижной жидкости (газа) от областей с более высокой температурой к областям с более низкой температурой.

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией теплопроводность обусловлена тепловым движением и энергетическим взаимодействием

микрочастиц (молекул, атомов, электронов). Частицы с большей энергией отдают часть своей энергии менее нагретым при соударении. Скорость теплопередачи в этом случае зависит от физических свойств вещества, в частности от его плотности. при стационарных процессах теплопередачи тепловой поток, проходящий через тело в единицу времени, постоянный. т.к. в процессе передачи теплоты теплосодержание тепла не изменяется.

Механизм переноса теплоты зависит от агрегатного состояния тела. В жидкостях и твердых телах – диэлектриках – перенос теплоты осуществляется путем непосредственной передачи теплового движения молекул и атомов соседним частицам вещества. В газообразных телах распространение теплоты теплопроводностью происходит вследствие обмена энергией при соударении молекул, имеющих различную скорость теплового движения. В металлах теплопроводность осуществляется главным образом вследствие движения свободных электронов.

Различают теплоизоляционные и теплопроводящие материалы.

Теплоизоляционные материалы $\lambda < 0{,}25\ \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$.

Коэффициент теплопроводности зависит от температуры материала, а также от его структуры.

Изотропные тела имеют одинаковый коэффициент теплопроводности по всем направлениям. Для анизотропных тел вводятся три коэффициента теплопроводности $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$.

Коэффициент теплопроводности численно равен плотности теплового потока при единичном градиенте температуры.

Конвекция – теплопередача в жидкостях и газах, при которой перемещаются отдельные частицы и отдельные элементы объёма вещества, переносящие присущий им запас тепловой энергии. Перенос теплоты вместе с переносом массы вещества называют конвективным теплообменом. Тепловой поток (Вт) через однослойную плоскую стенку при установившемся режиме определяется по формуле Фурье.

Тепловой поток на основе конвекционного обмена определяют на основе закона Ньютона – Рихмана:

$$Q = \alpha_k \cdot (t_c - t_r) \cdot F,$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м^{2}К);

t_c – температура стенки;

t_r – температура окружающей среды;

F – поверхность конвективного теплообмена, м^2.

Коэффициент теплоотдачи α_k представляет собой количество теплоты, передаваемой в единицу времени через единицу поверхности при разности температур между поверхностью и омываемой жидкостью в 1 К.

Излучение – передача теплоты в невидимой (инфрокрасной) и видимой частях спектра.

При передаче теплоты излучением энергия передаётся в форме электромагнитных волн. Для передачи тепловой энергии наиболее существенным являются тепловое излучение с длиной волны 0,4 – 400 мкм. Между нагретыми телами, расположенными в пределах видимости друг друга, всегда происходит лучистый теплообмен. При этом суммарный тепловой поток направлен от более нагретого тела к менее на гретому.

При излучении нагретого тела в неограниченное пространство (при односторонней теплопередаче) лучистый поток (Вт/м^2), определяется:

$$Q = C_s \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \qquad (2.10)$$

где C_s – постоянны коэффициент излучения абсолютно чёрного тела;

ε – степень черноты тела, численно равная его поглащающей способности (для абсолютно чёрного тела, численно равная его поглащающей способности (для абсолютно чёрного тела $\varepsilon = 1$);

T – абсолютная температура, К.

При изготовлении электротермических установок применяются материалы, предназначенные для работы при высоких температурах. В их числе огнеупорные и теплоизоляционные материалы для теплоизоляции нагреваемых тел от окружающей среды и жаропрочные материалы, идущие на изготовление нагревателей и элементов конструкций печей.

Огнеупорные материалы

К огнеупорным относятся материалы и изделия, способные выдерживать температуру более 1580 градусов. В большинстве своем огнеупорные материалы производятся из минерального сырья. Потребность в огнеупорных материалах значительно возросла за последние несколько десятилетий. Технологии создания новых огнеупорных материалов (каолиновая вата и др.) развиваются в двух основных направлениях:

1.Металлургия;

2. Изоляция различных тепловых агрегатов.

Огнеупорность – это свойство материала длительное время выдерживать очень высокие температуры, не меняя при этом своей структуры и свойств. Как правило, такие материалы применяются там, где температурный режим составляет > 900, и служат для защиты менее огнестойких изделий от воздействия, как температурного разрушения, так и от других факторов (газового и т.д.), возникающих при высокотемпературных процессах. Главной областью применения огнеупорных материалов, на которую приходится до 60% всех выпускаемых видов огнеупоров, является черная и цветная металлургия. Потребность в огнеупорах при выплавке 1т стали составляет от 20 до 90 кг, это значение меняется в зависимости от технологии. Также некоторые огнеупорные материалы используются в качестве **противопожарной изоляции**.

Виды огнеупоров

Алюмосиликатные огнеупоры. Сырьем для этих огнеупорных материалов служат оксид алюминия $A_{12}O_3$ и оксид кремния SiO2. Область применения алюмосиликатных огнеупоров - различные тепловые агрегаты. В зависимости от количества содержания $A_{12}O_3$ такие огнеупоры бывают:

– полукислые (содержание $A_{12}O_3$ - от 14 до 28%);

– шамотные (содержание $A_{12}O_3$ - от 28 до 45%);

– высокоглиноземистые (содержание $A_{12}O_3$ - от 45 до 95%);

Безобжиговые огнеупоры. Технология изготовления таких огнеупорных материалов заключается в их сушке при температуре не более 400. В качестве связующего при их изготовлении используются глина, жидкое стекло, фосфатные растворы или керамические суспензии, различные термопластичные смолы. Безобжиговые огнеупоры по термостойкости

превосходят аналогичные материалы, выполненные по обжиговой технологии. Область применения безобжиговых огнеупоров в металлургии:

– блоки бетонные кремнеземистые – для строительства нагревательных колодцев;

– высокоглиноземные и шамотные материалы - в обжиговых агрегатах;

– магнезиальноизвестковые, со смоляным связующим - для изготовления внутренней поверхности сталелитейных конвертеров;

– пераклизовые – для изготовления сталеразливочных стаканов;

– магнезиальные - применяемые как в металлургических агрегатах, так и в печах по обжигу доломита, цемента и т.д.

Безкислородные огнеупоры – это материалы, изготовленные из не содержащих кислород соединений, к которым относятся карбиды, нитриды, силициды, сульфиды, путем обжига при высокой температуре изделий из порошков этих соединений с добавлением связки. В окислительной среде такие материалы имеют очень ограниченное применение.

Волокнистые огнеупоры – это сформированные **огнеупорные материалы и плиты**, а также блоки или листы изоляционного материала, имеющие волокнистую структуру. Изготавливаются из высоко-глиноземного или поликристаллического волокна, а также из оксида циркония. Такими огнеупорами футеруются тепловые агрегаты, а также их используют в качестве заполнителя компенсационных швов.

Высокоглиноземистые огнеупоры – один из видов алюмосиликатных материалов, содержание $A_{12}O_3$ в которых больше 45%. Этот огнеупор имеет три вида:

– муллитокремнеземистый ($A_{12}O_3$ - 45-62%), МКР, имеет шамотную основу из глин и бокситов;

– муллитовый ($A_{12}O_3$ -62-72%), МЛ;

– муллитокорундовый ($A_{12}O_3$ - 72-90%) МК, так же, как и МЛ, имеют основу из глиноземов, маложелезистых бокситов и электрокорундов.

Данным видом огнеупора футеруются сталеразливочные и другие виды металлургических ковшей, горна доменных и своды электродуговых печей, а также поверхности агрегатов, температурный диапазон работы которых превышает 1350. Огнеупоры МК и МЛ применяют в качестве набивки для

металлургических ковшей и как заполнитель при изготовлении огнеупорных бетонов.

Высокоглиноземистые корундовые огнеупоры. К ним относятся огнеупоры, содержание $A_{12}O_3$ в которых >95%. Для изготовления такого огнеупора используют порошок электроплавкого корунда и технический глинозем. После формировки его обжигают при температуре 1600-1750. Огнестойкость получаемого материала позволяет использовать его в процессах с температурой 1750-1800, корундовый огнеупор способен устойчиво контактировать с жидким металлом и шлаками, кислотами, щелочами и расплавленным стеклом. Изготовленные корундовые огнеупорные материалы и плиты применяются в качестве шиберных затворов ковшей, футеровки вакууматорных камер стали, при производстве тиглей для плавки стекла и для изготовления насадок высокотемпературных нагревателей воздуха. Из неформованной массы этого огнеупора выполняются ремонтные работы футеровок, используемых при температуре больше 1700.

Динасовые огнеупоры – разновидность кремнеземистых огнеупоров, в составе которых находится более 93% SiO_2. Если материал выпускается с кварцитовыми добавками, то содержание SiO_2 может составлять 80-93%. Производятся следующие виды динасовых огнеупоров:

– известковопериклазовые (доломитовые) – к основе из доломита добавляется периклазовый порошок, доля MgO в котором составляет 10-50%, а CaO – 45 –85%. Изготовление этих огнеупоров при t° 1500 –1700°С дает возможность сохранять в их составе частично свободный CaO. Область применения этих материалов - футеровка сталеплавильных печей и ковшей, конвертеров и электропечей;

– безобжиговые известковопериклазовые - сформированное из обожженного порошкового доломита и органического связующего (каменноугольная смола и т.д.) изделие обрабатывается температурой 300-600°. Эти огнеупоры выдерживают температуру больше 2000°, это позволяет использовать их для футеровки сталеплавильных конвертеров;

Карбидкремниевые – огнеупоры с количеством SiC > 70%. Применяют их при изготовлении рекуператоров, муфелей, футеровке электронагревательных колодцев. Также используют эти огнеупоры в агрегатах

по производству алюминия и цинка. Применение оксинитридной и нитридной связки в этом огнеупорном материале позволяет использовать их в домнах и печах для футеровки их нижней части. Из неформованной массы этого огнеупора делают покрытие щитовых экранов в топках котелен, а также используют при огнеупорной кладке.

Кремнеземистые огнеупоры – содержащие в своем составе > 80% SiO_2. Подразделяются на динасовые и кварцевые. Кварцевые огнеупоры представляют собой расплав природного или синтетического кремнезема, который содержит в себе > 99% SiO_2. Они используются при производстве инфракрасных ламп, блоков стекловарных печей, защитных частей термопар. Измельченное кварцевое стекло в виде порошка после термообработки дает возможность получать огнеупорную кварцевую керамику.

Легковесные – огнеупоры с пористой (от 45 до 850%) структурой. В зависимости от сырья изготовления, бывают шамотными, динасовыми, глиноземными и другими. Пористость материала достигается несколькими технологическими приемами:

– добавлением в шихту быстро выгорающих компонентов. Это может быть кокс, древесные опилки, полистирол;

– смешиванием огнеупорных порошков в виде суспензий и пены клеевого раствора;

– добавлением химических газообразующих добавок в суспензию, которая содержит стабилизатор.

Заполненные составом формы подвергаются термообработке при температуре > 1250°. Применение легковесных огнеупоров при устройстве футеровки печей котелен и обжиговых печей позволяет снизить расход энергоресурсов на 10-30% по сравнению со стандартными материалами.

Магнезиальные огнеупоры – содержат в своем составе MgO. Их изготовляют из смеси обожженных и сырых материалов, которые после добавки связки проходят термообработку при температуре 1500-1900°. Такие огнеупоры обладают высокой огнестойкостью, что позволяет применять их в процессах, связанных с расплавом металла и шлаками, а также при футеровке агрегатов металлургии. Магнезиальные огнеупоры бывают трех видов:

Магнезиальносиликатные огнеупоры – их основу составляет форстерит Mg_2SiO_4, к которому добавлены 50-60% MgO, 25-40% SiO_2 и связующая добавка. Такие огнеупоры могут использоваться как без обжига, так и после обжига при температуре 1450-1550° С. Характерные особенности этих огнеупоров - пористость 22-28% и температура, при которой начинается размягчение - 1610-1620°С. Огнеупоры этого вида используют для футеровки в мартенах и стекловарных печах, при изготовлении металлургических ковшей и стаканов. Неформированные виды огнеупоров используют в качестве добавки в металлургических порошках;

Магнезиальношпинелидные огнеупоры – имеют в своем составе периклиз и хромшпинелид MgO. Обжигаемые при температуре 1700-1850°С, периклазохромитовые огнеупоры имеют в своем составе более 60% MgO, и от 5 до 20% Cr_2O_3. Для получения нужных характеристик огнеупора необходим чистый, более 96%, MgO, а также концентраты хромита. Такие огнеупоры используют в самых ответственных местах металлургических агрегатов: в сталелитейных печах при футеровке сводов, в горловинах и летках кислородных конвертеров, в сталелитейных ковшах, в высокотемпературных печах. Стоимость магнезиальношпинелидных огнеупоров более низкая, чем магнезиальношпинелидных периклазохромитовых, поэтому первые применяются на менее ответственных участках металлургических агрегатов.

Магнезитоизвестковые – изготовляются из прошедшего обжиг доломита или из составов, в которые входят окислы магния и кальция. Такие огнеупоры служат для футеровки конвертеров.

Неформованные огнеупоры – материалы, которые выпускаются без определенных форм, могут быть в виде кусков, суспензии, порошка, волокон или пасты. К этому виду огнеупоров относятся заполнители огнеупорных бетонов, огнестойкий цемент, огнеупорные бетоны и другие смеси, а также сталелитейные заправочные порошки. В зависимости от консистенции, такие огнеупоры бывают сухими или полусухими, а также пластичными. Главное назначение таких огнеупоров - материал для ремонта и устройства футеровок различного назначения в самых разных агрегатах сталелитейного оборудования, от сталеразливочных ковшей до мартеновских печей.

Выпуск оксидных огнеупорных материалов не ограничивается только неформованным материалом, состоящим на более чем 97% из высокоогнеупорных оксидов BeO, $A_{12}O_3$, CaO,Cr_2O_3 и других компонентов. Этот огнеупор производится и в виде изделий, которые формируются из порошков или суспензий под давлением. Такие огнеупоры в виде технической керамики применяются в качестве корпусов для измерительных приборов, контролирующих температурный, кислородный и другие режимы литейного процесса, а также для тиглей, вкладышей на разливе стали и в других областях.

Периклазовые огнеупоры – имеют в своем составе более 85% MgO, поэтому их называют магнезиальными. Изготавливаются они по обжиговой, при температуре 1600-1900°С, и по безобжиговой технологиям. В качестве связки при безобжиговой технологии применяется лигносульфонатовый сульфат магния и другие. Периклазовые огнеупоры широко используются для футеровки печей по выплавке никеля, мели, стали, в высокотемпературных печах, в кислородных конвертерах и ковшах в качестве затворов, для стаканов разлива стали и т.д. Огнеупор, выпускаемый неформованным, используют при изготовлении металлургических порошков и набивных масс вакууматоров. Периклазоуглеродистые - огнеупоры, основу которых составляет периклазовый порошок, к которому добавляется 6-25% графита и органическая связка (фенольная порошковая или другая такого же типа). Этот вид огнеупора используется для футеровки механизмов, подающих газ снизу в конвертеры, для важнейших участков электродуговых печей, а также для шиберных затворов.

Плавленые огнеупоры – получили свое название от технологии их производства. Огнеупорное сырье расплавляют при высокой температуре, а затем заливают в формы. Процесс расплавки происходит в электродуговых печах, только для кварца необходима печь сопротивления с кислородными горелками. Огнеупорные материалы такого типа, изготовленные из корунда или смеси корунда и муллита, в виде блоков применяются при устройстве подин в нагревательных печах, а также для днищ вакуум- камер. Для выполнения футеровки печей по выплавке стекла, применяют плавленые огнеупорные плиты из бадделеитокорундового кварцевого сырья. Некоторые порошки из

плавленых огнеупоров используют для производства огнеупорных бетонов и изделий из них.

Полукислые алюмосиликатные огнеупоры – содержат в своем составе от 14 до 28% $A_{12}O_3$. Их свойства позволяют использовать такие огнеупоры только на малозначимых участках футеровки коксовых печах и в некоторых других сталелитейных агрегатах, но как противопожарная изоляция, этот вид огнеупоров имеет большие перспективы.

Смолодоломитовые огнеупоры – Технология изготовления данных огнеупоров заключается в создании смеси из порошка, полученного при обжиге доломита, который смешивается с 4-6% каменноугольной смолы при температуре 100-120°С и формуется под прессом в изделия. Огнеупор этого типа устойчив при взаимодействии со шлаками и обладает плотностью 2800-2900кг/м^3. Основная область применения смолодоломитового огнеупора - футеровка кислородных конвертеров. Добавление в состав магнезитового порошка позволяет получать смолодоломитомагнезитовые огнеупоры. Применяются готовые огнеупоры этого типа там же, где и смолодоломитовые.

Углеродистые огнеупоры – главным составляющим имеют свободный углерод. К этому виду огнеупоров относятся:

– угольные, а также графитированные блоки, которые производятся из смеси кокса, термоантрацита, в качестве связующего применяются каменноугольная смола, битум, антрацитовое масло. Температура обжига таких блоков - 1100-1450°С;

– графитированные изделия, выпускаемые из нефтяного кокса. Такие огнеупоры имеют графитовую структуру и низкое содержание золы. Температура обжига таких изделий - более 2000°С;

– пирографит, который получают в результате распада углеродосодержащего газа на поверхности с высокой температурой;

– углеродосодержащие огнеупоры. Сырьем для их изготовления могут быть графит, корунд, шамот или огнеупорные глины.

Общие характеристики углеродистых огнеупоров: обладают высокой теплопроводностью, низким тепловым коэффициентом линейного расширения, способны длительное время выдерживать взаимодействие с расплавленным металлом и шлаком.

Область применения углеродистых огнеупоров:

– Футеровка нижней части доменных и электротермических печей;

– использование в агрегатах по выплавке меди и свинца;

– изготовление вкладышей изложниц, тиглей и т.д.;

– в виде неформованных порошков используются при кладке в качестве заполнителя швов, а также при футеровке сталелитейных желобов.

Цирконистые огнеупоры состоят из бодделеита и циркона. В зависимости от количества бодделеита (ZrO_2), эти огнеупоры делятся на четыре вида:

– оксидциркониевые огнеупоры, содержат > 85% ZrO_2;

– бадде-леитокорундовые, содержат от 20 до 85% ZrO_2, а также 65% $A_{12}O_3$;

– циркониевые, содержат более 50% ZrO_2 и более 25% Si_2O;

– оксидцирконийсодержащие, в которых ZrO_2 составляет менее 20%.

Цирконистые огнеупоры обладают высокой прочностью при температурах до 2400°С, предел огнестойкости этого материала - 2600°С, высокая термостойкость позволяет им длительное время выдерживать взаимодействие расплавленного металла. Керамические изделия, выполненные из ZrO_2, используют в качестве нагревательных элементов индуктивных печей, выдерживающих температуру до 2200°С, а также фильтров для сплавов. Другие разновидности цирконистых огнеупоров используют для производства различных агрегатов для разливки стали (тигли, стаканы, футеровка).

Шамотные огнеупоры – относятся к алюмосиликатным огнеупорам и содержат в своем составе от 28 до 45% $A_{12}O_3$ и 50-70% SiO_2. Для получения формованных изделий из шамота необходимо выполнить обжиг каолина (глины) в специальных вращающихся печах при температуре 1300-1500°С, полученный шамот измельчить, затем на его основе с добавлением глины и воды приготовить раствор, залить в формы, высушить и обжечь при температуре 1300-1400°С. Главное назначение таких огнеупоров - футеровка доменных, обжиговых и других печей, топок котлов котелен, а также при производстве сифонов для разливки стали. Неформованные огнеупоры этого вида, полученные при измельчении шамота, используются в сталелитейном

оборудовании в качестве мертелей, различных набивок, составляющих огнестойких бетонов, а также порошков. Шамотный огнеупор незаменим при ремонте различных футеровок.

Наша компания также реализует огнеупоры для изоляции ограждающих конструкций гражданских и промышленных объектов, например - ппж 200 - плита для конструкций с большой нагрузкой, материал для огнеупорных подложек прокладок и т.д.

Контрольные вопросы к лекции

1. Дайте физическое объяснение кривой изменения температуры нагрева тела.

2. Что такое теплоемкость тела и удельная теплоемкость?

3. Что такое переходный процесс?

4. Напишите формулу решения дифференциального уравнения (формулу экспоненты). Дайте определение физическим величинам, входящим в формулу.

5. Что такое постоянная времени переходного процесса (физическое и математическое понятие)?

6. Как определяется время переходного процесса от начала до промежуточного значения физической величины?

7. Как определяется время полного переходного процесса?

8. Дайте характеристику режимам работы электротехнологических установок. В какой зависимости находится время работы установки от постоянной времени переходного процесса при длительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы?

9. Охарактеризуйте способы теплопередачи.

10. Каково физическое понятие коэффициента теплопроводности, коэффициента теплопередачи конвекцией, коэффициента теплового излучения?

11. Опишите методику теплового и электрического расчета электротермической установки.

12. Что такое огнеупорность, механическая прочность, термическая прочность, электропроводность, теплопроводность, химическая нейтральность материалов?

Тема № 3. Электротермические установки

Электротермическое оборудование используется в процессах, в которых происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Электронагрев (электротермия) объединяет разнообразные технологические процессы тепловой обработки с использованием электроэнергии в качестве основного энергоносителя.

Понятие **«Электротермические установки»** характеризует электротермическое оборудование в комплексе с элементами сооружений, приспособлениями и коммуникациями (электрическими, газовыми, водяными, транспортными и др.), обеспечивающими его нормальное функционирование.

Электротермическое оборудование (ЭТО) – это оборудование, предназначенное для технологического процесса тепловой обработки с использованием электроэнергии в качестве основного энергоносителя.

Классификация ЭТО:

– электрические печи (электропечи);

– электротермические устройства;

– электротермические агрегаты.

Отличительной особенностью электрической печи (электропечи) является преобразование электрической энергии в тепловую и наличие нагревательной камеры, в которую помещается нагреваемое тело. Понятие «электропечь» может охватывать как собственно печь, так и в некоторых случаях печь со специальным оборудованием, входящим в комплект поставки (трансформаторами, щитами управления и пр.). Под «нагревательной камерой» понимается конструкция, образующая замкнутое пространство и обеспечивающая в нём заданный тепловой режим.

Электротермические устройства - оборудование без нагревательной камеры. Совокупность конструктивно связанных электропечей, устройств и другого технологического оборудования (трансформирующего, охлаждающего, моечного и др.) называется **электротермическими агрегатами.**

Классификация электротермического оборудования по методу нагрева

– сопротивления;

– дуговое;

– сварочное;

– диэлектрическое;

– электронно-лучевое;

– лазерное;

– ионное;

– плазменное;

– индукционное.

По температуре печи подразделяются на низкотемпературные (0 -650 С), среднетемпературные (650 – 1250 С) и высокотемпературные (1250 и выше).

Классификацию печей по технологическому назначению провести нельзя, так как для одного и того же процесса можно использовать несколько различных типов электротермического оборудования. Более удобна и правильна Классификация электрических печей по принципиальному признаку – по способу превращения электрической энергии в тепловую. В **ЭТО сопротивления** происходит выделение теплоты в твердых или жидких телах, включенных непосредственно в электрическую цепь, при протекании по ним электрического тока. На рисунке 3.1 приведены схемы нагрева сопротивлением.

Нагрев сопротивлением основан на законе Джоуля - Ленца, по которому при протекании тока в проводнике выделяется тепло, пропорциональное его электрическому сопротивлению, квадрату тока и времени прохождения тока. Ток может протекать по самому нагреваемому телу - прямой нагрев или по специальному нагревателю, от которого выделяемое тепло передается к нагреваемому телу теплообменом, такой нагрев называется косвенным. При косвенном нагреве различают три вида теплообмена: излучением, конвекцией и теплопроводностью. При высоких температурах определяющее значение имеет нагрев излучением. В нагреве излучением выделяется инфракрасный нагрев, основанный на подборе спектрального состава излучения с учетом свойств материалов избирательно поглощать или пропускать его. В таблице 3.1 представлена классификация электрических установок по способу превращения электрической энергии в тепловую.

Таблица 3.1 – Классификация электротермических установок по способу превращения электрической энергии в тепловую

Род нагрева	Способ превращения энергии	Область применения	Электротермическое оборудование
1	2	3	4
Нагрев сопротивлением	Эл. энергия превращается в тепловую при протекании тока через твердые или жидкие тела (эффект Джоуля).	Нагрев металлов под термообработку и пластическую деформацию; плавка металлов, сушка материалов; нагрев в вакууме и контролируемой атмосфере.	Эл. печи сопротивле-ния, конвективные и радиа-ционные периодического и непрерывного дей-ствия, нагревательные и плавильные установ-ки контактного нагрева, инфракрасный нагрев.
Нагрев электрической дугой	Эл. энергия превращается в тепловую в дуговом разряде в газообразной среде или в парах металла	Плавка черных и цветных металлов, вакуумная дуговая плавка; плазменные плавка и напыление; плазменный нагрев газов; получение качественных отливок.	Эл. дуговые печи прямого косвенного нагрева; вакуумные дуговые печи; пламенные дуговые установки.
Нагрев дугой и сопротивлением	Эл. энергия превращается в тепловую в дуговом разряде и при протекании тока в твердых и жидких телах.	Получение ферросплавов, карби-да кальция, чугуна, фосфора, абразивов медно-никилевого штейна и ряда цветных металлов.	Руднотермические печи: ферросплавные для получения карбида кальция, фосфора, абразивов.
Нагрев преимущественн о в переменном магнитном поле	Эл. энергия превращается в энергию переменного магнитного поля, а затем в тепловую в помещенных в это поле телах	Плавка черных и цветных металлов; нагрев металлов под термообработку и пластическую деформацию; поверхностная и сквозная закалка.	Индукционные плавильные печи; канальные и тигельные, периодические и непрерывного действия установки поверхностной закалки.
Нагрев преимуществен-но в переменном электрическом поле	Эл. энергия превращается в энергию переменного эл. поля, а затем в тепловую в помещен-ных в это поле телах.	Нагрев диэлектриков и пластмасс под поли-меризацию, сушка материалов, стерили-зация продуктов, приготовление пищи.	Установка диэлекетрического нагрева.
Нагрев электронным пучком.	Энергия электронного пучка превращается в тепловую в телах бомбардируемых электронным пучком.	Плавка в вакууме высокореакционных цветных и черных металлов; нагрев металла в вакууме; напыление, зонная плавка.	Электронные плавильные и нагревательные печи и установки для зонной плавки.

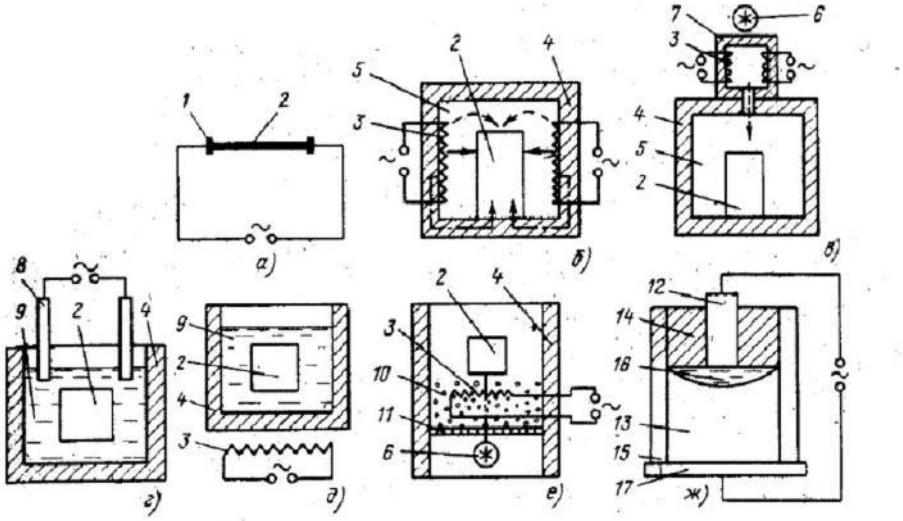


Рисунок 3.1 – Схемы нагрева сопротивлением
а – прямой; б – косвенный; в – конвекцией с калорифером;
г – электродный в жидкой среде; д – в жидкой среде с внешним обогревом; е – в псевдокипящем слое, ж – электрошлаковый: 1 – контактная система; 2 – нагреваемое тело; 3 – нагреватель; 4 – футеровка; 5 – рабочее пространство; 6 – вентилятор; 7 – калорифер; 8 – электрод; 9 – жидкая среда; 10 – мелкие частицы; 11 – решетка; 12 – расходуемый электрод; 13 – слиток; 14 – шлаковая ванна; 15 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 16 – жидкая металлическая ванна; 17 – поддон

Вид теплопередачи: сплошные стрелки – излучением; пунктирные – конвекцией; штрих-пунктирные – теплопроводностью

На рисунке 3. 2 падающий на полупрозрачное тело поток излучения в общем случае разделяется на три составляющие: отраженный, пропущенный и поглощенный потоки. Первые две рассеиваются в пространстве, третья превращается в тепловую энергию. Соотношение между этими составляющими зависит от спектра излучения нагревателя и свойств нагреваемого тела. Подбор спектра нагревателя, соответствующего характеристикам нагреваемого материала, позволяет получать желаемые технологические результаты. В **дуговом ЭТО** происходит выделение теплоты в электрической дуге. Материал нагревается за счет теплоты, поступающей в него из опорных пятен дуги, а также вследствие теплообмена с дугой и электродами.

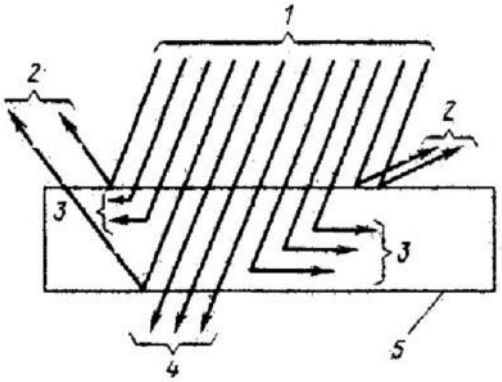


Рисунок 3. 2 – Нагрев полупрозрачных тел излучением

1 – падающее излучение; 2 – отраженное излучение; 3 – поглощенное излучение; 4 – пропущенное излучение; 5 – нагреваемое тело

На рисунке 3.3 представлены схемы **дугового нагрева.**

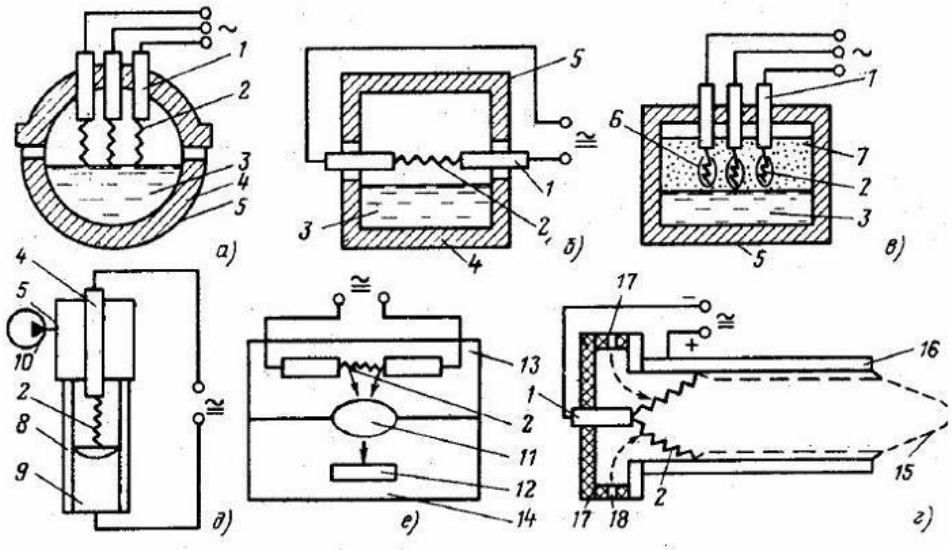


Рисунок 3.3 – Схемы дугового нагрева:

а – прямой; б – косвенный; в – смешанный; г – дуговой плазмотрон; д – вакуумно-дуговой; е – оптический дуговой:1 – электрод; 2 – электрическая дуга; 3 – расплавленный металл; 4 – футеровка; 5 – корпус печи; 6 – газовая полость; 7 – слой шихты; 8 – охлаждаемый кристаллизатор; 9 – слиток металла; 10 – вакуумная система; 11 – оптическая система; 12 – нагреваемое тело; 13 – дуговая камера; 14 – технологическая камера; 15 – струя плазмы; 16 – корпус плазмотрона (анод); 17 – электроизоляционный узел; 18 – подвод газа. Сплошными стрелками показана теплопередача излучением, пунктиром – поток газа

В **индукционном ЭТО** происходит передача электроэнергии нагреваемому телу, помещенному в переменное электрическое поле, и превращение её в тепловую энергию при протекании индуцированных токов в нагреваемом теле. На рисунке 3.4 представлены схемы индукционного нагрева.

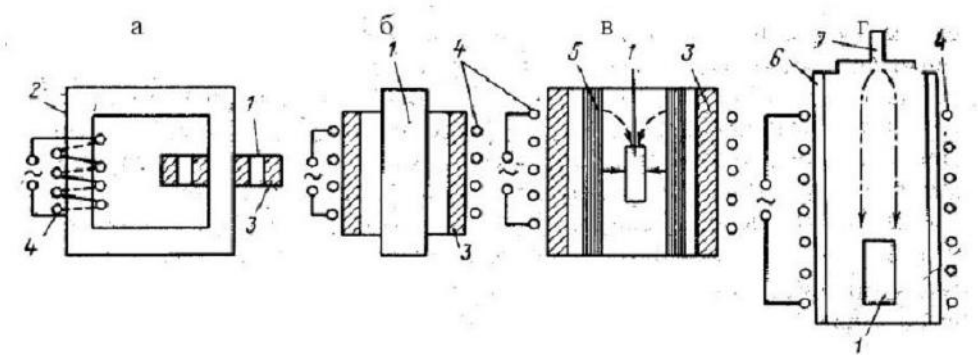


Рисунок 3.4 – Схемы индукционного нагрева:
а – с магнитопроводом; б – без магнитопровода; в – косвенный нагрев с промежуточным нагревателем; г – индукционно-плазменный:1 – нагреваемое тело; 2 – магнитопровод; 3 – футеровка; 4 – индуктор; 5 – промежуточный нагреватель; 6 – кварцевая труба; 7 – подвод газа. Род теплопередачи: сплошные стрелки – излучением; пунктирные – конвекцией. Штрих – пунктирными стрелками обозначен поток ионизированного газа

В **диэлектрическом ЭТО** (рисунок 3.5) происходит выделение теплоты в диэлектриках и полупроводниках, помещенных в переменное электрическое поле, за счёт перемещения электрических зарядов при электрической поляризации.

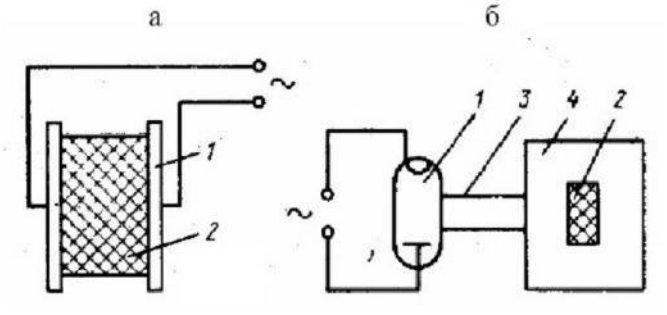


Рисунок 5 – Схемы диэлектрического нагрева: а - в электрическом поле; б – в электромагнитном поле (сверхвысокочастотном):1 – электроды; 2 – нагреваемое тело; 3 – волновод; 4 – резонатор

В **электронно-лучевом ЭТО** происходит выделение теплоты при бомбардировке нагреваемого тела в вакууме потоком электронов, эмитируемых катодом. Схема электронно – лучевого нагрева с аксиальной электронной пушкой приведена на рисунок 3.6, схема электронно-лучевой печи – на рисунке 3.7.

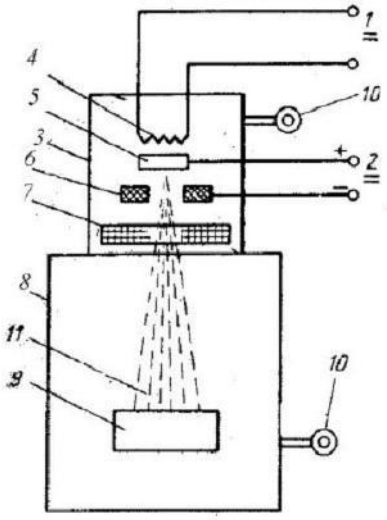


Рисунок 3.6 – Схема электронно-лучевого нагрева с аксиальной электронной пушкой:1– выводы к источнику питания подогревом; 2– выводы к основному источнику питания; 3 – электронная пушка, 4 – катод подогрева, 5 – катод; 6 – анод,7 – система проведения пучка,8 -герметичный корпус печи,9 – нагреваемое тело,10 – вакуумная система; 11 – пучок электронов

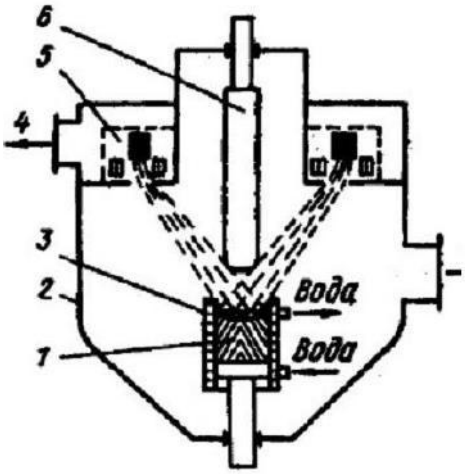


Рисунок 3. 7 – Схема электронно-лучевой печи: 1 – слиток, 2 – плавильная камера, 3 – кристаллизатор, 4 – присоединение к вакуумным, 5 – электронная пушка, 6 – переплавляемый электрод

В ионном ЭТО происходит выделение теплоты в нагреваемом теле потоком ионов, образованным электрическим разрядом в вакууме. Схемы ионного нагрева представлены на рисунке 3.8.

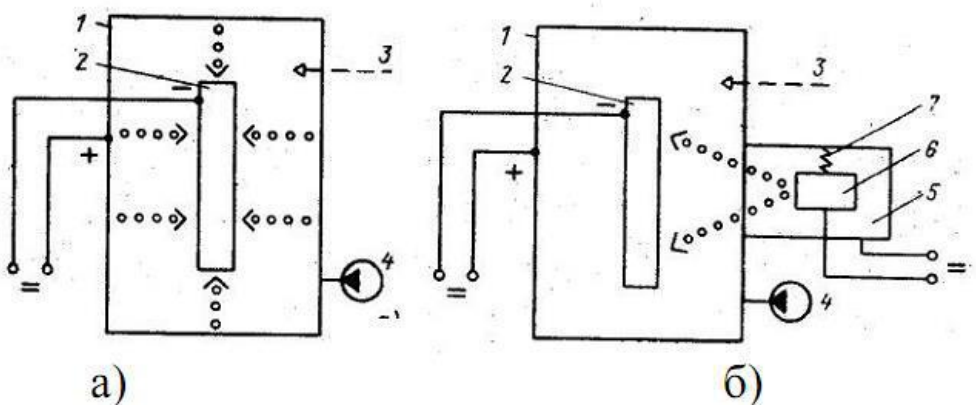


Рисунок 3.8 – Схемы ионного нагрева: а – диффузионный нагрев; б – ионное осаждение: 1 – герметичный корпус; 2 – обрабатываемое тело; 3 – подача газов; 4 – вакуумная система; 5 – испарительная камера; 6 – испаряемый материал; 7 – электрическая дуга Стрелками с кружками показан поток ионов

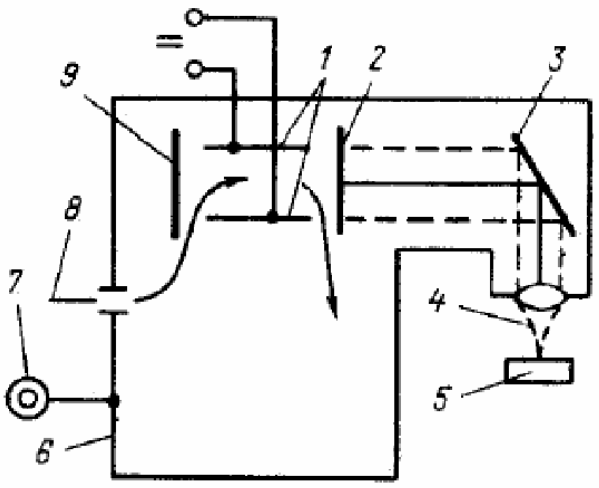


Рисунок 3.9 – Схема лазерного нагрева:

1 – электроды; 2 – резонатор (полупрозрачное зеркало); 3 – система фокусирования и транспортирования луча; 4 – лазерное излучение; 5 – нагреваемое тело; 6 – герметичный корпус; 7 – вакуумная система; 8 – подвод газов; 9 – резонатор (непрозрачное зеркало)

В **плазменном ЭТО** происходит выделение теплоты, основанное на нагреве газа за счет пропускания его через дуговой разряд или высокочастотное электромагнитное или электрическое поле. Схема плазменной печи с керамической футеровкой показана на рисунке 3.10 и схема плазменно-дуговой печи с водоохлаждаемым тиглем показана на рисунке 3.11.

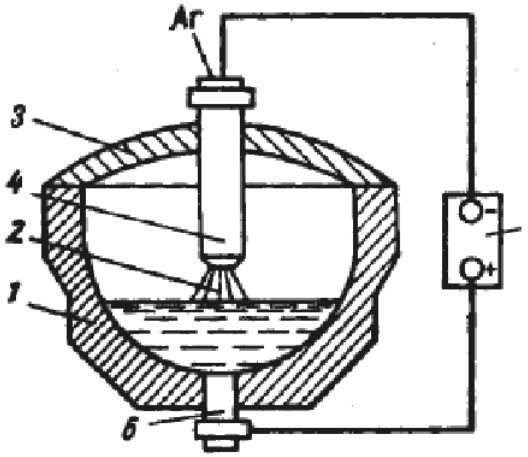


Рисунок 3.10 – Схема плазменной печи с керамической футеровкой: 1 - корпус печи; 2 - плазменная дуга; 3 – свод; 4 – плазматрон; 5 – источник; 6 – подовый водоохлаждаемый электрод

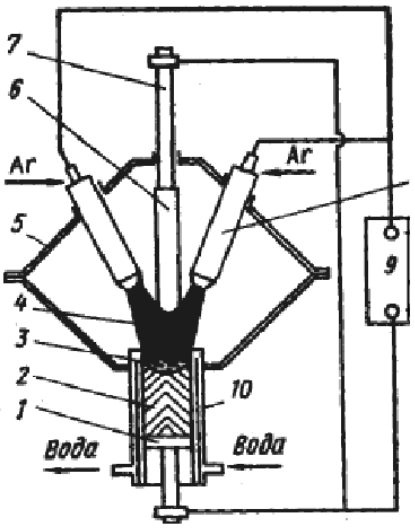


Рисунок 3.11 – Схема плазменно-дуговой печи с водоохлаждаемым тиглем: 1 – поддон; 2 – слиток; 3 – жидкий металл; 4 – плазменная дуга; 5 – корпус печи; 6 – переплавляемый электрод;7– элекрододержатель;8 – плазматрон; 9 – источник питания; 10 – кристаллизатор

В **сварочном ЭТО** происходит выделение теплоты в нагреваемых телах в целях осуществления неразъемного соединения с обеспечением непосредственной сплошности в месте сварки. Сварочные ЭТО делятся по виду сварки:

– контактная;

– индукционная;

– электрошлаковая;

– дуговая;

– лазерная;

– плазменная.

Схемы ручной дуговой сварки показаны на рисунке 3.12, точечной сварки – на рисунке 3.13, стыковой сварки – на рисунке 3.14, шовной двусторонней (а) и односторонней (б) сварки – на рисунке 3.15.

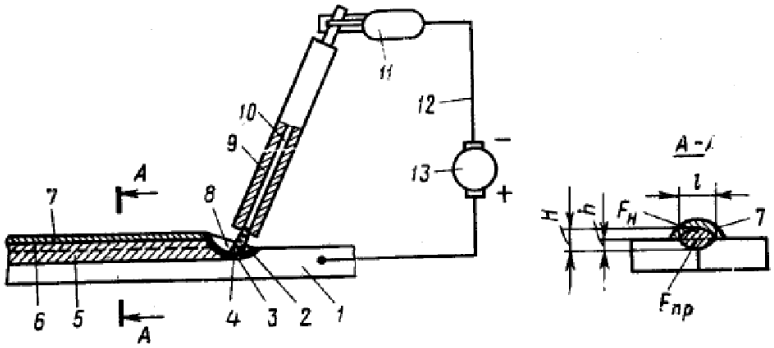


Рисунок 3.12 – Схема ручной дуговой сварки:

1 – основной металл; 2 – сварочная линия; 3 – кратер; 4 – сварочная дуга; 5 – приправленный металл $F_{пр}$; 6 – наплавленный металл $F_н$;7 – шлаковая корка;8 – жидкий шлак; 9 – покрытие электрода; 10 – стержень электрода;11 – элекрододержатель; 12 – сварочная цепь; 13 – источник питания

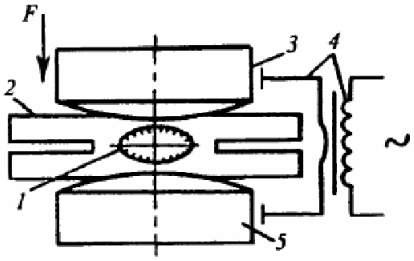


Рисунок 3.13 – Схема точечной сварки:

1 – литое ядро; 2 – свариваемые детали; 3 – верхний электрод; 4 – трансформатор; 5 – нижний электрод

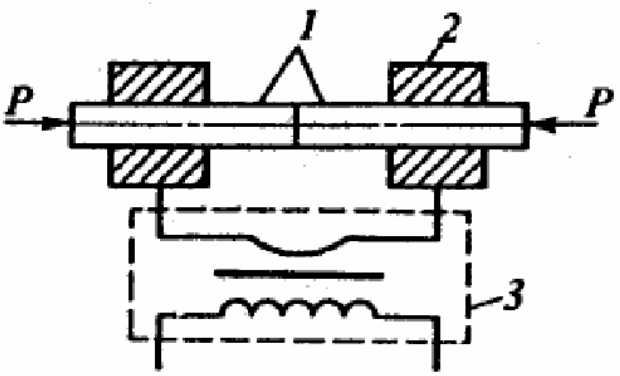
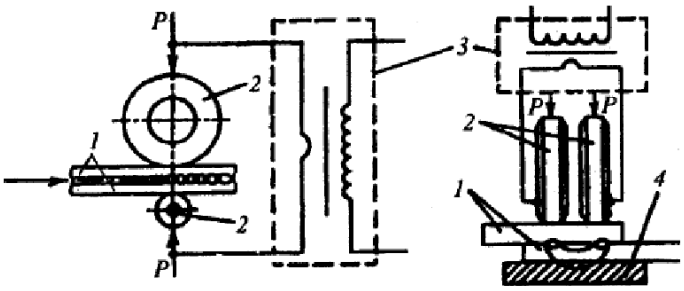


Рисунок 3.14 – Схема стыковой сварки:
1 – детали; 2 – зажимные губки; 3 – сварочный трансформатор



а) б)

Рисунок 3.15 – Схема шовной двусторонней (а) и односторонней (б) сварки: 1 – свариваемые детали; 2 – сварочные ролики; 3 - сварочный трансформатор; 4 - медная прокладка

Электротермические установки применяются в промышленности для термообработки металлов под пластическую деформацию, закалку, плавления, нагрева диэлектриков; в сельском хозяйстве для обогрева помещений различного технологического назначения; в быту (бытовые нагревательные приборы).

Применение электрической энергии для нагрева имеет ряд достоинств

– существенное снижение загрязнения окружающей среды;

– получение строго заданных значений температур, в том числе и превосходящих уровни, достигаемые при сжигании любых видов топлива;

– создание сосредоточенных интенсивных тепловых потоков;

– достижение заданных полей температур в нагреваемом пространстве;

- строгий контроль и точное регулирование длительности выделения энергии;

– гибкость в управлении потоками энергии;

– возможность нагрева материалов изделий в газовых средах любого химического состава и вакууме;

– выделение тепловой энергии непосредственно в нагреваемом веществе.

Использование электронагрева вместо пламенного в некоторых технологических процессах позволяет получить большую экономию топлива и сократить количество обслуживающего персонала. Внедрение электротермии также обеспечивает экономию материальных и трудовых

ресурсов, что в конечном результате приводит к повышению экономической эффективности.

Контрольные вопросы по лекции

1. Как подразделяются электротермические установки по способу превращения электрической энергии в тепловую?

2. На чем основаны дилатометрические методы измерения температуры? Какова область их применения?

3. Как используются термосопротивления для измерения температуры?

4. Каков принцип действия термопары? Назовите материалы широко применяемых термопар.

5. Вычертите схемы измерения температуры с использованием термопар.

6. Каково назначение мостов компенсации температуры свободных концов термопар? Вычертите схему моста компенсации и объясните его принцип действия.

7. Каково назначение пирометров излучения? В каких случаях используются оптические пирометры, а в каких радиационные?

8. Каков принцип действия оптического пирометра с исчезающей нитью и фотоэлектрического пирометра?

9. Каковы физические основы принципа действия индукционных печей? В чем их отличия от печей сопротивления?

10. В чем отличие индукционного сквозного нагрева от высокочастотного диэлектрического?

11. От чего зависит глубина нагрева деталей в индукционных установках?

12. Каков принцип действия дуговых электрических печей?

13. Область применения вакуумных печей электрошлакового переплава.

14. Какова температура электрической дуги в руднотермической печи и плазменной дуговой установке?

15. Как устроен плазмотрон?

16. Какими параметрами характеризуются источники питания электротермических установок и каковы их величины?

Тема №4. Электрическая сварка

История развития электрической сварки

1802 год — В. В. Петров открыл явление вольтовой электрической дуги и указал, что появляющийся «белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медлительнее загораются, и от которого тёмный покой довольно ясно освещён быть может».

1803 год — В. В. Петров опубликовал книгу «Известия о гальвани-вольтовых опытах…», где описал способы изготовления вольтова столба, явление электрической дуги и возможность её применения для электроосвещения, электросварки и электропайки металлов.

1882 год — Н. Н. Бенардос изобрёл электрическую сварку с применением угольных электродов, которую запатентовал в Германии, Франции, России, Италии, Англии, США и других странах, назвав свой метод «электрогефестом».

1888 год — Н. Г. Славянов впервые в мире применил на практике дуговую сварку металлическим (плавящимся) электродом под слоем флюса. В присутствии государственной комиссии он сварил коленчатый вал паровой машины.

1893 год — На Всемирной выставке в Чикаго Н. Г. Славянов получил золотую медаль за способ электросварки под слоем толчёного стекла.

1905 год — В. Ф. Миткевич впервые в мире предложил применять трёхфазную дугу для сварки металлов.

1932 год — К. К. Хреновым впервые в мире в Советском Союзе осуществлена дуговая сварка под водой. 1939 год — Е. О. Патоном разработаны технология автоматической сварки

под флюсомсварочные флюсы и головки для автоматической сварки, электросварные башни танков, электросварной мост.

Электрическая **контактная сварка** – процесс образования неразъемного соединения металлов путем их нагрева проходящим электрическим током и пластической деформации зоны соединения усилием сжатия. Большую роль при контактной сварке играет электрическое сопротивление зоны соединения (например, от него зависит количество теплоты) и дает ей второе название – электрическая сварка сопротивлением.

Общепринятые обозначения

ERW – Electric Resistance Welding – электрическая сварка сопротивлением

Сущность процесса

Контактная сварка представляет собой термомеханический (комбинированный) способ сварки, при котором для получения неразъемного соединения деталей используются два физических процесса – нагрев проходящим током и давление. Согласно закону Джоуля – Ленца, количество теплоты, выделяющейся в проводнике (свариваемом металле) при прохождении через него электрического тока I за промежуток времени t:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t,$$

где R – сопротивление на пути электрического тока.

Используемая при сварке теплота выделяется при прохождении тока в свариваемых заготовках, контактах (зоне соединения) между ними, а также в контактах заготовок с электродами. Как показывает приведенная выше формула, эффективный нагрев области сварки обеспечивается прежде всего при больших величинах протекающего тока (до тысяч и десятков тысяч ампер). Наибольший нагрев происходит в контакте между деталями из-за его более высокого сопротивления, а также в прилегающей к контакту зоне металла. В процессе сварки и соединения изделий в одно целое сопротивление контакта уменьшается.

При правильно протекающем процессе нагрев поверхностей заготовок, прилегающих к электродам, незначителен, поскольку контакты между ними имеют относительно небольшое сопротивление из-за высокой электрической

проводимости и мягкости электродного металла, а сами электроды охлаждаются водой.

Виды контактной сварки

Основные виды контактной сварки в зависимости от формы сварного соединения:

– точечная сварка – одноточечная, двухточечная, многоточечная;

– рельефная сварка;

– шовная сварка – непрерывная, прерывистая, шаговая;

– стыковая сварка – сопротивлением и оплавлением;

– шовно-стыковая сварка;

– рельефно-точечная сварка;

– контактная сварка по методу Игнатьева.

Преимущества

Контактная сварка широко распространена в промышленном производстве благодаря следующим преимуществам:

– высокая производительность за счет применения большой электрической мощности (время сварки одного стыка или точки составляет до 0,02–1 с);

– высокое и стабильное качество сварных соединений;

– низкие требования к квалификации сварщика;

– широкие возможности механизации и автоматизации процесса (машины контактной сварки или их сварочные части могут сравнительно легко встраиваться в поточные сборочно-сварочные линии);

– низкий расход вспомогательных материалов (воздуха, воды), отсутствие потребности в расходных сварочных материалах (газах, присадочной проволоке, флюсе и т. п.);

– высокая экологичность процесса.

К электроду и свариваемому изделию для образования и поддержания электрической дуги от трансформатора подводится электроэнергия. Под действием теплоты электрической дуги (до 7000°С) кромки свариваемых деталей и электродный металл расплавляются, образуя сварочную ванну, которая некоторое время находится в расплавленном состоянии. В сварочной ванне металл электрода

смешивается с расплавленным металлом изделия (основным металлом), а расплавленный шлак всплывает на поверхность, образуя защитную плёнку. При затвердевании металла образуется сварное соединение. Энергия, необходимая для образования и поддержания электрической дуги, получается от специальных источников питания постоянного или переменного тока.

В процессе электросварки могут быть использованы плавящиеся и неплавящиеся электроды. В первом случае формирование сварного шва происходит при расплавлении самого электрода, во втором случае — при расплавлении присадочной проволоки (прутков и т. п.), которую вводят непосредственно в сварочную ванну.

Для защиты от окисления металла сварного шва применяются защитные газы (аргон, гелий, углекислый газ и их смеси), подающиеся из сварочной головки в процессе электросварки.

Для повышения устойчивости электрической дуги в электроды могут вводиться легко ионизируемые элементы (калий, натрий, кальций)[3]..

Различают электросварку переменным током и электросварку постоянным током. При сварке постоянным током шов получается с меньшим количеством брызг металла, поскольку нет перехода через ноль и смены полярности тока.

В аппаратах для электросварки постоянным током применяются выпрямители.

Классификация дуговой сварки производится в зависимости от степени механизации процесса, рода тока и полярности, типа сварочной дуги, свойств сварочного электрода, вида защиты зоны сварки от атмосферного воздуха и др.

По степени механизации различают:

– ручную дуговую сварку;

– полуавтоматическую дуговую сварку;

– автоматическую дуговую сварку.

Отнесение процессов к тому или иному способу зависит от того, как выполняются зажигание и поддержание определённой длины дуги, манипуляция электродом для придания шву нужной формы, перемещение электрода по линии наложения шва и прекращения процесса сварки.

При ручной дуговой сварке (MMA -Manual Metal Arc) указанные операции, необходимые для образования шва, выполняются человеком вручную без применения механизмов.

При полуавтоматической дуговой сварке (MIG/MAG -Metal Inert/Active Gas) плавящимся электродом механизируются операции по подаче электродной проволоки в сварочную зону, а остальные операции процесса сварки осуществляются вручную.

При автоматической дуговой сварке под флюсом механизируются операции по возбуждению дуги, поддержанию определённой длины дуги, перемещению дуги по линии наложения шва. Автоматическая сварка плавящимся электродом ведётся сварочной проволокой диаметром 1-6 мм; при этом режим сварки (ток, напряжение, скорость перемещения дуги и др.) более стабилен, что обеспечивает однородность качества шва по его длине, в то же время требуется большая точность в подготовке и сборке деталей под сварку.

По роду тока различают:

– электрическая дуга, питаемая постоянным током прямой полярности (минус на электроде);

– электрическая дуга, питаемая постоянным током обратной полярности (плюс на электроде);

– электрическая дуга, питаемая переменным током.

По типу дуги различают:

– дугу прямого действия (зависимую дугу);

– дугу косвенного действия (независимую дугу).

В первом случае дуга горит между электродом и основным металлом, который также является частью сварочной цепи, и для сварки используется теплота, выделяемая в столбе дуги и на электродах; во втором — дуга горит между двумя электродами.

По свойствам сварочного электрода различают:

– способы сварки плавящимся электродом;

– способы сварки неплавящимся электродом (угольным, графитовым и вольфрамовым).

Сварка плавящимся электродом является самым распространённым способом сварки; при этом дуга горит между основным металлом и

металлическим стержнем, подаваемым в зону сварки по мере плавления. Этот вид сварки можно производить одним или несколькими электродами. Если два электрода подсоединены к одному полюсу источника питания дуги, то такой метод называют двухэлектродной сваркой, а если больше — многоэлектродной сваркой пучком электродов. Если каждый из электродов получает независимое питание — сварку называют двухдуговой (многодуговой) сваркой. При дуговой сварке плавлением КПД дуги достигает 0,7-0,9.

По условиям наблюдения за процессом горения дуги различают:

– открытую;

– закрытую;

– полуоткрытую дугу.

При открытой дуге визуальное наблюдение за процессом горения дуги производится через специальные защитные стёкла – светофильтры. *Открытая дуга* применяется при многих способах сварки: при ручной сварке металлическим и угольным электродом и сварке в защитных газах. *Закрытая дуга* располагается полностью в расплавленном флюсе – шлаке, основном металле и под гранулированным флюсом, и она невидима. *Полуоткрытая дуга* характерна тем, что одна её часть находится в основном металле и расплавленном флюсе, а другая над ним. Наблюдение за процессом производится через светофильтры. Используется при автоматической сварке алюминия по флюсу.

По роду **защиты зоны сварки от окружающего воздуха** различают:

–дуговая сварка без защиты (голым электродом, электродом со стабилизирующим покрытием);

– дуговая сварка со шлаковой защитой (толстопокрытыми электродами, под флюсом);

– дуговая сварка со шлакогазовой защитой (толстопокрытыми электродами);

– дуговая сварка с газовой защитой (в среде защитных газов) (MIG-MAG);

– дуговая сварка с комбинированной защитой (газовая среда и покрытие или флюс).

Стабилизирующие покрытия представляют собой материалы, содержащие элементы, легко ионизирующие сварочную дугу. Наносятся тонким

слоем на стержни электродов (тонкопокрытые электроды), предназначенных для ручной дуговой сварки.

Защитные покрытия представляют собой механическую смесь различных материалов, предназначенных ограждать расплавленный металл от воздействия воздуха, стабилизировать горение дуги, легировать и рафинировать металл шва.

Наибольшее применение имеют средне – и толстопокрытые сварочные электроды, предназначенные для ручной дуговой сварки и наплавки, изготовляемые в специальных цехах или на заводах.

В последнее время получает распространение плазменная сварка, где дуга между инертными неплавящимися электродами используется для высокотемпературного нагрева промежуточного носителя, например –водяного пара. Известна также сварка атомарным водородом, получаемым в дуге между вольфрамовыми электродами, и выделяющем тепло при рекомбинации в молекулы на свариваемых деталях.

Применение ручной дуговой сварки

Ручная дуговая сварка покрытым электродом - универсальный технологический процесс, пригодный для сварки черных и цветных металлов и различных сплавов практически любой толщины (от 1 до 200 и более миллиметров), но все же обычно диапазон толщин находится в пределах от 3 до 20 мм. Сварку можно выполнять во всех пространственных положениях и в условиях монтажа. Ручную дуговую сварку покрытыми электродами рационально применять для коротких швов, расположенных в различных пространственных положениях и при мелкосерийном производстве. На монтаже применение этого способа сварки оправдано при небольшом объеме работ. Ручная дуговая сварка покрытыми электродами рациональна для выполнения прихваток при сборке конструкций под сварку и при исправлении дефектных участков шва небольшой протяженности.

Физическая сущность процесса сварки

Расплавляющийся металлический стержень электрода в виде отдельных капель, покрытых шлаком, переходит в сварочную ванну. В сварочной ванне

электродный металл смешивается с расплавленным металлом изделия (основным металлом), а расплавленный шлак всплывает на поверхность. Глубина, на которую расплавляется основной металл, называется глубиной проплавления. Она зависит от режима сварки (силы сварочного тока и диаметра электрода), пространственного положения сварки, скорости перемещения дуги по поверхности изделия (торцу электрода и дуге сообщают поступательное движение вдоль направления сварки и поперечные колебания), от конструкции сварного соединения, формы и размеров разделки свариваемых кромок и т.п.

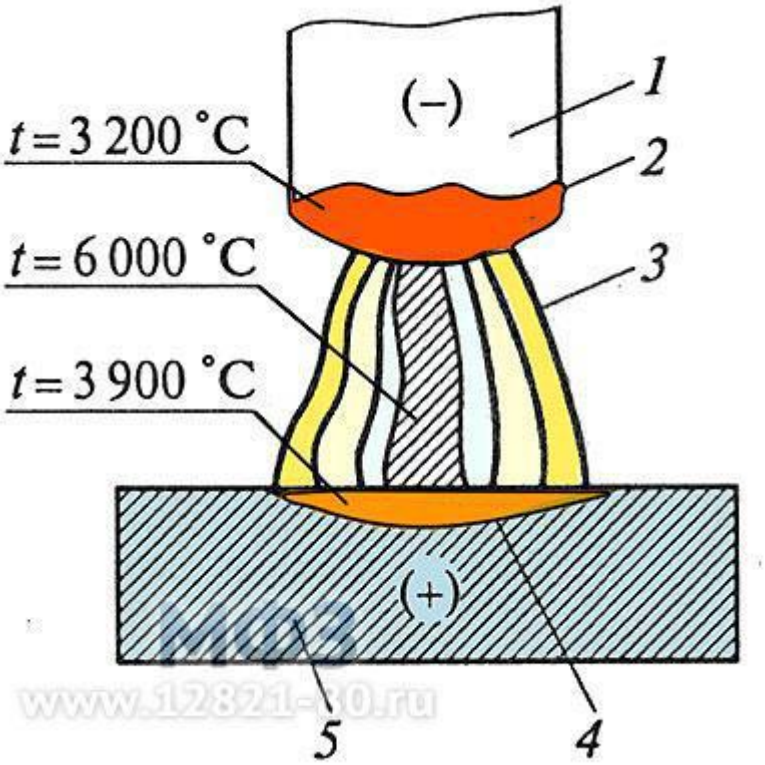


Рисунок 4.1 – Процесс электродуговой сварки: 1 – электрод; 2 – катодное пятно; 3 – дуга; 4 – анодное пятно; 5 – заготовка

Электрическая сварочная дуга – мощный временной электрический разряд между проводниками в ионизированной атмосфере газов и паров металла, который сопровождается выделением большого количества теплоты и света.

Сварочная дуга на постоянном токе (рисунок 4.1) включает катодное пятно 2, которое образуется на электроде 1, столб 3 дуги и анодное пятно 4 на изделии (анод, "+"). При изменении полярности изделие становится катодом, а

электрод – анодом. Для дуги переменного тока характерно постоянное периодическое изменение полярности с частотой переменного тока.

Для появления и горения дуги необходимо наличие в промежутке между электродом и изделием заряженных ионов, которые в воздухе обычного состояния отсутствуют. Ионная проводимость воздуха появляется при контакте электрода с изделием. Электрическая цепь при этом замыкается и из-за короткого замыкания происходит разогрев электрода. После отведения электрода на некоторое расстояние от поверхности изделия начинается термоэлектрическая эмиссия электронов с поверхности анода. Столкновение разогнанных в электрическом поле электронов с молекулами газов и паров металла приводит к желаемой ионизации промежуточного пространства. При разогреве происходит дополнительная ионизация, в результате возникает стойкий дуговой электрический разряд. Высокая температура и значительная энергия сварочной дуги дают возможность быстро расплавлять небольшие объёмы металла свариваемых деталей. Энергия из сварочной дуги выделяется неравномерно. На аноде («+») выделяется около 43% теплоты вследствие его бомбардировке электронами, имеющими более высокую кинетическую энергию по сравнению с ионами. На катоде («–») выделяется около 36% теплоты. Остальная тепловая энергия рассеивается в окружающем пространстве. Распределение температуры в дуге указано на рисунке 4.1. Обычно с электрода в сварочную ванну в виде капель стекает вплоть до 90% металла электрода, остальной же металл не достигает сварочной ванны в результате окисления, разбрызгивания и испарения.

Устойчивое горение дуги, необходимое для высокого качества сварки, достигается при ее длине 3…5 мм. Длину, на которую проплавляется свариваемый металл, называют глубиной сварки.

Размеры сварочной ванны зависят от режима сварки и обычно находятся в пределах: глубина до 7 мм, ширина 8 –15 мм, длина 10 – 30 мм. Доля участия основного металла в формировании металла шва обычно составляет 15 – 35%. Расстояние от активного пятна на расплавленной поверхности электрода до другого активного пятна дуги на поверхности сварочной ванны называется длиной дуги. Расплавляющееся покрытие электрода образует вокруг дуги и над поверхностью сварочной ванны газовую атмосферу, которая, оттесняя воздух

из зоны сварки, препятствует взаимодействиям его с расплавленным металлом.

Кристаллизация металла сварочной ванны по мере удаления дуги приводит к образованию шва, соединяющего свариваемые детали. При случайных обрывах дуги или при смене электродов кристаллизация металла сварочной ванны приводит к образованию сварочного кратера (углублению в шве, по форме напоминающему наружную поверхность сварочной ванны). Затвердевающий шлак образует на поверхности шва шлаковую корку. В момент зажигания дуги промежуток еще недостаточно нагрет и для его ионизации необходима увеличенная кинетическая энергия, которая может быть получена усилением электрического поля, т. е. некоторым повышением напряжения между электродами сравнительно с тем напряжением, которое требуется для поддержания дуги в установившемся состоянии.

Соединение, полученное в результате сварки характеризуется непрерывной структурной связью и монолитностью строения, достигаемыми за счет образования атомно-молекулярных связей между элементарными частицами соединяемых деталей трубопроводов. Неразъемное монолитное соединение, называется сварным соединением**.**

Процесс образования соединения при сварке происходит в три стадии.

1. На первой стадии достигается физический контакт (между приварным фланцем и стальной трубой), то есть осуществляется сближение соединяемых веществ на расстояния, необходимые для межатомного взаимодействия.

2. На второй стадии происходит химическое взаимодействие, которое заканчивается процессом образования прочного соединения фланца и трубы. Эти две стадии характерны для микроучастков соединяемых веществ.

3. Процесс сварки трубы и фланца завершается диффузией.

Для качественного соединения деталей трубопроводов необходимо обеспечить контакт значительной части стыкуемых поверхностей и их активацию. Активация состоит в том, что поверхностным атомам твердого тела сообщается некоторая кинетическая энергия, необходимая для преодоления связей между ними и повышение энергии поверхностных атомов до уровня *энергетического барьера схватывания*, то есть для перевода их в

активное состояние. Такая энергия может быть сообщена в виде теплоты (термическая активация) и других видов воздействия на соединяемые материалы. Рисунок 4.2 схема сварного соединения при сварке плавлением. При сварке плавлением *образование сварного соединения стального воротникового фланца и плоского фланца со стенкой трубы* (рисунок 4.2) происходит в результате сближения атомов твердых тел (фланец и стальная труба) вследствие смачивания их поверхностей жидким металлом расплавом, а активация поверхности твердого металла – путем сообщения ее частицам тепловой энергии.

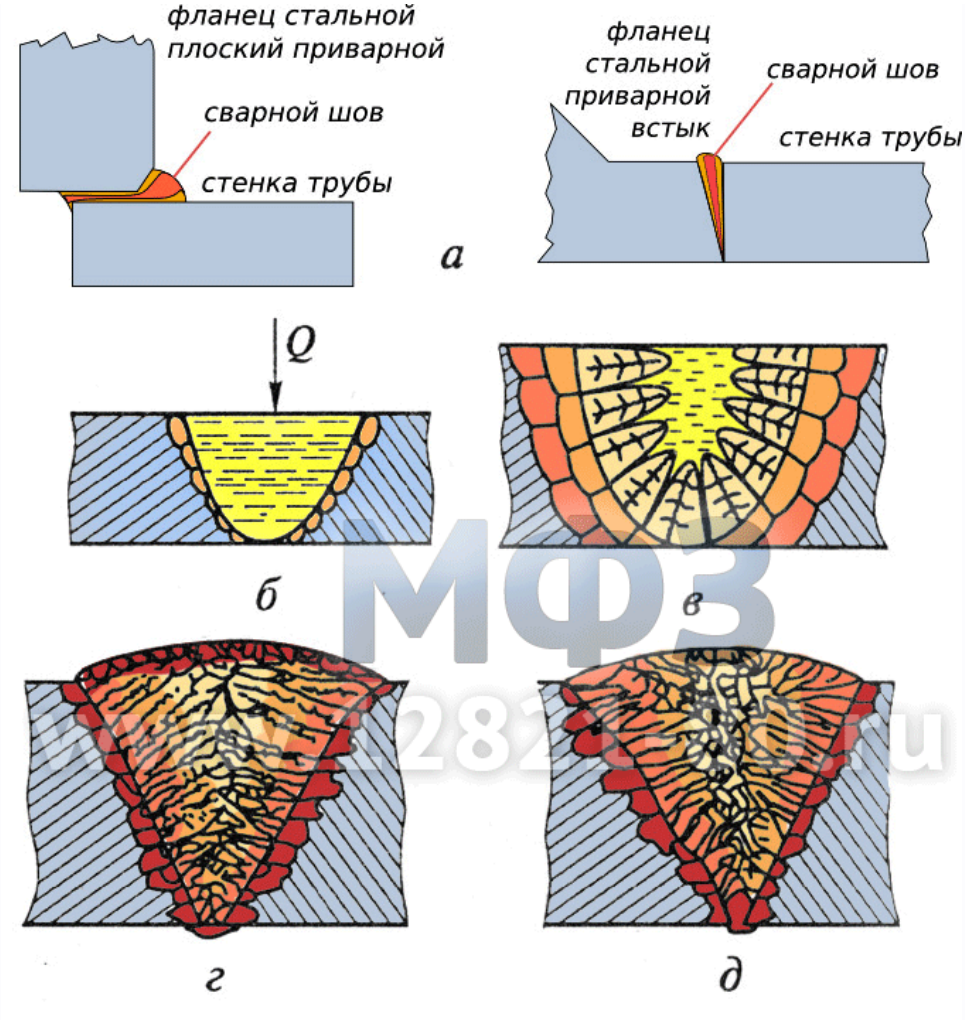


Рисунок 4.2 – Схема сварного соединения при сварке плавлением: *а* – соединяемые детали: слева – соединение плоского фланца с трубой; справа – соединение фланца воротникового (приварного встык) с трубой; *б* – сварочная ванна; *в* – кристаллизация расплава; *г, д* – структуры шва; *Q* – поток тепловой энергии

Металл элементов соединяемых деталей трубопроводов (рисунок 4, *а*) в месте сварки доводится под водимой тепловой энергии *Q* до жидкого состояния. При этом происходит локальное расплавление и основного свариваемого металла деталей трубопроводов по кромкам соединяемых элементов. Сварка может осуществляться за счет расплавления основного металла или основного и дополнительного присадочного металлов. В практике преимущественное применение находит второй вариант. В процессе сварки основной и дополнительный металлы самопроизвольно и без приложения внешних сил сливаются в общую сварочную ванну (рисунок 4.2, *б*), которая смачивает оставшуюся твердую поверхность соединяемых элементов трубопроводов. При этом происходит сближение атомов металла сварочные ванны и основного металла до расстояний, при которых возникают атомно-молекулярные связи.

По мере удаления источника нагрева расплав остывает и происходит кристаллизация (рисунок 4.2, *в*), которая начинается на границе раздела между твердым основным металлом и расплавом сварочной ванны. Зародышевыми центрами кристаллизации являются оплавленные зерна основного металла, на которых, как на своеобразной подложке, начинают расти первичные столбчатые кристаллы сварочного шва. Кристаллы растут по нормали к поверхности охлаждения в глубь жидкой ванны и имеют вид дендритов разной величины.

При сравнительной малой величине сварочной ванны образующиеся столбчатые кристаллы успевают прорасти до встречи друг с другом в области центральной линии сварного шва (рисунок 4.2, *г*). Когда сварочная ванна большая и ее кристаллизация медленная, в центральной части сварного шва появляется небольшая зона равноосных кристаллов (рисунок 4.2, *д*).

После завершения кристаллизации сварочной ванны образуется монолитный, имеющий литую структуру шов, соединяющий в единое целое ранее раздельные детали трубопроводов.

Химические процессы

При ручной дуговой сварке электродами с толстым слоем покрытия химические реакции между металлом, шлаком и газами дуги протекают в

момент перехода капель расплавленного металла электрода и покрытия через дуговой промежуток при температуре 2100-2300° С. Дальнейшие химические и физические процессы протекают в сварочной ванне. При сварке под флюсом основные химические реакции происходят только в сварочной ванне под слоем расплавленного флюса.

Рассмотрим основные реакции в зоне сварки для стали, как наиболее распространенного металла, подвергаемого сварке.

Окисление. Кислород является наиболее вредной примесью в зоне сварки, так как окисляет элементы, входящие в состав металла шва, и ухудшает его качество, образуя химические соединения - окислы. Окисление элементов в основном происходит за счет кислорода, содержащегося в газах и шлаках сварочной зоны. В меньшей степени окисление может быть вызвано кислородом поверхностных окислов свариваемого металла (окалины, ржавчины). При случайном увеличении длины дуги капли электродного металла могут окисляться кислородом окружающего воздуха.

С железом кислород образует три окисла:

– закись железа по реакции $2Fe+O_2=2Feo$,

– окись железа по реакции $2Fe+1,5O_2=Fe_2O_3$,

– закись-окись железа по реакции $3Fe+2O_2=Fe_3O_4$.

Раскисление кремнием и марганцем происходит по реакции:

$$FeO + Mn= Fe + MnO.$$

Выгорание углерода при сварке стали протекает по реакциям:

$$Fe_3C+1/2O_2=3Fe+CO ,$$

$$Fe_3C+O_2=3Fe+CO_2 .$$

Выгорание углерода при сварке стали протекает по реакциям:

$$Fe_3C+1/2O_2=3Fe+CO ,$$

$$Fe_3C+O_2=3Fe+CO_2 .$$

Серу удаляют введением марганца, который образует с ней химическое соединение - сернистый марганец (MnS) по реакциям:

$$FeS + Mn = MnS + Fe ,$$

$$FeS + MnO = MnS + FeO .$$

Удалению серы способствует также окись кальция; при этом происходитреакция: $FeS + CaO = FeO + CaS.$

Контрольные вопросы к лекции

1. Какова температура электрической дуги при стальных и угольных электродах?

2. При каких минимальных напряжениях постоянного и переменного тока зажигается дуга?

3. Опишите физику процесса зажигания дуги.

4. Что такое статическая и динамическая характеристики дуги?

5. Какими способами поддерживается устойчивое горение дуги?

6. Объясните, какими способами формируются внешние характеристики сварочных генераторов и трансформаторов.

7. Каково назначение осциллятора? Его схема и принцип действия.

8. Вычертите схему подключения сварочного трансформатора к электрической сети.

9. В чем отличие автоматической дуговой сварки от неавтоматической?

10. Каковы физические основы контактной сварки? Виды контактной сварки.

11. Каков принцип действия электромагнитных, тиристорных и модуляторных прерывателей сварочного тока?

12. В чем заключается вредное влияние электросварочных установок на электрическую сеть?

Тема № 5. Электролизные установки

Электрохимия принадлежит к числу тех немногих наук, дата рождения которых может быть установлена с высокой точностью. Это рубеж XVIII и XIX веков, когда благодаря знаменитым опытам итальянского физиолога Л. Гальвани и созданию итальянским физиком А. Вольта в 1799 г. "вольтова столба" - первого в истории человечества химического источника тока - были сформулированы проблемы, решение которых определило основные задачи электрохимии. "Без химии путь к познанию истинной природы электричества закрыт" - сказал М.В. Ломоносов. И, действительно, как бы следуя словам великого ученого, создавалась и развивается наука - электрохимия.

Еще в начале позапрошлого столетия было установлено, что при прохождении электрического тока через водные растворы солей происходят

химические превращения, приводящие к образованию новых веществ. В результате этого, в начале прошлого века возникло научное направление по изучению электрохимических процессов в растворах и расплавах веществ - электрохимия. К концу семидесятых годов оно разделилось на два самостоятельных раздела - ионику, изучающую явления электропроводности и движения заряженных частиц под воздействием электрического поля, и электродику, изучающую явления, происходящие непосредственно на поверхности электродов, когда через границу электрод-раствор (расплав) протекает электрический ток. Химические превращения, происходящие при воздействии электрического тока на вещества, называются электролитическими.

Актуальность электролиза объясняется тем, что многие вещества получают именно этим способом. Например, такие металлы как никель, натрий, чистый водород и другие, получают только с помощью этого метода. Кроме того с его помощью электролиза относительно легко можно получить чистые металлы, массовая доля самого элемента в которых стремиться к ста процентам. В промышленности алюминий и медь в большинстве случаев получают именно электролизом. Преимущество этого способа в относительной дешевизне и простоте. Однако чтобы производство было наиболее выгодным: с наименьшими затратами электроэнергии и с наибольшим выходом продукции, необходимо учитывать различные факторы, влияющие на количество и качество продуктов электролиза (сила тока, плотность тока, температура электролита, материал электродов и др.).

Таким образом, исследование электрохимических процессов, определение факторов, влияющих на них, установление новых способов использования процессов электролиза в промышленных условиях сохранило свою актуальность и востребованность в наши дни.

Понятие и сущность электролиза

Электролизом называется окислительно-восстановительный процесс, происходящий на электродах под действием электрического тока, подаваемого от внешнего источника. При электролизе происходит превращение

электрической энергии в химическую. Ячейка для электролиза называется электролизером, она состоит из двух электродов и электролита (раствор или расплав). Электрод, на котором идет реакция восстановления (катод), у электролизера подключен к отрицательному полюсу внешнего источника тока. Электрод, на котором протекает реакция окисления (анод), подключен к положительному полюсу источника тока.

На характер и течение электродных процессов большое влияние оказывают состав электролита, растворитель, материал электродов и режим электролиза (напряжение, плотность тока, температура и др.)

Катодные процессы. Так как на катоде идет реакция восстановления, т. е. прием электронов окислителем, то в первую очередь должны реагировать наиболее сильные окислители. На катоде, прежде всего, протекает реакция с наиболее положительным потенциалом. Для катодного восстановления при электролизе водного раствора электролита все окислители можно разделить на три группы.

Ионы металлов, потенциал которых более отрицателен, чем потенциал водородного электрода. К ним относятся ионы металлов, стоящих в ряду напряжений до алюминия включительно. В водных растворах разряд этих ионов на катоде практически не происходит, вместо них выделяется водород:

$2H_2O + 2e = H_2 + 2OH^-$ ($2H^+ + 2e = H_2$).

Металлы могут быть получены электролизом из расплавленных солей, в которых ионы H^+ отсутствуют.

Катионы металлов, потенциал которых более положителен, чем потенциал водородного электрода. Они находятся в ряду напряжений после водорода и при электролизе практически полностью восстанавливаются на катоде:

$Me^{n+} + ne = Me^0$.

Ионы металлов, потенциал которых относительно мало отличается от потенциала водородного электрода. К ним относятся ионы металлов, находящихся в ряду напряжений между алюминием и водородом. При электролизе на катоде они восстанавливаются одновременно с молекулами воды.

Анодные процессы. На аноде протекают реакции окисления восстановителей, т. е. отдача электронов. Поэтому на аноде в первую очередь окисляются вещества, имеющие наиболее отрицательный потенциал.

Характер реакций на аноде зависит также и от материала электрода. Различают нерастворимые и растворимые аноды.

Нерастворимые аноды изготавливают из угля, графита, платины. При электролизе нерастворимые аноды сами не посылают электроны во внешнюю цепь, электроны посылаются в результате окисления анионов и молекул воды. При этом аноны бескислородных кислот при их достаточной концентрации окисляются довольно легко (2Cl - - 2e = Cl2). Если же раствор содержит анионы кислородных кислот (например, SO42-, NO3-, PO43- и др.) то на аноде окисляются не эти ионы, а молекулы воды:

2H2O - 4e = O2 + 4H+.

Растворимые аноды. Электроны во внешнюю цепь посылает сам анод, а не анионы раствора. Растворимые аноды изготавливаются из меди, серебра, цинка, никеля и др. металлов. При электролизе с растворимым анодом идет анодное окисление атомов металла: Me0 - ne = Men+. Некоторые металлы практически не растворяются из-за высокой анодной поляризации, например никель и железо в щелочном растворителе, свинец в серной кислоте.

Законы электролиза Фарадея

Первый закон Фарадея. Количество вещества, выделившегося на каждом из электродов при электролизе, пропорционально заряду, протекшему через электролит:

$$\mathbf{m=k\cdot I\cdot \Delta t.}$$

В 1832 году Фарадей установил, что масса m вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна электрическому заряду q, прошедшему через электролит:

$$\mathbf{q=k\cdot I\cdot t,}$$

Коэффициент пропорциональности k – называется электрохимическим эквивалентом вещества. Он численно равен массе вещества, выделившегося при прохождении через электролит единичного электрического заряда, и зависит от химической природы вещества.

I – ток протекающий через электролит за время Δt.

Второй закон Фарадея. Электрохимический эквивалент всех веществ пропорционален их химическому эквиваленту:

$$k = F \cdot A \cdot z,$$

где A - атомный вес;

z - валентность химического элемента;

F - число Фарадея.

Второй закон Фарадея записывается в следующем виде:

$$m = M \cdot I \cdot \Delta t n \cdot F,$$

где M – молярная масса данного вещества, образовавшегося (однако не обязательно выделившегося – оно могло и вступить в какую – либо реакцию сразу после образования) в результате электролиза, г/моль;

I – сила тока, пропущенного через вещество или смесь веществ (раствор, расплав), А; Δt – время, в течение которого проводился электролиз, с;

F – постоянная Фарадея, Кл·моль$^{-1}$;

n – число участвующих в процессе электронов, которое при достаточно больших значениях силы тока равно абсолютной величине заряда иона (и его противоиона), принявшего непосредственное участие в электролизе (окисленного или восстановленного). Однако это не всегда так; например, при электролизе раствора соли меди(II) может образовываться не только свободная медь, но и ионы меди(I) (при небольшой силе тока).

Выделение вещества на электродах начинается лишь с некоторого напряжения, называемого пороговым напряжением разложения электролита U_p. Начиная с этого напряжения, в электролите появляется ток, плотность которого подчиняется закону Ома.

Подвижность ионов зависит от их природы и свойств растворителя. С повышением температуры подвижность ионов возрастает. В электролитах подвижность ионов очень мала. Так, для водных растворов при комнатной температуре она составляет 10^{-8}-10^{-7} (для сравнения, подвижность электронов в металлах ~10^{-4}).

Законы Фарадея справедливы как для растворов, так и для расплавов и применимы к обоим электродам. Количество электричества, необходимое для

образования 1 экв. любого вещества, одинаково для всех веществ; оно равно 96 485 Кл и называется числом Фарадея или постоянной Фарадея (фундаментальная физическая константа). Эта закономерность широко применяется на практике. Исходя из количества затраченного электричества, можно рассчитать массу или толщину металлического покрытия, образующегося при гальваностегии, и наоборот, задав толщину покрытия, можно оценить, какое количество электричества для этого потребуется. Законы Фарадея лежат в основе работы вольтметра и приборов, предназначенных для измерения силы постоянного тока.

Применение электролиза

Получение целевых продуктов путем электролиза позволяет сравнительно просто (регулируя силу тока) управлять скоростью и направленностью процесса, благодаря чему можно осуществлять процессы как в самых "мягких", так и в предельно «жестких» условиях окисления или восстановления, получая сильнейшие окислители и восстановители. Путем электролиза производят H_2 и O_2 из воды, Cl_2 из водных растворов NaCl, F_2 из расплава KF в KH_2F_3.

Гидроэлектрометаллургия – важная отрасль металлургии цветных металлов (Cu, Bi, Sb, Sn, Pb, Ni, Co, Cd, Zn); она применяется также для получения благородных и рассеянных металлов, Mn, Cr. Электролиз используют непосредственно для катодного выделения металла после того, как он переведен из руды в раствор, а раствор подвергнут очистке. Такой процесс называется электроэкстракцией. Электролиз применяют также для очистки металла - электролитического рафинирования (электрорафинирование). Этот процесс состоит в анодном растворении загрязненного металла и в последующем его катодном осаждении. Рафинирование и электроэкстракцию проводят с жидкими электродами из ртути и амальгам (амальгамная металлургия) и с электродами из твердых металлов.

Электролиз расплавов электролитов – важный способ производства многих металлов. Так, например, алюминий-сырец получают электролизом криолит-глиноземного расплава (Na_3AlF_6 + Al_2O_3), очистку сырца осуществляют электролитическим рафинированием. При этом анодом служит

расплав Al, содержащий до 35% Cu (для утяжеления) и потому находящийся на дне ванны электролизера. Средний жидкий слой ванны содержит BaCl2, AlF3 и NaF, а верхний - расплавленный рафинированный Al и служит катодом.

Электролиз расплава хлорида магния или обезвоженного карналлита - наиболее распространенный способ получения Mg. В промышленном масштабе электролиз расплавов используют для получения щелочных и щелочно-земельных металлов, Be, Ti, W, Mo, Zr, U и др.

К электролитическим способам получения металлов относят также восстановление ионов металла другим, более электроотрицательным металлом. Выделение металлов восстановлением их водородом также часто включает стадии электролиза - электрохимическую ионизацию водорода и осаждение ионов металла за счет освобождающихся при этом электронов. Важную роль играют процессы совместного выделения или растворения нескольких металлов, совместного выделения металлов и молекулярного водорода на катоде и адсорбции компонентов раствора на электродах. Электролиз используют для приготовления металлических порошков с заданными свойствами.

Другие важнейшие применения электролиза - гальванотехника, электросинтез, электрохимическая обработка металлов, защита от коррозии.

Электролизеры. Конструкция промышленных аппаратов для проведения электролитических процессов определяется характером процесса. В гидрометаллургии и гальванотехнике используют преимущественно так называемые ящичные электролизеры, представляющие собой открытую емкость с электролитом, в которой размещают чередующиеся катоды и аноды, соединенные соответственно с отрицательными и положительными полюсами источника постоянного тока. Для изготовления анодов применяют графит, углеграфитовые материалы, платину, оксиды железа, свинца, никеля, свинец и его сплавы; используют малоизнашивающиеся титановые аноды с активным покрытием из смеси оксидов рутения и титана (оксидные рутениево-титановые аноды, или ОРТА), а также из платины и ее сплавов. Для катодов в большинстве электролизеров применяют сталь, в т.ч. с различными защитными покрытиями с учетом агрессивности электролита и продуктов электролиза, температуры и др. условий процесса. Некоторые электролизеры работают в

условиях высоких давлений, например, разложение воды ведется под давлением до 4 МПа; разрабатываются электролизеры и для более высоких давлений. В современных электролизерах широко применяют пластические массы, стекло и стеклопластики, керамику.

Во многих электрохимических производствах требуется разделение катодного и анодного пространств, которое осуществляют с помощью диафрагм, проницаемых для ионов, но затрудняющих механическое смешение и диффузию. При этом достигается разделение жидких и газообразных продуктов, образующихся на электродах или в объеме раствора, предотвращается участие исходных, промежуточных и конечных продуктов электролиза в реакциях на электроде противоположного знака и в приэлектродном пространстве. В пористых диафрагмах через микропоры переносятся как катионы, так и анионы в количествах, соответствующих числам переноса. В ионообменных диафрагмах (мембранах) происходит перенос либо только катионов, либо анионов, в зависимости от природы входящих в их состав ионогенных групп. При синтезе сильных окислителей используют обычно без-диафрагменные электролизеры, но в раствор электролита добавляют $K_2Cr_2O_7$. В процессе электролиза на катоде образуется пористая хромит-хроматная пленка, выполняющая функции диафрагмы. При получении хлора используют катод в виде стальной сетки, на которую наносят слой асбеста, играющий роль диафрагмы. В процессе электролиза рассол подают в анодную камеру, а из анодной камеры выводят раствор NaOH.

Электролизер, применяемый для получения магния, алюминия, щелочных и щелочно-земельных металлов, представляет собой футерованную огнеупорным материалом ванну, на дне которой находится расплавленный металл, служащий катодом, аноды же в виде блоков располагают над слоем жидкого металла. В процессах мембранного получения хлора, в электросинтезе используют электролизеры фильтр-прессного типа, собранные из отдельных рам, между которыми помещены ионообменные мембраны.

По характеру подключения к источнику питания различают монополярные и биполярные электролизеры. Монополярный электролизер состоит из одной электролитической ячейки с электродами одной полярности, каждый из которых может состоять из нескольких элементов, включенных

параллельно в цепь тока. Биполярный электролизер имеет большое число ячеек (до 100-160), включенных последовательно в цепь тока, причем каждый электрод, за исключением двух крайних, работает одной стороной как катод, а другой как анод. Монополярные электролизеры обычно рассчитаны на большой ток и малые напряжения, биполярные - на сравнительно небольшой ток и высокие напряжения. Современные электролизеры допускают высокую токовую нагрузку: монополярные до 400-500 кА, биполярные - эквивалентную 1600 кА.

Контрольные вопросы к лекции

1. Каковы физические процессы имеют место при прохождении тока через электролит? Как используются эти процессы в практике электротехнологии?
2. Какими параметрами характеризуются физические и химические процессы при прохождении тока через электролиты?
3. Приведите примеры применения электролизных установок.
4. Вычертите схемы источников питания и элементов сети электролизных установок.
5. Как осуществляется регулирование напряжения полупроводниковых выпрямительных агрегатов?
6. Каково воздействие полупроводниковых преобразователей на питающую электрическую сеть? Как уменьшить это воздействие?

Тема № 6. Электроэрозийные установки

История развития электроэрозионной обработки

В 1938 году советский инженер Л. А. Юткин показал, что серия электроискровых разрядов порождает формообразующие гидравлические удары, что положило начало электроискровой штамповке металлов, и стало следующим, после электродуговой сварки, шагом по развитию технологических методов формообразования электрическими разрядами.

В 1943 году советские учёные – супруги Борис Романович Лазаренко и Наталия Иосифовна Лазаренко, предложили использовать электроэрозионные свойства разрядов в воздушном промежутке для формообразования (электроискровой метод электроэрозионной обработки)[2].

На изобретение было получено авторское свидетельство № 70010 от 3.04.1943 года, патент Франции № 525414 от 18.06.1946 года, патент Великобритании № 285822 от 24.09.1946 года, патент США № 6992718 от 23.08.1946 года (указанный патент имеет совсем иную дату и тему[3]), патент Швейцарии № 8177 от 14.07.1946 года, патент Швеции № 9992/46 от 1.11.1946 года[4]. В 1946 году им была присуждена Сталинская премия, а 26 июня 1949 года Борису Романовичу Лазаренко была присуждена ученая степень доктора технических наук.

В 1948 году советский специалист М. М. Писаревский предложил более экономичный электроимпульсный метод обработки.

В 1969 году швейцарская фирма Agie представила первый станок электроимпульсной обработки непрофилированным электродом с ЧПУ.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) – контролируемое разрушение электропроводного материала под действием электрических разрядов между двумя электродами, то есть обработка через электрическую эрозию. Один из электродов является обрабатываемой деталью, другой – электрод – инструментом. Разряды производятся периодически, импульсно, так чтобы среда между электродами восстановила свою электрическую прочность. Для уменьшения эрозии электрод – инструмента для разрядов используются униполярные импульсы тока. Полярность зависит от длительности импульса, поскольку при малой продолжительности импульса преобладает эрозия анода, а при большой длительности импульса преобладает эрозия катода. Поэтому на практике используются оба способа подачи униполярных импульсов: с подключением детали к положительному полюсу генератора импульсов (т. н. включение на прямую полярность), и с подключением детали к отрицательному полюсу (т. н. включение на обратную полярность). На рисунке 6.1 показан процесс электроэрозийной обработки ЭЭО профилированной полости. Включение на обратную полярность.

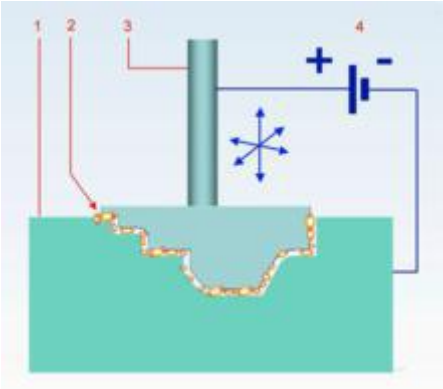


Рисунок 6.1 – Процесс электроэрозийной обработки: 1 – обрабатываемая деталь, 2 – разряды в зазоре, 3 – электрод-инструмент, 4 – генератор униполярных импульсов

На рисунке 6.2 представлен станок по электроэрозийной обработке обработке.

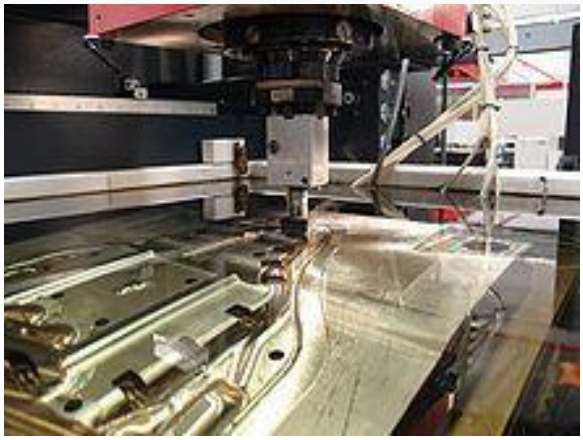


Рисунок 6.2 – Электроэрозийный станок. Обрабатываемая деталь погружена в жидкость

Характеристики электрического разряда при ЭЭО

Электрический разряд между электродами идёт в несколько этапов: сначала происходит электрический пробой, который может сопровождаться искровыми разрядами; затем устанавливается дуговой разряд. Поэтому многие генераторы способны выдавать многоступенчатую форму импульса. Частота импульсов и их длительность выбирается исходя из технологических требований к обрабатываемой поверхности. Длительность импульса обычно лежит в диапазоне 0,1 .. 10^{-7} секунды, частота от 5 кГц до 0,5 МГц. Чем меньше длительность импульса, тем меньше шероховатость получаемой поверхности.

Средний ток во время ЭЭО зависит от площади обрабатываемой поверхности. При площади 3600 мм² оптимальный ток приблизительно равен 100 А.

Рабочая среда

Рабочие жидкости (РЖ) должны удовлетворять следующим требованиям:

– обеспечение высоких технологических показателей ЭЭО;

– термическая стабильность физико-химических свойств при воздействии электрических разрядов с параметрами, соответствующими применяемым при электроэрозионной обработке;

– низкая коррозионная активность к материалам ЭИ и обрабатываемой заготовки;

– высокая температура вспышки и низкая испаряемость;

– хорошая фильтруемость;

– отсутствие запаха и низкая токсичность.

При электроэрозионной обработке применение получили низкомолекулярные углеводородистые жидкости различной вязкости; вода и в незначительной степени кремнийорганические жидкости, а также водные растворы двухатомных спиртов. Для каждого вида ЭЭО применяют рабочие жидкости, обеспечивающие оптимальный режим обработки. На черновых режимах рекомендуется применять рабочие жидкости с вязкостью $(5 \div 6) \cdot 10^{-4} м^2/с$ (смесь керосин масло индустриальное), а на чистовых $(0{,}03 \div 3) \cdot 10^{-4} м^2/с$ (керосин, сырье углеводородное).

Электроды-инструменты

Электроды – инструменты (ЭИ) должны обеспечивать стабильную работу во всем диапазоне рабочих режимов ЭЭО и максимальную производительность при малом износе. Электроды-инструменты должен быть достаточно жестким и противостоять различным условиям механической деформации (усилиям прокачки РЖ) и температурным деформациям. На поверхности ЭИ не должно быть вмятин, трещин, царапин и расслоения. Поверхность ЭИ должна иметь шероховатость $R_a = 2{,}5 \div 0{,}63 мкм$.

При обработке углеродистых, инструментальных сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе используют графитовые и медные ЭИ. Для черновой ЭЭО заготовок из этих материалов применяются ЭИ из алюминиевых сплавов и чугуна, а при обработке отверстий — ЭИ из латуни. При обработке твердых сплавов и тугоплавких материалов на основе вольфрама, молибдена и ряда других материалов широко применяют ЭИ из композиционных материалов, так как при использовании графитовых ЭИ не обеспечивается высокая производительность из-за низкой стабильности электроэрозионного процесса, а ЭИ из меди имеют большой износ, достигающий десятка процентов, и высокую стоимость. Износ ЭИ зависит от материала, из которого он изготовлен, от параметров рабочего импульса, свойств РЖ, площади обрабатываемой поверхности, а также от наличия вибрации.

На выбор материала и конструкции ЭИ существенное влияние оказывают материал заготовки, площадь обрабатываемой поверхности, сложность ее формы, требования к точности и серийности изделия.

Сущность и назначение электроэрозионной обработки

Электроэрозия – это разрушение поверхности изделия под действием электрического разряда. Основателями технологии являются советские ученые-технологи Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) широко применяется для изменения размеров металлических изделий – для получения отверстий различной формы, фасонных полостей, профильных канавок и пазов в деталях из твердых сплавов, для упрочнения инструмента, для электропечатания, шлифования, резки и др. Схема электроэрозионной обработки материалов приведена на рисунке 6.3. Схема запитывается импульсным напряжением разной полярности, что соответствует электроискровому режиму (1р) и электроимпульсному режиму (2р).

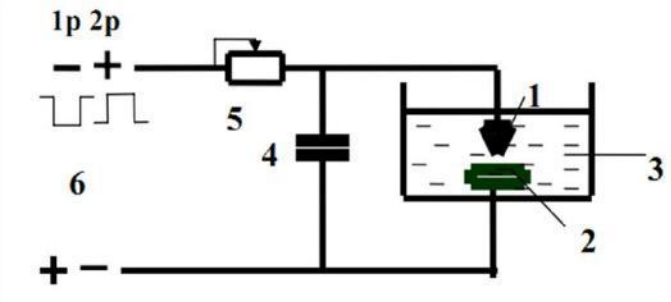


Рисунок 6.3 – Схема электроэрозионной обработки материалов: 1 – электрод – инструмент, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – среда, в которой производится разряд, 4 – конденсатор, 5 – реостат, 6 – источник питания, 1р – режим электроискровой обработки, 2р – режим электроимпульсной обработки

Напряжение питания заряжает конденсатор (4), параллельно которому включен разрядный промежуток между электродом-инструментом (1) и обрабатываемой деталью (2), которые помещены в жидкость с низкой диэлектрической проницаемостью. Когда напряжение на конденсаторе превысит потенциал зажигания разряда, происходит пробой жидкости. Жидкость нагревается до температуры кипения и образуется газовый пузырь из паров жидкости. Далее электрический разряд развивается в газовой среде, что приводит к интенсивному локальному разогреванию детали, приповерхностные слои материала плавятся и продукты расплава в виде шариков застывают в проточной жидкости и выносятся из зоны обработки.

Стадии электроэрозионной обработки. Режим электроискровой обработки

Обрабатываемая деталь является анодом (+), то есть в данном случае деталь обрабатывается электронным потоком, то есть работает электронный стример, расплавляя объем анода-детали в виде лунки. Для того чтобы ионный поток не разрушал электрод-инструмент, используются импульсы напряжения длительностью не более 10^{-3} с. Электроискровой режим используется для чистовой, точной обработки, поскольку съем металла в данном случае небольшой.

Режим электроимпульсной обработки

Обрабатываемая деталь является катодом, то есть на нее подается отрицательный импульс длительностью больше 10^{-3} с. При электроимпульсной обработке между электродами зажигается дуговой разряд и обработка деталей ведется ионным потоком. Данный режим характеризуется большой скоростью съема металла, превышающей производительность электроискрового режима в 8-10 раз, но при этом чистота обработки существенно хуже. При обоих режимах в качестве рабочей жидкости, как правило, используется керосин или изоляционные масла.

Физика электроэрозионной обработки

Явления, происходящие в межэлектродном промежутке, весьма сложны и являются предметом специальных исследований. Здесь же будет рассмотрена простейшая схема удаления металла из области обработки посредством электрической эрозии.

Как показано на рисунке 6.4, к электродам 1 подведено напряжение, которое создает электрическое поле в межэлектродном промежутке.

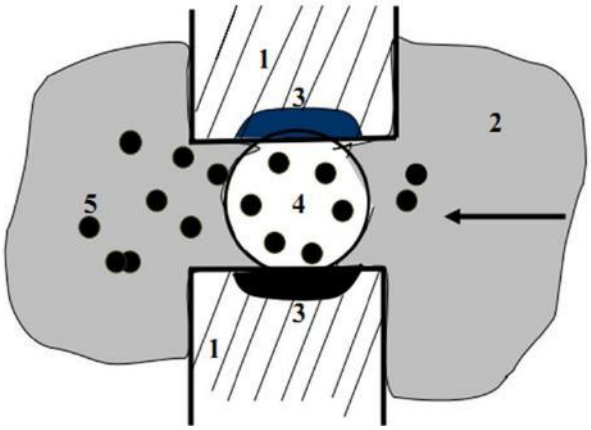


Рисунок 6.4 – Режим электроэрозионной обработки: 1 - электроды, 2 - жидкость, 3 - лунки, 4 - газовый пузырь, 5 - продукты эрозии

При сближении электродов на критическое расстояние, возникает электрический разряд в виде проводящего канала. Для повышения интенсивности разряда электроды погружают в диэлектрическую жидкость 2 (керосин, минеральное масло и др.) На поверхности электродов имеются микронеровности различной величины. Напряженность электрического поля будет наибольшей между двумя наиболее близкими друг к другу выступами на

поверхности электродов, поэтому именно здесь возникают проводящие мостики из примесных частиц жидкости. Ток по мостикам нагревает жидкость до испарения и образуется газовый пузырь (4), внутри которого и развивается мощный искровой или дуговой разряд, сопровождающийся ударной волной. Возникают потоки электронов и ионов (положительные и отрицательные стримеры), которые бомбардируют электроды. Образуется плазменный канал разряда. Благодаря высокой концентрации энергии в зоне разряда температура достигает тысячи и десятков тысяч градусов. Металл на поверхности электродов плавится и испаряется. Капли расплавленного металла в результате движения потока жидкости в рабочей зоне выбрасываются за пределы электродов и застывают в окружающей электроды жидкости в виде мелких частиц сферической формы.

От взаимодействия жидкости с участками электродов, нагретых до температуры 100 – 400 0С, на границах плазменного канала разряда происходит пиролиз диэлектрической жидкости. В результате в жидкости образуются газы, а также асфальтосмолистые вещества. Из газовой среды выделяется углерод, отлагающийся на нагретых поверхностях электродов в виде тонкой пленки кристаллического графита. В месте действия импульса тока на поверхностях электродов остаются небольшие углубления – лунки, образовавшиеся вследствие удаления разрядом некоторого количества металла.

В таблице 1.2 приведена зависимость величины эрозии стального электрода от энергии и длительности одиночного импульса.

Таблица 1.2 – Зависимость величины эрозии стального электрода (анода) от энергии и длительности одиночного импульса

Характеристика импульса		Размеры лунки		
Энергия, Дж	Длительность, мкс	Глубина, мм	Диаметр, мм	Объем, $м^3$
0,001	9	0,015	0,1	0,000078
0,1	40	0,025	0,75	0,0074
1,0	60	0,042	1,65	0,06
2,0	1500	0,050	2,00	0,10

После разряда в течение некоторого времени происходит остывание столба канала и деионизация вещества плазмы в межэлектродном промежутке. Электрическая прочность межэлектродного промежутка восстанавливается. Время деионизации жидкого диэлектрика составляет 10^{6}-10^{-2} с. Следующий разряд обычно возникает уже в новом месте, между двумя другими ближайшими точками электродов.

Длительность интервалов между импульсами должна быть достаточной для удаления из зоны разряда продуктов эрозии, а также газового пузыря, являющегося главным препятствием для возникновения следующего разряда. В связи с этим частота разрядов с возрастанием их энергии снижается.

Так происходит до тех пор, пока разряды не удалят с поверхности электродов все участки металла, которые находятся на расстоянии пробоя при величине приложенного напряжения. Когда расстояние между электродами превысит пробивное, для возобновления разрядов электроды должны быть сближены. Обычно электроды сближают в течение всего времени обработки так, чтобы электрические разряды не прекращались.

Параметры рабочих импульсов. Основными параметрами электрических импульсов, подаваемых на межэлектродный промежуток, являются их частота повторения, длительность, амплитуда и скважность, а также форма, определяющие максимальную мощность и энергию. Форма и параметры импульсов оказывают существенное влияние на износ электрода-инструмента, производительность и шероховатость обработанной поверхности. Обозначим частоту повторения импульсов, т. е. их число в секунду, через f. Тогда T = 1/f будет являться периодом. Он определяет промежуток времени, через который следует очередной импульс.Импульс характеризуется амплитудным значением (или амплитудой) напряжения и тока U_m и I_m. Это максимальные значения, которые приобретают напряжение и ток за время импульса. При электроэрозионной обработке амплитуда напряжения изменяется от нескольких вольт до нескольких сотен вольт, а амплитуда тока от доли ампера до десятков тысяч ампер. Диапазон скважностей импульса при электроэрозионной обработке заключен в пределах от 1 до 30.

Полярный эффект и полярность импульса. Высокая температура в канале разряда и происходящие динамические процессы вызывают эрозию

обоих электродов. Повышение эрозии одного электрода по сравнению с другим электродом называется полярным эффектом. Полярный эффект определяется материалом электродов, энергией и длительностью импульсов, знаком подведенного к электроду потенциала.

Процессы изменения напряжения и тока имеют колебательный характер относительно их нулевого значения. При электроэрозионной обработке принято считать рабочей или прямой полярностью импульса ту его часть, которая вызывает наибольший эффект эрозии обрабатываемой заготовки, а обратной - часть импульса, вызывающую усиленную эрозию электрода-инструмента. Обрабатываемую заготовку присоединяют к тому полюсу, эффект эрозии которого в данных условиях больше. К противоположному полюсу присоединяют электрод- инструмент. Например, при коротких импульсах электроискровой обработки энергия преимущественно поступает на анод, в качестве которого здесь следует использовать заготовку (прямая полярность). При увеличении длительности импульсов наступает перераспределение теплового потока на электродах. Это приводит к тому, что при определенных режимах электроимпульсной обработки эрозия анода становится меньше, чем эрозия катода. В этом случае следует применять обратную полярность, используя заготовку в качестве катода.

Электроэрозионная обрабатываемость. Эффект эрозии различных металлов и сплавов, производимый одинаковыми по своим параметрам электрическими импульсами, различен. Зависимость интенсивности эрозии от свойств металлов называют электроэрозионной обрабатываемостью.

Различное влияние импульсных разрядов на металлы и сплавы зависит от их теплофизических констант: - температур плавления и кипения, теплопроводности, теплоемкости. Если принять электроэрозионную обрабатываемость стали за единицу, то электроэрозионная обрабатываемость других металлов (при тех же условиях) может быть представлена в следующих относительных единицах: вольфрам - 0,3; твердый сплав - 0,5; титан - 0,6; никель - 0,8; медь - 1,1; латунь - 1,6; алюминий - 4; магний - 6 (указанные данные справедливы только при конкретных условиях: энергия импульса 0,125 Дж, длительность $1.4\text{-}10^{-5}$ с, частота 1200 1/с, амплитуда тока 250 А).

Рабочая среда. Большинство операций при электроэрозионной обработке производят в жидкости. Она обеспечивает условия, необходимые для удаления продуктов эрозии из межэлектродного промежутка, стабилизирует процесс, влияет на электрическую прочность межэлектродного промежутка. Жидкости, пригодные для электроискровой обработки, должны обладать соответствующей вязкостью, электроизоляционными свойствами, химической устойчивостью к действию разрядов.

С повышением частоты импульсов и снижением рабочего тока стабильность рабочего процесса ухудшается. Это вызывает необходимость увеличить скважность импульсов. Применение прямоугольных импульсов существенно повышает производительность.

Производительность обработки можно повысить, если применять принудительное удаление продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. Для этого в межэлектродный промежуток под давлением нагнетают жидкость (рисунок 6.5).

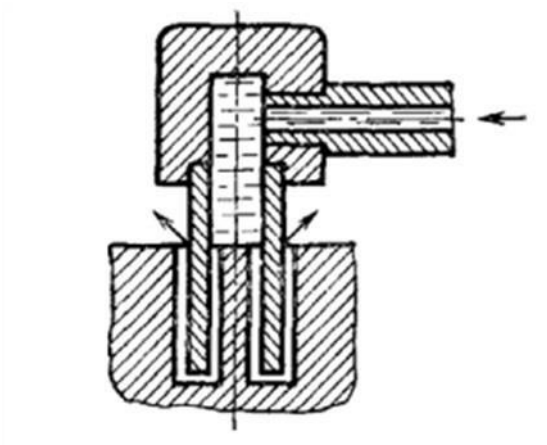


Рисунок 6.5 – Схема подвода жидкости в межэлектродный промежуток через полый электрод при прошивании отверстия

Хорошие результаты дает наложение вибраций на электрод-инструмент, а также вращение одного или обоих электродов. Давление жидкости зависит от глубины отверстия и величины межэлектродного промежутка. Вибрации особенно необходимы при электроискровой обработке глубоких отверстий малого диаметра и узких щелей. Большинство электроэрозионных станков снабжено специальной вибрационной головкой.

Качество поверхности и точность обработки. Металл электродов подвергается хотя и локальному, кратковременному, но весьма интенсивному электротермическому воздействию. Наивысшая температура существует на обрабатываемой поверхности и быстро уменьшается на некотором расстоянии от поверхности. Большая часть расплавленного металла и его паров удаляется из зоны разряда, но некоторая часть остается в лунке (рисунок 6.6). При застывании металла на поверхности лунки образуется пленка, по своим свойствам отличающаяся от основного металла.

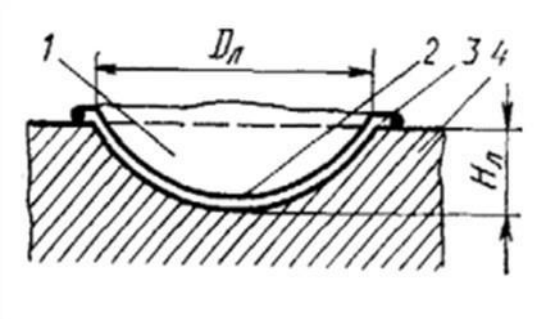


Рисунок 6.6 – Лунка, полученная в результате воздействия единичного импульса: 1 - пространство, оставшееся после выплавления металла; 2 - белый слой; 3 - валик вокруг лунки; 4 - обрабатываемая заготовка; БЛ, НЛ - диаметр и глубина лунки

Поверхностный слой в расплавленном состоянии активно вступает в химическое взаимодействие с парами и продуктами разложения рабочей жидкости, образующимися в зоне высоких температур. Результатом этого взаимодействия является интенсивное насыщение металла компонентами, содержащимися в жидкой среде, а также веществами, входящими в состав электрода-инструмента. Таким образом, в поверхностный слой могут быть внесены титан, хром, вольфрам и т. д. При электроэрозионной обработке стальных заготовок в среде, состоящей из жидких углеводородов (керосин, масло), поверхностный слой насыщается углеродом, т. е. образуются карбиды железа. Следовательно, при электроэрозионной обработке происходит упрочнение поверхности детали. Интенсивный теплоотвод из зоны разряда через прилегающие к ней массы холодного металла и рабочую жидкость создает условия для сверхскоростной закалки, что одновременно с науглероживанием приводит к образованию очень твердого слоя. Закаленный

поверхностный слой стали обладает повышенной стойкостью на истирание и меньшим, чем у нетермообработанной стали коэффициентом трения. Структура поверхностного слоя существенно отличается от структуры основного металла и схожа со структурой отбеленного слоя, возникающего на поверхности некоторых чугунов. Поэтому этот слой получил название «белый слой». Глубина белого слоя зависит от энергии импульсов, их длительности и теплофизических свойств обрабатываемого материала. При длительных импульсах тока большой энергии глубина белого слоя равна десятым долям миллиметра, а при коротких импульсах - сотым долям миллиметра и микронам.

Упрочнение поверхностного слоя металлов (электроэрозионное легирование). Одним из преимуществ электроискрового метода обработки материалов является то, что при определенных условиях резко повышаются прочностные свойства поверхности заготовки: твердость, износостойкость, жаростойкость и эрозионная стойкость. Эту особенность используют для повышения износостойкости режущего инструмента, штампов, пресс-форм и деталей машин, упрочняя металлические поверхности электроискровым способом.

При электроискровом легировании применяют обратную полярность (заготовка является катодом, инструмент - анодом) обработку производят обычно в воздушной среде и, как правило, с вибрацией электрода. Аппаратура, с помощью которой осуществляется процесс упрочнения, малогабаритна и очень проста в эксплуатации. Основные преимущества электроискрового способа нанесения покрытий заключаются в следующем: покрытия имеют большую прочность сцепления с материалом основы; покрываемые поверхности не требуют предварительной подготовки; возможно нанесение не только металлов и их сплавов, но и их композиций. Процессы, происходящие при электроискровом упрочнении, сложны и являются предметом тщательных исследований. Сущность упрочнения состоит в том, что при электроискровом разряде в воздушной среде происходит полярный перенос материала электрода на заготовку. Перенесенный материал электрода легирует металл заготовки и, химически соединяясь с диссоциированным атомарным азотом воздуха, углеродом и материалом заготовки, образует диффузионный износоустойчивый упрочненный слой. При этом в слое возникают сложные

химические соединения, высокостойкие нитриды и карбонитриды, а также закалочные структуры. По мнению специалистов, при электроискровом упрочнении в поверхностном слое, например, стали происходят процессы, приведенные в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Процессы происходящие при электроэррозии

Упрочняемый материал	Процесс	
	Вид	Особенности
Углеродистая сталь, содержащая углерод в количестве свыше 0,6 %, а также легирующие элементы в большом количестве	Сверхскоростная закалка	Кратковременный нагрев до высокой температуры и мгновенное охлаждение нагретых и расплавленных участков массой холодного металла
Инструментальная сталь	Азотирование	Диссоциация атмосферного азота в разряде собразованием атомарного азота. Соединение азота с элементами поверхностного слоя и образование нитридов металлов (титана, хрома, железа и др.)

При электроискровом упрочнении микротвердость белого слоя в углеродистых сталях может быть доведена до 230 МПа, высота микронеровностей обработанной поверхности до 2,5 мкм. Толщина слоя покрытия, получаемого на некоторых установках, составляет 0,003-0,2 мм.

Основные технологии электроэрозионной обработки металлов

Технологии размерной обработки металлических деталей.

Формообразование деталей электроэрозионным методом можно осуществить по следующим схемам.

1. Копирование формы электрода или его сечения. При этом обрабатываемый элемент заготовки по форме является обратным отображением рабочей поверхности инструмента. Данную операцию называют прошиванием. Существуют методы прямого и обратного копирования. При прямом копировании инструмент находится над заготовкой, а при обратном -

под ней. Метод прошивания прост в исполнении, и он широко применяется в промышленности. На рисунке 6.7 представлена схема электроэрозионной обработки методом копирования формы электрода- инструмента. По мере электроэрозионной обработки электрод (1) внедряется в деталь, обеспечивая копирование электрода.

2. Взаимное перемещение обрабатываемой заготовки и электрода-инструмента. При этой схеме возможны операции вырезания сложно-профильных деталей и разрезание заготовок электродами, электроэрозионного шлифования и растачивания деталей.

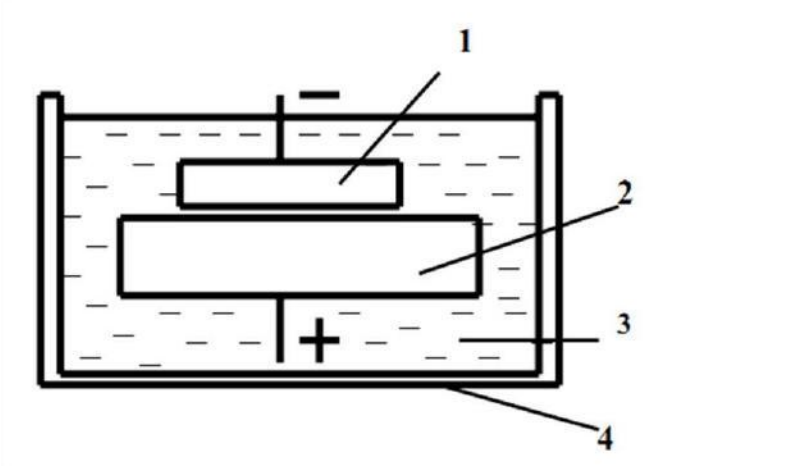


Рисунок 6.7 – Схема копирования формы электрода: 1 – электрод – инструмент, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – жидкость, 4 – сосуд

Прошивание окон, щелей и отверстий. Эта операция осуществляется на универсальных станках. Электроэрозионным способом прошивают щели шириной (2,5 – 10) мм, глубиной до 100 мм. Для обеспечения удаления продуктов эрозии из межэлектродного промежутка, электрод-инструмент делают Т-образной формы или уменьшают толщину хвостовой части по сравнению с рабочей частью на несколько десятых долей миллиметра. Скорость прошивания щелей составляет (0,5 – 0,8) мм/мин, шероховатость обработанной поверхности – до 2,5 мкм.

Обработка деталей типа сеток и сит. Созданы электроэрозионные станки, позволяющие обрабатывать сеточные детали с числом отверстий до нескольких тысяч. Станки могут обрабатывать одновременно более 800 отверстий диаметром (0,2 – 2) мм в листах из коррозионно – стойких сталей,

латуни и других материалов толщиной до 2 мм. Производительность обработки до 10000 отверстий в час.

Электроэрозионное шлифование. Это одна из разновидностей электроэрозионной обработки, которая используется для обработки высокопрочных заготовок из сталей и твердых сплавов. Удаление металла при этом происходит под воздействием импульсных разрядов между вращающимся электродом-инструментом и обрабатываемой заготовкой, а не в результате механического воздействия, как при абразивном шлифовании.

Сложноконтурная проволочная вырезка. Методы прямого и обратного копирования имеют существенный недостаток, заключающийся в необходимости использования сложных фасонных электродов- инструментов. Износ электродов отражается на точности изготовления деталей, поэтому одним электродом-инструментом удается изготовить не более 5 – 10 деталей. Электроискровой метод сложноконтурной проволочной вырезки выгодно отличается от методов копирования тем, что здесь инструментом является тонкая проволока из меди, латуни или вольфрама диаметром от нескольких микрон до 0,5 мм, включаемая в электрическую схему как катод (рисунок 6.8).

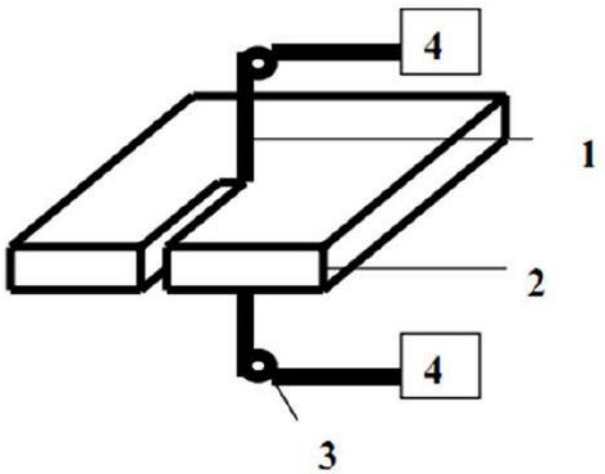


Рисунок 6.8 – Сложноконтурная проволочная вырезка: 1 – проволока, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – направляющие ролики, 4 – устройство для регулирования скорости протяжки проволоки

Для устранения влияния износа проволоки на точность обработки, проволока перематывается с одной катушки на другую, что позволяет все новым элементам участвовать в работе. При перемотке осуществляется

небольшой натяг. Возле обрабатываемой заготовки установлены ролики, ориентирующие проволоку относительно обрабатываемой детали. Сложноконтурная проволочная вырезка применяется при прецизионном резании заготовок, прорезании точных щелей, резании полупроводниковых материалов, обработке цилиндрических, конических наружных и внутренних поверхностей. К основным достоинствам электроэрозионной обработки проволочным электродом-инструментом относится высокая точность и возможность широкой автоматизации процесса.

Электроконтактный способ обработки. Электроконтактная обработка материалов является разновидностью электроэрозионной обработки. Отличие ее состоит в том, что импульсы электрической энергии генерируются в результате взаимного перемещения электродов или прерывания электрического разряда при прокачке жидкости под давлением. Электроконтактную обработку можно проводить при постоянном и переменном токе, в воздухе или жидкости (вода с антикоррозионными добавками). При обработке электрод-инструмент и заготовку полностью погружают в жидкость либо подают жидкость в межэлектродный промежуток распылением. Обработку производят при значительных токах (до 5000 А) и напряжениях холостого хода источника питания 18 – 40 В. Электроконтактным методом производят получистовое точение тел вращения, чистовую резку, прошивание цилиндрических, фасонных отверстий и объемных полостей, фрезерование, шлифование. Электроконтактный метод особенно эффективен при обработке заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов, а также чугунов высокой твердости, монокристаллов, материалов с высокими теплофизическими свойствами. Принципиальная схема установки для электроконтактной обработки выглядит следующим образом. Заготовка и электрод – инструмент, имеющие ось вращательной симметрии и включенные в цепь с источником питания, после соприкосновения совершают вращательное движение друг относительно друга. При соблюдении условий, необходимых для реализации электроэрозионных процессов, происходит съем металла с заготовки.

Упрочнение поверхностного слоя металла (электроэрозионное легирование).

Одним из преимуществ электроэрозионной обработки металлов является то, что при определенных условиях резко повышаются прочностные свойства поверхности заготовки. Эту особенность используют для улучшения износостойкости режущего инструмента, штампов, пресс-форм и т.д. При электроэрозионном легировании применяют обратную полярность (заготовка является катодом, инструмент – анодом) обработку производят обычно атомами инструмента-электрода в электроимпульсном режиме (рисунок 6.9) в воздушной среде и, как правило, с вибрацией электрода.

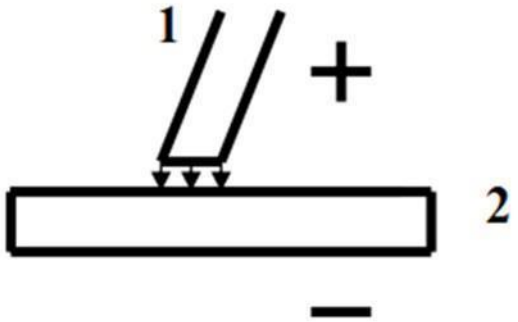


Рисунок 6.9 – Схема электроэрозионного легирования: 1 – легирующий электрод – инструмент, 2 – легируемая деталь

Основные преимущества электроэрозионного легирования заключаются в следующем: покрытия имеют большую степень сцепления с материалом основы; покрываемые поверхности не требуют предварительной подготовки; возможно нанесение не только металлов и сплавов, но и их композиций. Процессы, происходящие при электроэрозионном упрочнении, сложны и являются предметом тщательных исследований. Однако, сущность упрочнения состоит в том, что при электроискровом разряде в воздушной среде происходит перенос материала электрода на заготовку (рисунок 6.9). Перенесенный материал электрода легирует металл заготовки и, химически соединяясь с ионами азота воздуха, углеродом и материалом заготовки, образует износоустойчивый упрочненный слой, состоящий из нитридов, карбонитридов и других закалочных структур.

При электроискровом легировании микротвердость белого слоя в углеродистых сталях может быть доведена до 230 МПа. Толщина слоя покрытия, получаемого на некоторых установках, составляет 0,003-0,2 мм. При

упрочнении поверхности деталей машин (например, на установке ИЕ – 2М) можно получить глубину слоя до 0,5 – 1,6 мм с микротвердостью 50 – 60 МПа (при упрочнении феррохромом).

Различают чистую обработку, которая соответствует высоким напряжениям и небольшим значениям токов короткого замыкания (до 20 А), и грубую (грубое легирование) при низких напряжениях 50-60 В и токах короткого замыкания свыше 20 А. Работа на электроэрозионных станках. Подготовка электроэрозионных станков к работе заключается в установке заготовки и электрода-инструмента и выверке их взаимного расположения, подготовке ванны к работе и системы прокачки рабочей жидкости, выбору и настройке режимов генератора. Заготовку устанавливают и закрепляют непосредственно на столе станка или в приспособлении. Электрод – инструмент устанавливают хвостиком в шпиндель головки. При выверке используют индикаторы, оптические приборы, приспособления, позволяющие изменять положение инструмента по отношению к заготовке и угол наклона. Осуществив выверку положения электрод – инструмента, заполняют ванну рабочей жидкостью, проверяют работу системы прокачки, устанавливают необходимое давление прокачки. Задают режим генератора импульсов (полярность, форма импульсов, скважность, частоту следования импульсов, средний ток), пользуясь соответствующими таблицами и номограммами. Изменение полярности напряжения генератора импульсов производится путем переключения на штепсельном разъеме токоподводов к станку. При работе с прямой полярностью (электроискровой режим) на электрод подается отрицательный потенциал, а на заготовку – положительный. Для работы с обратной полярностью (электроимпульсный режим) производят обратное переключение. Установку электрических параметров и режимов работы осуществляют с помощью переключателей, расположенных на панели пульта управления. Настраивают регулятор подачи, устанавливая рекомендуемое напряжение регулятор. **Электроэрозионные станки** По технологическому назначению эти станки классифицируют на универсальные, специализированные и специальные.

В таблице 6.3 приведены характеристики некоторых электроэрозионных станков.

Таблица 6.3 – Электроэрозионные станки

Модель станка	Наименование станка	Назначение и краткая характеристика
4720М	Станок настольный электроэрозионный копировально-прошивочный. Универсальный.	Изготовление рабочих деталей пресс-форм, фасонных деталей из труднообрабатываемых штампов. Производи-тельность – 70 мм2/мин, шероховатость – Ra = 0,8÷0,4.
4К721АФ1	Электроэрозионный копировально-прошивочный станок. Универсальный.	Обработка сложно профильных отверстий. Производтельность – 250 мм2/мин, шероховатость – Ra = 1,25.
4Е723-01Ф1	Электроэрозионный копировально-прошивочный станок. Универсальный.	Изготовление элементов деталей из труднообрабатываемых сплавов, прореза отверстий. Производительность – 1200 мм2/мин, шероховатость – Ra = 2,5.
4П724Ф3М	Электроэрозионный станок копировально-прошивочный с ЧПУ. Универсальный.	Изготовление элементов деталей ковочных штампов, прореза фасонных отверстий. Производительность –200 мм2/мин, шероховатость – Ra = 3,2÷1,6.
4Б611	Переносной электроэрозионный станок. Специальный.	Прошивание отверстий. Производительность – скорость углубления – 15 мкм/мин. Шероховатость Rz = 160.
4531Ф3	Электроэрозионный станок с программным управлением для профильной вырезки.	Вырезка проволочным ЭИ деталей вырубных штампов, матриц, шаблонов. Производительность – 18 мм2/мин. Шероховатость – Ra=1,25.
4735Ф3М	Электроэрозионный станок, вырезной, высокой точности с ЧПУ. Специализированный.	Вырезка проволочным ЭИ деталей вырубных штампов, матриц, фасонных резцов, шаблонов. Производительность – 40 мм2/мин. Шероховатость – Ra = 1,25.
ЭФА	Электроэрозионный станок, фотокопировальный. Специализированный.	Вырезка проволочным ЭИ деталей вырубных штампов, матриц, шаблонов, изделий народного потребления. Производительность – 20 мм2/мин. Шероховатость – Ra = 1,25.

Общая характеристика процесса электроэрозионной обработки

Типовой технологический процесс ЭЭО на копировально-прошивочных станках заключается в следующем:

1. заготовку фиксируют и жестко крепят на столе станка или в приспособлении. Тяжелые установки (весом выше 100 кг) устанавливают без крепления. Устанавливают и крепят в электродержателе (ЭИ). Положение ЭИ относительно обрабатываемой заготовки выверяют по установочным рискам с помощью микроскопа или по базовым штифтам. Затем ванну стакана поднимают и заполняют РЖ выше поверхности обрабатываемой заготовки.
2. Устанавливают требуемый электрический режим обработки на генераторе импульсов, настраивают глубинометр и регулятор подачи. В случае необходимости включают вибратор и подкачку РЖ.
3. В целях повышения производительности и обеспечения заданной шероховатости поверхности обработку производят в три перехода: предварительный режим – черновым ЭИ и окончательный – чистовым и доводочным.

Типовые операции электроэрозионной обработки

По технологическим признакам устанавливаются следующие виды электроэрозионной обработки (ЭЭО):

– отрезка (ЭЭОт)
– объемное копирование (ЭЭОК)
– вырезание (ЭЭВ)
– прошивание (ЭЭПр)
– шлифование (ЭЭШ)
– доводка (ЭЭД)
– маркирование (ЭЭМ)
– упрочнение (ЭЭУ)

Прошивание отверстий

При ЭЭО прошивают отверстия на глубину до 20 диаметров с использованием стержневого ЭИ и до 40 диаметров – трубчатого ЭИ. Глубина прошиваемого отверстия может быть значительно увеличена, если вращать

ЭИ, или обрабатываемую поверхность, или и то и другое с одновременной прокачкой РЖ через ЭИ или с отсосом ее из зоны обработки. Скорость ЭЭПр достигает 2 – 4 мм/мин.

Маркирование

Маркирование выполняется нанесением на изделие цифр, букв, фирменных знаков и др. Электроэрозионное маркирование обеспечивает высокое качество, не вызывает деформации металла и не создает зоны концентрации внутреннего напряжения, которое возникает при маркировании ударными клеймами. Глубина нанесения знаков может колебаться в пределах от 0,1 до 1 мм.

Операция может выполняться одним ЭИ и по многоэлектродной схеме. Изготавливаются ЭИ из графита, меди, латуни, алюминия.

Производительность составляет около 3 – 8 мм/с. Глубина знаков зависит от скорости движения электрода. При скорости движения электрода более 6 мм/с четкость знаков ухудшается. В среднем на знак высотой 5 мм затрачивается около 4 с.

Вырезание

В основном производстве ЭЭВ применяют при изготовлении деталей электро-вакуумной и электронной техники, ювелирных изделий и т.д. в инструментальном производстве, при изготовлении матриц, пуансонов, пуансонодержателей и других деталей, а также вырубных штампов, копиров, шаблонов, цанг, лекал, фасонных резцов и др.

Шлифование

Этот процесс шлифования применяют для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов, магнитных и твердых сплавов.

Отклонение размеров профиля после электроэрозионного шлифования находится в пределах от 0,005 до 0,05 мм, шероховатость Ra = 2,5÷0,25, производительность – 260 мм2/мин.

Контрольные вопросы к лекции

1. В чем заключаются особенности электрического разряда в электроэрозионных установках? Каковы параметры, характеризующие эти разряды?

2. Каковы требования к источникам питания электроэрозионных установок (к генераторам импульсов)?

3. Каково назначение электроизоляционной среды?

4. Дайте математическое описание переходных процессов импульсных разрядов.

5. Вычертите схемы статических и машинных импульсных источников питания (генераторов импульсов). Каков их принцип действия?

6. В какой зависимости находится частота следования импульсов разряда от параметров элементов схемы источников питания?

Тема №7. Ультразвуковые установки

Современная технология механической обработки конструкционных материалов достигла больших успехов, а выпускаемые промышленностью металлорежущие станки – высокой степени совершенства и высокой производительности, что позволяет с успехом решать различные задачи, выдвигаемые бурным процессом развития техники.

Однако развитие техники привело к появлению новых материалов, механическая обработка которых традиционными способами затруднена. К ним относятся, прежде всего, такие материалы с высокой твердостью, как вольфрамосодержащие и титанокарбидные сплавы, алмаз, рубин, лейкосапфир, закаленные стали, магнитные сплавы из редкоземельных элементов, термокорунд и др. Из традиционных способов при обработке таких материалов применяется только шлифование. Обработка другой группы материалов, таких как германий, кремний, ферриты, керамика, стекло, кварц, полудрагоценные и поделочные минералы и материалы, затруднена их очень большой хрупкостью. Такие материалы не выдерживают усилий, возникающих при традиционной механической обработке.

Поскольку именно перечисленные выше материалы во многом определяют прогресс техники, возникает необходимость эффективно

обрабатывать детали из подобных, «необрабатываемых традиционными способами», материалов.

Для решения проблемы обработки сверхтвердых и хрупких материалов разработаны и внедрены в практику специальные способы обработки: алмазосодержащим вращающимся инструментом, электрохимический, электроэрозионный, электронно-лучевой, ультразвуковой. Все перечисленные способы обработки характеризуются очень высокой экологической опасностью и энергоемкостью процесса. Так, наиболее широко используемый в практике способ обработки алмазосодержащим вращающимся инструментом характеризуется энергоемкостью (затратами электрической энергии на съем единицы объема обрабатываемого материала), приблизительно равной 2000 Дж/мм3, обеспечивая выполнение отверстий диаметром не более 25 мм с производительностью не выше 0,5 мм/мин. При такой обработке используется большое количество охлаждающей воды (не менее 1...5 л/мин), причем очистка ее от мелкодисперсного порошка разрушаемого материала (например, стекла) является сложной проблемой. При механической обработке с помощью алмазосодержащих инструментов используются мощные, высокоскоростные сверлильные станки. Износ рабочего инструмента достигает 5% от глубины выполняемых отверстий, а изготовление алмазосодержащих инструментов диаметром более 25 мм является технически неразрешимой задачей. Приведенные данные по энергозатратам и расходу материалов при алмазном сверлении обуславливают высокую стоимость выполнения одного отверстия (до 15 долларов США). Очевидно, что такой способ обработки будет экологически опасным (акустический шум, вращающийся с большой частотой рабочий инструмент, унос большого количества воды с мелкодисперсным порошком и т.п.) и не ресурсосберегающим (большой расход алмазного инструмента, малая производительность сверления, большой расход воды, большое энергопотребление). Преимущества ультразвукового (УЗ) способа обработки перед другими заключаются в возможности обрабатывать непроводящие и непрозрачные материалы, а также в отсутствии после обработки остаточных напряжений, приводящих при использовании других способов к образованию трещин на обрабатываемой поверхности. Ультразвуковым способом эффективно обрабатываются такие хрупкие

материалы, как агат, алебастр, алмаз, гипс, германий, гранит, графит, карбид бора, кварц, керамика, корунд, кремний, мрамор, нефрит, перламутр, рубин, сапфир, стекло, твердые сплавы, термокорунд, фарфор, фаянс, ферриты, хрусталь, яшма и многие другие. Ультразвуковой способ обработки представляет собой разновидность обработки долблением - хрупкий материал выкалывается из изделия ударами зерен более твердого абразива, которые направляются торцом рабочего инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой.

Применение ультразвуковых колебаний позволяет интенсифицировать процесс хрупкого разрушения обрабатываемого материала за счет создания сетки микротрещин и выколов на поверхности. Технология ультразвуковой обработки заключается в подаче абразивной суспензии в рабочую зону, т.е. в пространство между колеблющимся с высокой частотой торцом рабочего инструмента и поверхностью обрабатываемого изделия. Зерна абразива под действием ударов колеблющегося инструмента ударяют по поверхности обрабатываемого изделия и проводят его разрушение. В качестве абразива обычно используются карбид бора или карбид кремния, в качестве транспортируемой жидкости – обычная вода. Вследствие воздействия частичек абразива на поверхность рабочего инструмента происходит его разрушение. Для уменьшения износа рабочего инструмента его обычно выполняют из вязких материалов, не разрушающихся под действием ударных нагрузок. Частицы абразива под действием ударов раскалываются. Поэтому в зону обработки непрерывно подается абразивная суспензия, несущая зерна свежего абразива и удаляющая частицы снятого материала и размельченный абразив. Для уменьшения шумового воздействия от работающих ультразвуковых аппаратов, рабочая частота выбирается достаточно высокой, обычно это 22 КГц или более. Подача рабочего инструмента в направлении колебаний обеспечивает формирование полости, копирующей форму рабочего инструмента. Таким образом, ультразвуковая размерная обработка базируется на двух основных процессах:

1. Ударном внедрении абразивных зерен, вызывающих выкалывание частиц обрабатываемого материала;

2. Циркуляции и смене абразива в рабочей зоне.

Обязательным условием высокопроизводительной ультразвуковой обработки материалов является интенсивное протекание этих двух процессов. Ограничения, возникающие для протекания одного из этих процессов, вызывают снижение эффективности всей ультразвуковой обработки. Производительность ультразвуковой обработки в значительной степени зависит от физико-механических свойств материалов, частоты и амплитуды колебаний рабочего инструмента, зернистости абразива и нагрузки на инструмент. Влияние всех этих факторов на процесс ультразвуковой размерной обработки будет рассмотрено далее. Способ ультразвуковой обработки начал применяться в промышленности уже в начале шестидесятых годов. С его помощью удалось существенно упростить и ускорить технологию изготовления фасонных деталей из твердых и хрупких материалов. Так, например, в сотни раз повысилась производительность вырезания пластин любой формы из различных керамик, полупроводниковых материалов, появилась возможность выполнять отверстия любой формы, упростилась технология изготовления матриц и пуансонов из твердых сплавов. Однако уже в первых работах по промышленному применению был выявлен основной недостаток ультразвукового способа обработки – существенное уменьшение производительности процесса по мере увеличения глубины обработки [3]. Для объяснения этого явления используется два предположения. Согласно первому [4], при увеличении боковой поверхности рабочего инструмента, контактирующей с обрабатываемым материалом, амплитуда колебаний инструмента уменьшается вследствие трения, а уменьшение амплитуды приводит к снижению производительности. Это предположение до настоящего времени не получило четкого экспериментального подтверждения. При использовании сплошных инструментов и достаточном запасе мощности применяемых генераторов (что было ранее) рассматриваемое предположение не подтверждается экспериментально. Однако, при использовании трубчатых инструментов с тонкой стенкой в комплекте с маломощными генераторами амплитуда колебаний инструмента уменьшается и скорость обработки падает. Второе предположение, основанное на результатах многочисленных экспериментов, объясняет уменьшение скорости обработки с увеличением глубины, ухудшением условий подачи свежего абразива в зону обработки и

удаления продуктов обработки. Экспериментально установлено, что при отсутствии подачи свежего абразива, имеющийся разрушается так, что за 0,5...0,6 секунд размеры частиц уменьшаются в пять раз. В начале 70-х годов были детально изучены основополагающие физические принципы ультразвуковой обработки хрупких материалов. Одновременно с исследованиями физических процессов шло создание УЗ станков для промышленного использования. Первые сведения о разработке оборудования и использовании УЗ станков относятся к 1955 г. Эти станки выполнялись на базе традиционных сверлильных и фрезерных станков и характеризовались очень малой эффективностью и надежностью. Параллельно шло создание опытных образцов промышленных универсальных и специализированных ультразвуковых станков, и исследовались методические особенности их эксплуатации при решении различных задач. Типичная конструктивная схема станка для ультразвуковой обработки имеет ряд специфических узлов, отличающих его от традиционных металлорежущих станков (рисунок 7.1). Ультразвуковой станок содержит генератор электрических колебаний ультразвуковой частоты 1, ультразвуковую колебательную систему 2, обеспечивающую преобразование электрических колебаний в механические ультразвуковые и их введение в обрабатываемое изделие 3. Для перемещения ультразвуковой колебательной системы используется механизм подачи 4. Система подачи абразивной суспензии включает в себя насос 5 и устройство подачи 6 суспензии в зону обработки. На рисунке 7.2 показан современный станок ультразвуковой обработки.

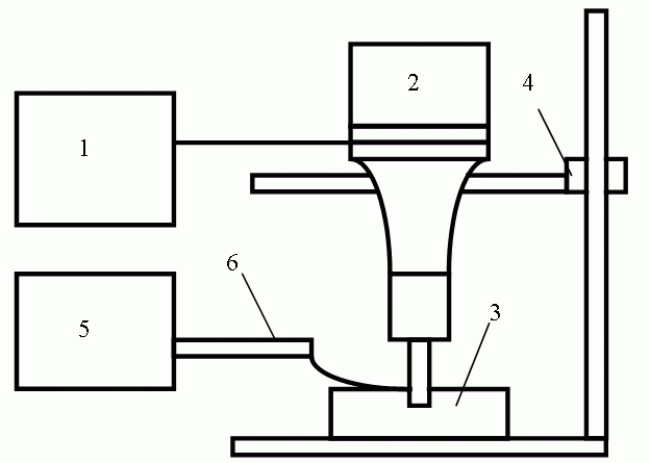


Рисунок 7.1 - Конструктивная схема ультразвукового станка

Рисунок 7.2 – Современный станок ультразвуковой обработки

Кроме того, ультразвуковой станок имеет ряд узлов, используемых в обычных металлорежущих станках: стол 7, станину 8. Ультразвуковая колебательная система содержит электромеханический преобразователь (ранее обычно использовался преобразователь магнитострикционного типа), концентратор - усилитель амплитуды ультразвуковых колебаний и рабочий инструмент. Применение концентратора обеспечивает необходимую амплитуду колебаний рабочего инструмента (10...70 мкм) на заданной рабочей частоте. Механизм подачи прижимает рабочий инструмент к обрабатываемому изделию, укрепленному на столе, с небольшим усилием (до 3 ... – 5 кг) и по мере съема материала осуществляет подачу инструмента, поддерживая течение процесса. Система подачи абразивной суспензии обеспечивает непрерывное поступление свежего абразива в зону обработки, осуществляет удаление продуктов обработки и охлаждение зоны обработки. Генератор обеспечивает преобразование энергии сети переменного тока (50 Гц) в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты и предназначен для питания преобразователя ультразвуковой колебательной системы. До начала 90 годов в нашей стране и за рубежом было создано несколько десятков установок и станков для размерной УЗ обработки деталей из твердых хрупких материалов. Мощность этих установок и станков варьировалась в очень широких пределах

(от 0,03 до 4 кВт), что позволяло вести обработку деталей различных размеров, например, выполнять сквозные и глухие отверстия диаметром от 0,1 до 60 мм [7]. Минимальный диаметр выполняемых отверстий определялся прочностью инструмента, а максимальный - мощностью используемого генератора УЗ колебаний. Все разработанные и использовавшиеся ультразвуковые станки подразделялись на две группы:

– переносные, малогабаритные установки для выполнения отверстий диаметром до 1...3 мм;

– стационарные промышленные установки для выполнения отверстий диаметром до 60 мм.

К первой группе относились небольшие УЗ установки с колебательной системой, которую во время работы можно было держать в руках (аналогично ручной электрической дрели). Такая установка применялась при выполнении малых отверстий (диаметром не более 3 мм) на небольшую глубину (не более 3... – 5 мм), а также при УЗ гравировании и клеймении. Мощность генераторов таких установок не превышала 100 Вт. Типичным примером переносной ультразвуковой установки являлся аппарат в форме пистолета [8], разработанный НИИ кабельной промышленности и имеющий мощность генератора около 30 Вт. Аналогичные малогабаритные переносные установки для обработки и гравирования были созданы в Англии фирмой Миллард (модель L 274) и США фирмой Bendix - Aviation - Sheffild (модель 200-А) [9,10]. Акустическим институтом АН СССР был разработан экспериментальный образец ручного УЗ станка модели УЗ - 45 на основе электрического генератора мощностью 200 Вт. Созданный станок работал в диапазоне рабочих частот 23...29 КГц, обеспечивал амплитуду колебаний рабочего инструмента 15...20 мкм. Габаритные размеры ультразвуковой колебательной системы составляли 195х20 мм и масса 0,5 кг. Станок использовался для ручной обработки (гравирование и маркировка). Следует отметить, что УЗ установки первой группы для обработки деталей из твердых хрупких материалов до настоящего времени не получили широкого развития. Обусловлено это было низкой надежностью и эффективностью самих установок, выполненных на основе ламповых генераторов, и использованием магнитострикционных преобразователей, требующих принудительного водяного охлаждения, с одной

стороны, и практически полным отсутствием до 90-х годов потребностей в таких станках из-за отсутствия индивидуальных потребителей, малых предприятий и мелкосерийных производств. Поэтому наибольшее распространение до 90-х годов получили стационарные УЗ станки (как универсальные, так и специализированные) с вертикальным расположением колебательной системы. Их условно подразделяли в зависимости от функциональных возможностей на три группы:

– станки малой мощности до 200 Вт;

– танки средней мощности от 250 до 1500 Вт;

– станки большой мощности от 1600 до 4000 Вт.

Основными параметрами УЗ размерной обработки являются: Производительность, качество обрабатываемой поверхности и точность ультразвуковой обработки.

На производительность влияют следующие факторы:

– амплитуда механических колебаний инструмента (АМК);

– характеристики материала обрабатываемого изделия и материала абразива;

– размер зерна абразива и его концентрация в суспензии;

– сила подачи инструмента на изделие и глубина обработки.

Наиболее эффективно обрабатываются такие материалы, как:

– стекло;

– керамика;

– феррит;

– германий;

– кремний;

– цветные поделочные камни.

Значительно хуже обрабатываются твердые сплавы и закаленные стали. Производительность обработки снижается с увеличением вязкости и твердости обрабатываемого материала. Производительность ультазвуковой обработки зависит, так же, и от материала абразива, при этом, чем выше его твердость, по сравнению с материалом обрабатываемого изделия, тем она больше. Зависимость роста скорости УЗ обработки особенно заметно, только для

размеров зерна абразива в диапазоне зернистости 0-80 мкм, после чего скорость значительно уменьшается.

Таким образом для получения большой производительности, наиболее эффективным считается использование абразивных порошков с размером зерна 100-110 мкм.

Ультразвуковые технологии обработки металлов

Ультразвуковое резание (УЗР)

Назначение

Чистовая, точная обработка наружных, внутренних, торцевых и плоских поверхностей; сверление, точение, фрезерование; нарезание, накатывание внутренней резьбы.

Область применения

Применяется практически во всех отраслях промышленности и ремонтных мастерских, использующих металлорежущее оборудование.

Преимущества

Позволяет производить обработку по высокому классу точности и чистоты (8 – 9 класс) на металлообрабатывающем оборудовании нормального класса точности.

На рисунке 7.3 представлено сравнение обычной резки и ультразвуковой.

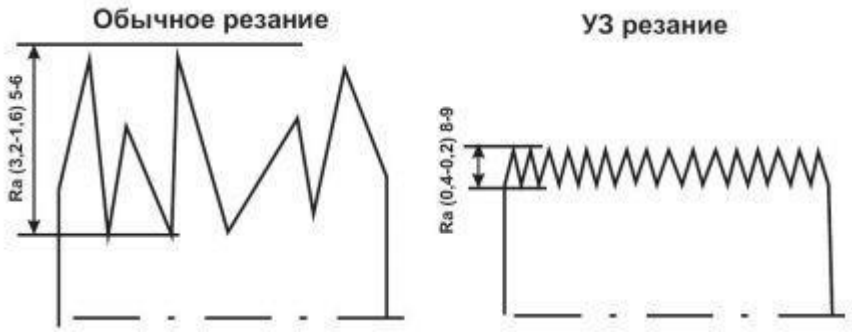


Рисунок 7.3 – Ультразвуковое резание

Ультразвуковое резание основано на сообщении режущей кромке инструмента УЗ колебаний, что в значительной мере снижает усилие резания (в 5-8 раз), улучшает сход стружки, препятствует налипанию на режущую кромку,

повышает стойкость инструмента (~ в 2 раза) и качество изготавливаемых изделий.

Ультразвуковая упрочняюще-финишная обработка (УЗУФО)

Ультразвуковая упрочняюще-финишная обработка осуществляется путём прижатия колеблющегося торца излучателя – индентора к поверхности обрабатываемого изделия, совершающего вращательное или возвратно-поступательное движение и сканирования, таким образом, по всей поверхности, которую необходимо обработать.

Назначение

Финишная обработка наружных, внутренних, торцевых, плоских и фасонных поверхностей.

Область применения

Применяется практически во всех отраслях промышленности и ремонтных мастерских, использующих металлообрабатывающее оборудование.

Преимущества

Получение высокого класса чистоты (10 – 12 класс), упрочненного поверхностного слоя, снятие остаточных внутренних растягивающих напряжений, формирование сжимающих напряжений. Износостойкость деталей, обработанных методом УЗУФО, в два-три раза выше, чем после шлифования. На рисунке 7.4 представлена ультразвуковая упрочняюще – финишная обработка

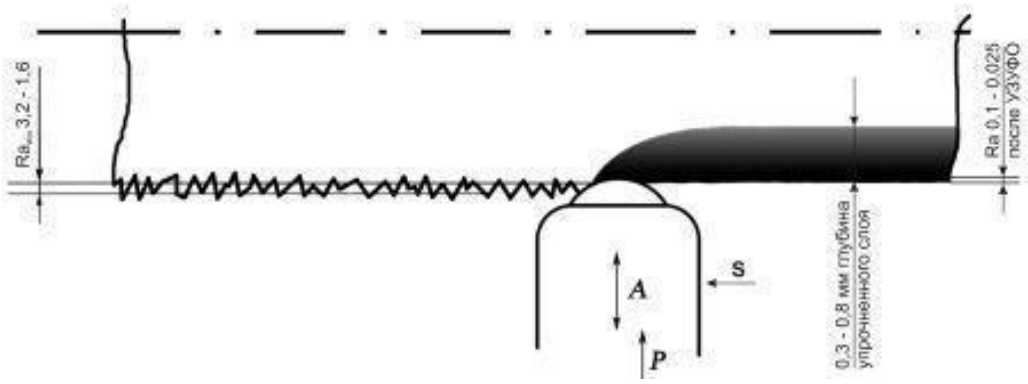


Рисунок 7.4 – Ультразвуковая упрочняюще – финишная обработка

Ультразвуковое нарезание и накатывание наружной и внутренней резьбы (УЗНР)

Ультразвуковое нарезание наружной резьбы резцом, нарезание внутренней резьбы метчиком, накатывание внутренней резьбы метчиком

При УЗНР на инструмент подаются колебания ультразвуковой частоты различной амплитуды, что снижает усилие, необходимое для проведения технологической операции.

Область применения

Практически во всех областях промышленности.

Преимущества

Получение резьбы более высокого качества и с меньшими энергозатратами по сравнению с традиционным способом.

Ультразвуковое волочение

При ультразвуковом волочении, выдавливании и штамповке механические колебания накладываются на инструмент, что в значительной степени снижает механическое усилие, необходимое для проведения технологического процесса.

Назначение

Волочение проволоки, трубки.

Область применения

Сталепрокатные заводы, ювелирная промышленность и т. д.

Преимущества

Получение продукции высокого качества за меньшее число проходов; повышение износостойкости инструмента.

Ультразвуковая сварка

Ультразвуковая сварка (УЗС) — это способ создания неразъёмных соединений с помощью энергии, выделяющейся в зоне контакта свариваемых деталей, при прохождении через последнюю ультразвуковых механических колебаний.

Основным преимуществом ультразвуковой сварки металлов является узкая

направленность теплового воздействия, и как следствие отсутствие деформации и напряжения, стабильность результата сварки. Кроме того, отсутствует тепловое и световое излучение при сварке, металл не доводится до расплавленного состояния. Ультразвук позволяет сваривать однородные и разнородные металлы различной толщины без подготовки поверхности. Например: пластинку из меди толщиной в несколько мкм приварить к детали из стали толщиной в несколько сотен или тысяч мм., что очень сложно сделать с помощью традиционной сварки.

Процесс ультразвуковой сварки осуществляется без расплавления свариваемых материалов. Сваривают металлы толщиной, мм., не более: алюминий – 3; медь – 2; сталь – 1,3; латунь – 1; молибден, кобальт, тантал, вольфрам, бериллий – 0,5 мм.

Назначение

Точечная и шовная сварка тонких элементов к деталям любой толщины.

Область применения

Электротехническая, электронная, приборостроительная, авиационная промышленность и др.

Преимущества

Сварка, микросварка однородных и разнородных металлов без предварительной подготовки поверхности; отсутствие сварочных напряжений.

Ультразвуковая ударная обработка

Среди методов, реально позволяющих повысить качество, надежность и ресурс сварных конструкций следует выделить ультразвуковую ударную обработку.

Назначение

Обработка сварного шва ответственных деталей; упрочнение деталей двигателей и автомобилей, оснастки и инструмента; удаление заусенцев на деталях после механообработки.

Область применения

Газо- и нефтетрубопроводы, металлоконструкции; автомобилестроение, машиностроение,мостостроение, судостроение и т.д.

Преимущества

Происходит снятие растягивающих напряжений и формирование сжимающих. Повышает долговечность изделий и конструкций.

Ультразвуковая обработка связаным и свободным образивом (размерная обработка)

Повышение качества выпускаемых промышленностью машин и оборудования зачастую связано с применением деталей из твердых и хрупких материалов, труднообрабатываемых традиционными способами формообразования, такими, как резание, литье, штамповка и т. п. Одним из наиболее эффективных технологических процессов является ультразвуковая размерная обработка (УЗРО). Сущность УЗРО состоит в следующем. Обрабатываемая деталь устанавливается на технологическом столе напротив выходного торца инструмента. Между инструментом и обрабатываемой поверхностью детали вводят абразивную суспензию. Инструмент с ультразвуковой частотой ударяет по зернам абразива, которые, в свою очередь, воздействуют на поверхность обрабатываемого изделия и посредством скалывания разрушают поверхность последнего в зоне обработки. Разрушение и удаление материала производятся очень большим количеством направленных микроударов. По мере воздействия на обрабатываемый материал инструмент все больше углубляется в деталь. Таким образом, происходит копирование объемной формы инструмента в обрабатываемое изделие. Основными параметрами УЗРО являются производительность, качество обрабатываемой поверхности и точность обработки. При проектировании станков для размерной обработки целесообразно стремиться к получению наибольшей амплитуды механических колебаний, что предъявляет особые требования к УЗГ, прочностным характеристикам инструмента и преобразователя. Это связано с тем, что при УЗРО колебательная система (КС) работает в непрерывном режиме, близком к режиму холостого хода, и большая часть подводимой к ней мощности является мощностью потерь на ее элементах.

Назначение

Обработка изделий из металла и металлокерамики, изготовление различных прессформ и инструментов.

Область применения

Ювелирное дело, электронная промышленность, машиностроение.

Преимущества

По сравнению с традиционными методами позволяет производить объемную выборку материала сложных конфигураций с высокой чистотой поверхности, что невозможно выполнить другими способами снизить себестоимость работы за счет отказа в применении дорогостоящих алмазных инструментов.

Ультразвуковая пайка

Кавитация, обусловленная мощными ультразвуковыми волнами в металлических расплавах и разрушающая окисную пленку алюминия, позволяет проводить его пайку оловянным припоем без флюса.

Назначение

Пайка деталей из алюминия (Al), меди (Cu) и т.д.

Область применения

Электротехническая, электронная, приборостроительная, авиационная и другая промышленность.

Преимущества

Под действием ультразвуковых колебаний не образовывается оксидная пленка.

Ультразвуковая упрочняюще-финишная обработка металлов (УЗУФО)

Эксплуатационные свойства деталей машин зависят от качества их сопрягающихся поверхностей и поверхностного слоя, которые определяются геометрическими и физико-механическими свойствами, а также взаимным расположением микронеровностей на сопрягаемых поверхностях. Шероховатость поверхностей в значительной степени определяет основные эксплуатационные свойства деталей и узлов: износостойкость, сопротивление усталости, надежность посадок, контактную жесткость и теплопроводность стыков сопряженных деталей, коррозионную стойкость, сопротивляемость

эрозии при систематическом воздействии влажности и газов, герметичность соединений, отражающую и поглощающую способность поверхностей и др. Важной характеристикой состояния поверхностного слоя являются остаточные напряжения. Остаточные напряжении оказывают существенное влияние на прочность и долговечность деталей машин и конструкций: остаточные сжимающие напряжения (–), возникающие в поверхностном слое, повышают циклическую прочность деталей, так как они разгружают поверхностные слои от напряжений, вызванных нагрузками, и, наоборот, растягивающие остаточные напряжения (+) уменьшают прочность деталей вследствие повышения напряженности поверхностного слоя. Повышение требований к качеству выпускаемой продукции влечет за собой необходимость совершенствования технологических процессов. Поэтому отделочная (финишная) обработка, изменяющая в широких пределах свойства поверхностного слоя, занимает важное место среди технологических способов, повышающих надежность деталей. Основные усилия разработчиков отделочных технологий сводятся к автоматизации и повышению производительности процесса, уменьшения шероховатости поверхности до величины микронеровностей в десятые и сотые доли микрона. Значительное место в технологических процессах по изготовлении деталей машин отводится абразивной обработке – шлифованию. Однако для процесса шлифования характерно формирование растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях обработанных изделий, а также шаржирование (насыщение абразивными частицами) обработанной поверхности, что снижает усталостную прочность и износостойкость деталей. Операции шлифования и полирования вызывают неоднородную пластическую деформацию, а также не устраняют физико-химические неоднородности от предыдущей обработки (точение, сварка). Для повышения прочности и износостойкости деталей необходимо применять методы обработки, улучшающие физико-химические свойства, структуру и микрогеометрию поверхности. В последнее время в машиностроении и других отраслях промышленности широко применяются методы поверхностного пластического деформирования (ППД). К ним относятся: дробеструйная обработка, обкатывание шариком или роликом, дорнование, алмазное выглаживание.

Одним из наиболее эффективных методов ППД является Ультразвуковая упрочняюще-финишная обработка металлов (УЗУФО). Предварительно деталь протачивается на станке (токарном, строгальном и т.д.), затем на этом же станке с помощью малогабаритной ультразвуковой приставки проводится УЗУФО. При этом инструмент (индентор) с большой частотой (22 кГц) (22000 ударов в сек.) ударяет по микронеровностям обрабатываемой поверхности, что позволяет получить на поверхности малую шероховатость и упрочненный слой.

Применение технологии УЗУФО позволяет исключить: во многих случаях операцию шлифования, полностью ручные доводочные операции абразивными шкурками и пастами, в некоторых случаях – термообработку, внутрицеховую транспортировку деталей, а также экономить производственные площади, улучшить экологию и повысить культуру производства. Анализ результатов многолетних внедрений технологии и оборудования для ультразвуковой упрочняюще-финишной обработки металлов показывает, что широкое использование этой технологии в машиностроении, судостроении, авиакосмической, автотракторной и других отраслях промышленности позволит обеспечить прорыв в интенсификации производственных процессов, в повышении качества и надежность изделий, машин и приборов.

Ультразвуковая сварка

Сварка металлов ультразвуком находит все более широкое применение, так как этот способ имеет ряд преимуществ и особенностей по сравнению с контактной и холодной сваркой. Особенно перспективна ультразвуковая сварка применительно к изделиям микроэлектроники. Весьма перспективна сварка ультразвуком пластмасс; этот метод широко используется в промышленности, так как обладает рядом особенностей, дающих возможность получить высококачественное соединение на многих пластмассах, сварка которых другими методами затруднена или невозможна. Разработаны оборудование и технология ультразвуковой сварки металлов и пластмасс, успешно использующиеся в промышленности. За рубежом этот метод также находит применение в промышленности. При сварке ультразвуком неразъемное соединение металлов образуется при совместном воздействии на

детали механических колебаний высокой частоты и относительно небольших сдавливающих усилий. В принципе этот метод сварки имеет много общего с холодной сваркой сдвигом. Колебания, возникающие в какой-либо среде и характеризующиеся упругими деформациями среды, называются упругими. Форма упругих колебаний может быть различна. Наиболее распространенной формой являются гармонические колебания, т. е. колебания, описываемые выражением

$$A=A_м \cdot \sin(\omega t+\varphi),$$

где A – смещение или деформация в данном элементе среды в момент времени t;

$A_м$ – максимальное значение смещения или деформации;

ω – круговая частота колебаний;

φ – начальный угол сдвига.

Упругие колебания, частота которых превышает некоторую границу, принято называть ультразвуковыми. Обычно считают, что нормальный человеческий слух не воспринимает в виде слышимого звука гармонические упругие колебания с частотой выше 17 000 – 20 000 Гц. В практике упругие колебания используются в диапазоне частот от 8000 Гц до мегагерц. При ультразвуковой сварке обычно используется диапазон частот 18 – 80 кГц.

Скорость распространения ультразвука зависит от физических свойств материала. Например, в стержне скорость распространения продольных волн определяется из следующего соотношения:

$$c=\sqrt{E/\rho},$$

где E – модуль упругости материала;

ρ – плотность материала.

Скорость распространения звуковых волн в большинстве твердых тел колеблется в пределах 2000 – 6000 м/с и изменяется в зависимости от температуры, давления и интенсивности звука. Длина волны, соответствующая данной частоте, непосредственно определяется из равенства

$$\lambda=\frac{c}{f},$$

где c — скорость звука; f — частота.

При частоте 20 кГц длина волны в стали равна 28 см. Интенсивность плоской продольной звуковой волны в любой среде определяется из уравнения

$$J=kA^2f^2\rho c,$$

где A – амплитуда колебаний;

f – частота колебаний;

ρ – плотность среды;

k – коэффициент пропорциональности; c – скорость звука в среде.

Поток энергии волны сквозь некоторую поверхность S равен

$$\Phi=\int_S J\,dS\cos\beta,$$

где β – угол между нормалью к площадке dS и направлением распространения волны.

Мощность ультразвука, которая может быть передана через среду, зависит от физических свойств среды; если напряжения в зонах сжатия и разрушения превысят предел прочности материала, то твердый материал будет разрушаться. В жидкостях в аналогичных случаях возникает кавитация с образованием мельчайших пузырьков паров жидкости и последующим их захлопыванием. Процесс захлопывания кавитационных пузырьков сопровождается возникновением местных давлений, превышающих 5000 кгс/см^2. Это явление в жидкостях используется для обработки и очистки изделий. Машины для ультразвуковой сварки состоят из следующих основных узлов: источника питания, аппаратуры управления, механической колебательной системы и привода давления. Механическая колебательная система служит для преобразования электрической энергии в механическую, передачи этой энергии в зону сварки, концентрирования этой энергии и получения необходимой величины колебательной скорости излучателя.

Колебательная система (рисунок 7.5) состоит из электромеханического преобразователя 1 с обмотками, заключенного в металлический корпус 2, охлаждаемый водой; трансформатора упругих колебаний 5; сварочного наконечника 4; опоры с механизмом давления 5 и свариваемых деталей 6. Крепление колебательной системы производят с помощью диафрагмы 7. Ультразвук излучается только в момент сварки точки.

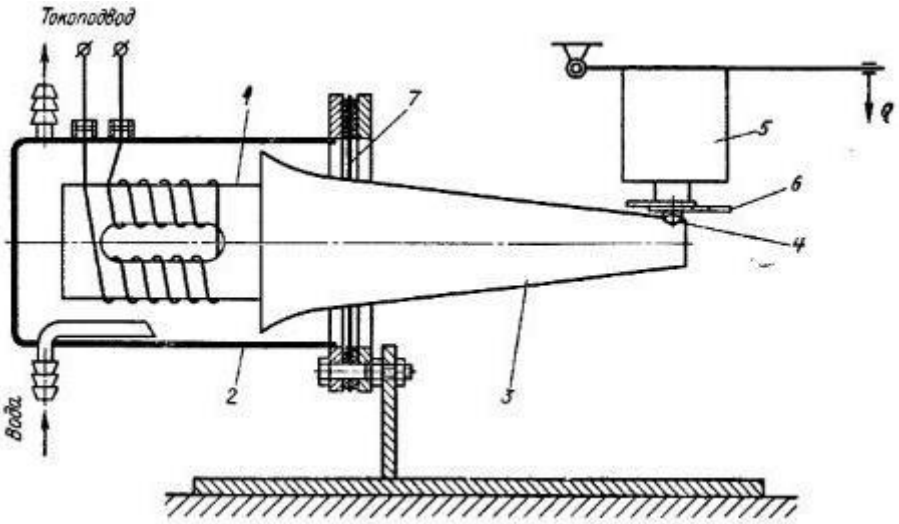


Рисунок 7.5 – Схема ультразвуковой установки для точечной сварки

Преимущества ультразвуковой сварки

– сварка осуществляется в твердом состоянии металла без существенного нагрева места сварки, что дает возможность соединять химически активные металлы или пары металлов, склонные образовывать хрупкие интерметаллические соединения в зоне сварки;

– возможность соединения тонких и ультратонких деталей, возможность приварки тонких листов и фольги к деталям неограниченной толщины, сварка пакетов из фольги;

– снижение требований к чистоте свариваемых поверхностей дает возможность проводить сварку плакированных и оксидированных поверхностей и вообще сварку металлических изделий, поверхности которых покрыты различными изоляционными пленками;

– применение небольших сдавливающих усилий (10 – 250 кгс), вследствие чего деформация поверхности деталей в месте их соединения незначительна (вмятина, как правило, не превышает 5 – 10%);

– малая мощность оборудования и несложность его конструкции (если, например, для контактной точечной сварки алюминия толщиной 1 мм необходима машина мощностью 100 – 150 кВ·А, то при сварке ультразвуком аналогичного соединения потребляется всего 5–2,5 кВ·А).

Область применения

Ультразвуковая сварка нашла достаточно широкое применение для соединения тонких деталей из однородных и разнородных материалов в

приборостроении и радиоэлектронной промышленности. В дальнейшем можно ожидать, что этот метод будет использован при сварке металлов, образующих хрупкие интерметаллические соединения, для приварки тонких обшивок к несущей конструкции (в авиационной промышленности, автомобилестроении и ряде других отраслей промышленности).

По мере совершенствования технологического процесса и оборудования область применения ультразвуковой сварки будет непрерывно расширяться.

Ультразвуковую сварку применяют для соединения многих металлов. Наиболее легко свариваются пластичные металлы (алюминий, медь и их сплавы, серебро, никель и т.п.) как между собою, так и с твердыми малопластичными материалами.

Металлические детали могут свариваться с керамикой, стеклом, полупроводниковыми материалами (кремний, германий). Успешно свариваются тугоплавкие металлы: вольфрам, ниобий, тантал, цирконий, молибден. Можно сваривать заготовки через прослойку из третьего металла, например сталь со сталью через алюминий, а также заготовки покрытые оксидами, лаками, полимерами и т.п. Используется УЗС также для соединения пластических масс.

Качество соединений при шовной сварке определяется теми же параметрами, что и при точечной, лишь вместо времени сварки вводится скорость движения детали. При правильно выбранных режимах шовной сварки разрушающее усилие сварного соединения выше чем основного металла.

Контрольные вопросы к лекции

1. Что такое упругие звуковые и ультразвуковые колебания?

2. Каков диапазон частот звуковых и ультразвуковых волн?

3. Что такое кавитация жидкости? При каких условиях она возникает?

4.Поясните физическую сущность магнитострикционного и пьезоэлектрического эффектов. Какова конструкция магнитострикционного и пьезоэлектрического преобразователей?

5. Что такое акустический трансформатор скорости?

6. Каково назначение и принцип действия концентратора амплитуды, его конструкция?

7.Каково назначение предварительного подмагничивания магнитострикционных преобразователей?

8. Как и почему изменяются частота и амплитуда упругих колебаний от величины предварительного подмагничивания преобразователя?

9. Вычертите схемы и объясните принцип работы источников питания ультразвуковых установок.

10. Каков принцип действия ультразвуковых дефектоскопов?

11.Приведите примеры применения ультразвуковых установок для интенсификации технологических процессов.

12.В чем заключаются особенности технологии сварки, пайки, лужения, электролиза с применением ультразвука?

Тема № 8. Установки электронно-ионной технологии

Введение

В течение последних 30 лет сформировалась электронно - и ионно - лучевая технология обработки материалов. В этой новой области электронные и ионные пучки непосредственно используются для осуществления технологических процессов. Возможные применения электронно - и ионно - лучевой технологии простираются от получения субмикроскопических структур в микроэлектронике до выплавки крупных слитков в металлургии. Общим для всех этих установок является использование электронных и ионных пучков.

Приблизительно в 1965 году электронно-лучевая плавка, сварка, напыление и обработка поверхностей были внедрены в промышленное производство. В настоящее время широко используются в производстве и ионно-лучевые технологии. Освоение лазерных технологий значительно повышает эффективность современного производства.

Электронно-лучевая обработка материалов

Электронно-лучевая обработка осуществляется в вакууме при наличие специального оборудования: технологической камеры с вакуумной системой и электронной пушки с высоковольтным источником питания.

На рисунке 8.1 представлена типовая функциональная схема электронно-лучевой установки. Установка состоит из вакуумной камеры 1, в

верхней части которой размещается электронная пушка 2. К пушке с помощью кабеля высокого напряжения подводятся питание от высоковольтного выпрямителя 3. Внутри камеры может также находиться механизм перемещения 5 обрабатываемого изделия 6. Управление всеми агрегатами ведется с пульта управления 4. Вакуум в технологической камере создается с помощью вакуумной системы 7. Вакуум при электронно-лучевой обработке необходим как для создания и формирования электронного пучка, так и для защиты обрабатываемого металла от действия кислорода и азота воздуха, ускорения дегозации металла при плавлении, удаления некоторых вредных примесей и др.

К электронно – лучевым установкам предъявляется ряд общих требований. Рабочая камера должна быть газонепроницаемой и обладать прочностью, достаточной, чтобы выдержать атмосферное давление при создании вакуума внутри камеры.

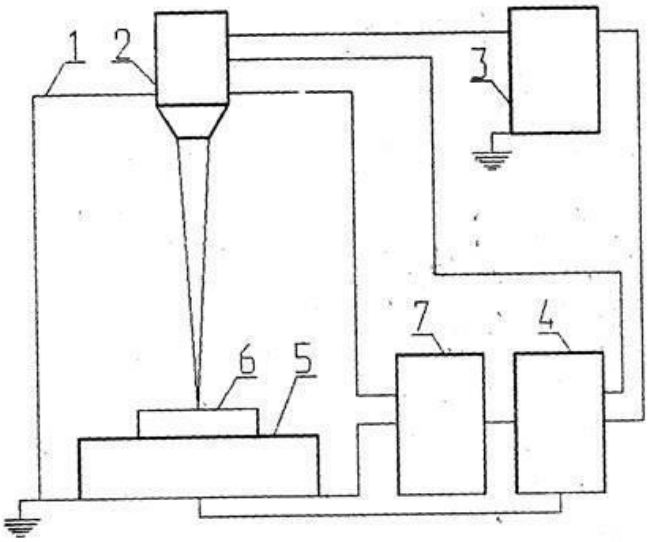


Рисунок 8.1 - Функциональная схема технологической электронно-лучевой установки: 1 – вакуумная камера; 2 – электронная пушка; 3 – высоковольтный выпрямитель; 4 – пульт управления; 5 – механизм перемещения обрабатываемого изделия; 6 – обрабатываемое изделие

В качестве материала камеры лучше применять нержавеющую сталь. Толщину стенки камеры выбирают из условий прочности с учетом обеспечения непроницаемости для рентгеновского излучения. Камера снабжается смотровыми окнами для наблюдения за процессом. Толщина стекла и его

качество должны обеспечивать прочность, герметичность и защиту от рентгеновского излучения. Камера должна иметь люки, обеспечивающие загрузку изделий, подлежащих электронно-лучевой обработке.

Электронно-лучевые технологические установки состоят из двух основных комплексов: энергетического и электромеханического, К энергетическому комплексу относится аппаратура, предназначенная для формирования пучка электронов с заданными параметрами управления его мощностью и положением в пространстве. Электромеханический комплекс установки предназначен для герметизации и вакуумирования рабочего объема, выполнения всех установочных, транспортных и рабочих перемещений обрабатываемого изделия и электронной пушки.

Вакуумные камеры для электронно – лучевойобработки являются одним из наиболее важных узлов установки для электронно-лучевой обработки. От их формы, конструкции, жесткости и габаритов зависят габариты и качество обрабатываемых за одну откачку изделий, удобство их загрузки и выгрузки, возможность пристыковки дополнительных объемов в нужном направлении и др. По степени специализации различают два типа камер: универсальные и специализированные. Универсальные камеры предназначены для обработки изделий любой формы и габаритов в пределах габаритов камеры. Такие камеры используются в единичном и мелкосерийном производстве и выпускаются в соответствии с принятыми параметрическими рядами. Это дает возможность выбрать камеры наиболее подходящих размеров применительно к конкретным изделиям. Специализированные камеры неразрывно связаны с конструкцией и габаритами конкретного изделия или группы изделий. Часто специализированные камеры выполняют по форме обрабатываемого изделия.

Откачные системы служат для создания и поддержания в процессе работы высокого вакуума в ускоряющем промежутке электронной пушки и в вакуумной камере.

Манипуляторы предназначены для рабочих, установочных и транспортных перемещений обрабатываемого изделия и электронной пушки.

Системы наблюдения, используемые при электронно-лучевой обработке, в большинстве случаев нуждаются в защите их от запыления парами обрабатываемых материалов.

Смотровое окно кроме прочного иллюминаторного стекла содержит рентгеновское стекло, необходимое для защиты обслуживающего персонала от рентгеновского излучения из области взаимодействия электронного пучка с металлом.

Вспомогательные устройства и механизмы предназначены для выкатывания манипуляторов из вакуумной камеры(выдвижные платформы), для сборки изделий и других целей.

Электропривод в установках для электронно-лучевой обработки управляется как в ручном дистанционном режиме для простых систем, так я в автоматическом режиме для более сложных систем.

Управляющие функции могут выполняться с помощью компьютерных систем или средствами локальной автоматики.

Технология электронно-лучевой обработки конструкционных материалов

При осуществлении всех электронно-лучевых процессов электронный пучок используют в качестве энергоносителя, который в соответствующем виде воздействует на обрабатываемый материал. Пучок генерируется в электронной пушке и через выходное отверстие пушки выводится в технологическую вакуумную камеру. В ней размещены или в неё вводятся объекты электронно-лучевого процесса - заготовки или материалы.

При встрече электронного пучка с веществом кинетическая энергия электронов пучка. взаимодействующих с атомами вещества, в результате ряда элементарных процессов превращается в другие формы энергии. При сварке, плавке, испарении и термической обработке используется возникающая при этом тепловая энергия. При нетермической обработке и других процессах химической электронно-лучевой технологии столкновения электронов пучка с атомами и молекулами возбуждают и ионизируют последнии, вызывая химические реакции между ними. Эти эффекты воздействия электронного пучка на вещество и определяет области электронно-лучевой технологии.

Испарение материалов

Испарение (точнее, испарительное осаждение) в вакууме является важным способом получения тонких пленок.

Использование электронных пучков в процессах, связанных с испарением материалов, обусловлено особенностями распределения потоков энергии при нагреве этого материала. При электронно-лучевом испарении испаряемая поверхность непосредственно нагревается бомбардирующими ее электронами. Такой способ подвода энергии дает электронно-лучевому испарению ряд преимуществ по сравнению с традиционными.

Другим стимулом внедрения электронно-лучевого испарения является возможность, управляя электронным пучком во времени и пространстве, управлять тем самым и потоком энергии в испаряемое вещество и воздействовать на скорость испарения и распределение плотности потоков пара.

Испарительное осаждение - это процесс вакуумного нанесения покрытий, при котором между испарителем и подложкой создается направленный поток пара.

Принцип электронно-лучевого испарения пояснен на рисунке 8.2.

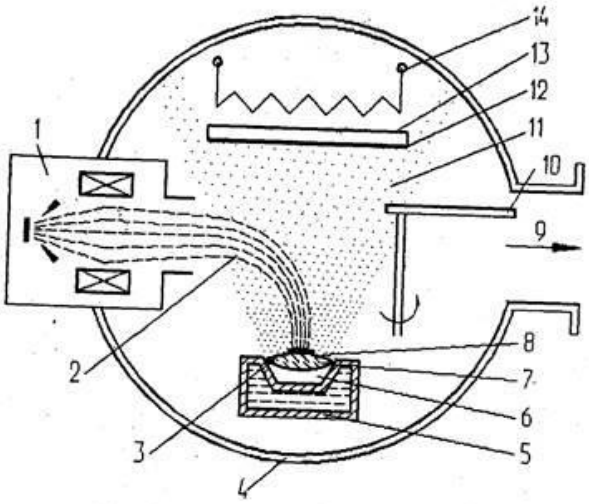


Рисунок 8.2 – Принцип электронно-лучевого испарения материалов: 1 – электронная пушка; 2 – электронный пучок; 3 – поверхность, бомбардируемая пучком; 4 – кожух технологической камеры; 5 – водоохлаждаемый тигель; 6 – испаряемый материал; 7 – расплавленная часть материала; 8 – поверхность испарения; 9 – откачка вакуума; 10 – диафрагма испарителя; 11 – поток пара; 12 – напыляемый слой; 13 – подложка; 14 – подогреватель подложки

В основных чертах установка для электронно-лучевого испарения состоит из технологической камеры с системой откачки, тигля с испаряемым

материалом, электронной пушки, заслонки для пара и подложки с приспособлениями для её крепления, а иногда – нагрева. Для того чтобы электронный пучок в поток пара распространялись в технологической камере беспрепятственно, давление в ней должно поддерживаться достаточно малым. Нанесение покрытий из сплавов требует обеспечение одинакового соотношения компонентов сплава как по всей поверхности подложки, так и по толщине слоя. Слои из сплавов напыляют двумя методами: многотигельного испарения или однотигельного испарения. При многотигельном испарении компоненты испаряются порознь, каждый из своего тигля, а конденсируются на подложке совместно. При однотигельном испарении поток пара создается и конденсируется, имея тот состав, который требуется для покрытия. Вариантом однотигельного испарения является процесс, аналогичный фракционной возгонке, когда из тигля с большим количеством расплавленного вещества его испаряют покомпонентно, изменяя мощность подогрева по определенному графику. Испарение соединений сопровождается частичной или полной их диссоциацией, и получить из таких соединений простым испарением тонкие пленки заданного состава невозможно. Однако для ряда соединений. таких, как хлориды, сульфиды, селениды, теллуриды, а также полимеры, благодаря малой степени диссоциации или вследствие рекомбинации компонентов при конденсации, возможность теоретического напыления все же существует. Промышленное применение электронно-лучевого испарения, благодаря его преимуществам, существенно потеснило традиционные способы испарения и открыло новые возможности.

Электронно-лучевая плавка металлов

Электронно-лучевая плавка является весьма удобным способом получения слитков тугоплавких и химически высокоактивных металлов. Здесь используются такие особенности электронно-лучевой плавки, как высокая удельная поверхностная мощность в рабочем пятне пучка и наличие вакуума, препятствующего поглощению газов в ходе плавки. Областью применения электронно-лучевого переплава является производство особо чистых сталей и выплавка слитков и фасонных отливок из химически активных и тугоплавких металлов.

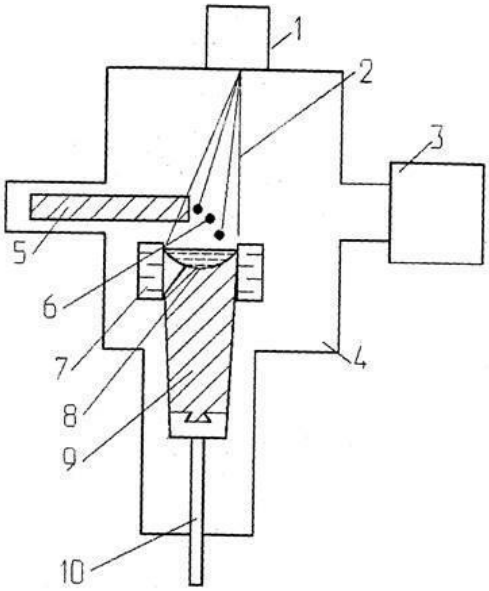


Рисунок 8.3 – Принцип электронно-лучевого переплава: 1 – электронная пушка; 2 – электронный пучок, направляемый на расплавляемый штабик 5 и ванну расплавленного металла 7; 3 – откачка вакуума; 4 – плавильная камера; 6 – капли переплавляемого металла; 8 – выплавляемый слиток; 9 – водоохлахдаемый кристаллизатор; 10 – устройство вытяжки слитка; 11 – смотровые окна

Процесс плавки изображен на рисунок 8.3, где показано взаимное расположение электронной пушки, переплавляемой заготовки и кристаллизатора. Часть модности пучка расходуется для нагрева переплавляемого металла на торце заготовки до температуры плавления. Расплавляясь, материал в виде капель перетекает в ванну расплава в кристаллизаторе. Скорость плавки пропорциональна мощности пучка, приходящейся на расплавляемую заготовку. Другая часть мощности пучка подводятся в кристаллизатор. Она должна быть достаточной для того, чтобы материал в ванне находился в расплавленном состоянии вплоть до стенки кристаллизатора. Это дает возможность получать слитки с гладкой боковой поверхностью. Если кроме формирования такого слитка требуется проводить еще и рафинирование расплава, то мощность, подводимую в кристаллизатор, следует увеличить.

Электронно-лучевая плавка может сочетаться с литьем. Для этого необходимым элементом является литейный тигель, в котором материал расплавляют и поддерживают жидким в достаточном количестве. Литейный

тигель может быть футерованным или медным водоохлаждаемым. Керамическая футеровка тиглей и изложниц допустима только тогда, когда реакции материала футеровки с расплавом не происходят или когда они не наносят вреда качеству продукта.

Перспективы развития электронно-лучевой плавки обусловлены потребностями ядерной, аэрокосмической техники, электроники и химической технологии в особо чистых материалах, сохраняющих прочностные свойства при высоких температурах или обладающих высокой химической стойкостью.

В настоящее время в мире насчитывается несколько сотен электронно-лучевых плавильных установок, работающих в промышленности.

Электронно-лучевая плавка занимает прочные позиции в производстве слитков из ниобия и тантала. В металлургии титана и других высокоактивных и тугоплавких металлов, а также кремния, повышается значение электронно-лучевой плавки как способа переработки возвратных отходов производства.

Электронно-лучевая сварка

При электронно-лучевой сварке кинетическая энергия электронов пучка используется для того, чтобы расплавить жестко ограниченные участки примыкающих друг к другу деталей с тем, чтобы расплав, застывая, соединил детали. Положительной стороной электронно-лучевого способа сварки является возможность создания относительно высокой удельной поверхностной мощности в пятне пучка при достаточно высоких значениях мощности всего пучка. Ввиду того, что процесс электронно-лучевой сварки ведется в вакууме, этим способом можно сваривать детали из химически активных металлов.

Электронно – лучевая сварка позволяет получать сварные соединения с отношением глубины шва к его ширине, намного большим единицы, чего невозможно добиться другими способами сварки плавлением.

Процесс сварки протекает следующим образом. При достаточной поверхностной мощности электронного пучка в месте его встречи с поверхностью детали появляется небольшая ванночка с расплавом. Если увеличить удельную поверхностную мощность, сфокусировав пучок более остро, то в обрабатываемом материале образуется паровая полость - канал

проплавления. Этот эффект называют эффектом глубокого (кинжального) проплавления. Нарушение оптимального режима электронно-лучевой сварки ведет к появлению в швах дефектов, причем даже на хорошо свариваемых материалах.

Лазерная обработка материалов.

Для обработки и сварки материалов используются твердотельные и газовые лазеры. Независимо от типа применяемого лазера и назначения лазерные технологические установки состоят из ряда аналогичных функциональных узлов и имеют общую структурную схему (рисунок 8.4).

Основным источником энергии, обеспечивающим процесс обработки, является оптический квантовый генератор (лазер). Лазерное излучение формируется оптической системой в пучок с определенными пространственными характеристиками и направляется на обрабатываемый объект. При помощи оптической системы могут осуществляться также визуальный контроль положения обрабатываемого объекта относительно луча, наблюдение за ходом процесса обработки и оценка его результата. В лазерной технологической установке имеется также устройство для обеспечения перемещения обрабатываемого объекта в процессе обработки.

Лазерная поверхностная обработка

Улучшение эксплуатационных свойств металлических материалов при различных видах лазерной поверхностной обработки связано с изменением структурного состояния, фазового и химического составов поверхностных слоев. Используя лазерный пучок как концентрированный источник тепла, можно выполнять различные виды локальной термической обработки.

Для лазерного глазурирования, как правило, используют непрерывное излучение с плотностью мощности $10^4 ... 10^7$ Вт/см^2. При перемещении обрабатываемой поверхности под лучом лазера (или луча по поверхности) тонкие слоя материала расплавляются и затем быстро затвердевают за счет передачи тепла низлежащим холодным слоям металла основы. Лазерное оплавление можно использовать для поверхностного легирования или обработки покрытий. В последнем случае наблюдается залечивание дефектов

(пор и трещин) и улучшается прочность сцепления покрытия с основой вследствие образования жидкой фазы.

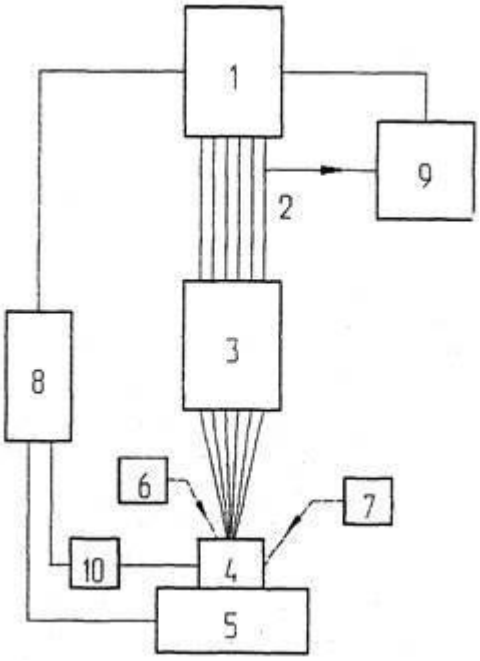


Рисунок 8.4 – Структурная схема лазерной технологической установки: 1 – оптический квантовый генератор (лазер); 2 – лазерное излучение; 3 – оптическая система; 4 – обрабатываемый объект; 5 – устройство для перемещения обрабатываемого объекта; 6 – устройство для подачи защитного газа; 7 – источник вспомогательной энергии; 8 – программное устройство; 9 – датчик контроля параметров излучения; 10 – датчик технологических параметров

С помощью лазера можно производить наплавку или напыление различных покрытий аналогично процессам дуговой, плазменной или пламенной наплавки или напыления. Лазерная закалка принципиально отличается от объемной закалки тем, что она может протекать с оплавлением и без оплавления поверхности. Для лазерной закалки могут быть использованы лазеры как импульсного, так и непрерывного действия. Наиболее важные факторы, определяющие выбор типа лазера - глубина упрочнения и производительность процесса. Практика работы с лазерным излучением показала, что лазерная термическая обработка металлов без оплавления поверхности практически невозможна без специальных технологических мер, повышающих поглощающую способность металла. Для получения стабильных

результатов лазерной термической обработки на обрабатываемую поверхность перед облучением наносят соответствующие покрытия. Чаще всего для этой цели используют фосфаты марганца или цинка, различные краски, суспензии. Широко возможности лазерного отжига используют в электронной промышленности. В отличии от обычного печного отжига с помощью лазерного луча можно осуществлять контролируемый по температуре и времени нагрев поверхностных слоев различных материалов на заданную глубину. При этом температура соседних участков металла практически не изменяется. Применение лазерного отжига вследствие локальности и кратковременности нагрева позволяет подавить диффузионные процессы и существенно улучшить характеристики полупроводниковых материалов и структур.

Лазерная резка

Разработка мощных и надежных лазеров на алюминий – иттриевом гранате и CO_2 , работающих в непрерывном и импульсном режимах, позволила осуществлять технологическую операцию лазерного разделения материалов, которой присущи следующие особенности: обширный диапазон разделяемых материалов; возможность получения узких разрезов и безотходного разделения; малая зона термического влияния; минимальное механическое воздействие, оказываемое на разделяемый материал; возможность автоматизации процесса; возможность резки по заданному профилю; улучшение гигиены производства. Разделение материалов может быть осуществлено либо при полном удалении материала по линии разреза, либо при частичном удалении материала, например, при образовании системы отверстий малого диаметра в разрезаемой пластине по линии разделения с последующим разломом. Последний метод разделения называется скрайбированием. Метод резки материалов лучом лазера с подачей в зону реза кислородной струи (газолазерная резка) заключается в следующем. Излучение лазера с помощью соответствующей оптической системы фокусируется на поверхность обрабатываемого материала. Коаксиально падающему излучению в зону реза подается струя кислорода, которая способствует увеличению поглощенной доли излучения вследствие образования на поверхности пленки окисла и удаляет образовавшуюся пленку и расплав из зоны реза до тех пор,

пока материал не будет полностью разрезан. Луч лазера является источником теплоты с высокой концентрацией энергии, что приводит к уменьшению ширины реза, снижению размеров зоны термического влияния и дает более высокую скорость разрезания по сравнению с любым из других методов термической резки. Ширина реза близка к диаметру пятна излучения в фокальной плоскости или несколько меньше, а размер зоны термического влияния составляет 0,05...0,2 мм.

Лазерная обработка отверстий

При разработке процесса лазерной обработки отверстий необходимо: определить значения параметров лазерного излучения - энергии, длительности, расходимости пучка, числа импульсов; выбрать условия обработки: фокусное расстояние рабочего объектива, увеличение окуляра наблюдательной системы; выбрать лазерную технологическую установку; установить методы настройки технологического режима лазерной установки; предусмотреть (в случае необходимости) меры дополнительного повышения качества лазерного сверления исредства автоматизации процесса; определить экономическую эффективность процесса по соответствующим методикам Пичковая структура лазерных импульсов свободной генерацииявляется причиной возникновения в полости обработки значительного количества расплава. Неуправляемое течение жидкости по стенкам и дну отверстия искажает продольную форму отверстия и снижает воспроизводимость размерных результатов обработки. Количественная оценка доли погрешности, вносимой нестабильности пичковой структуры лазерного импульса, затруднена. Заметного снижения погрешности можно достичь при использовании импульсов с упорядоченной структурой.

Ионно-лучевая обработка материалов

Ионно-лучевая технология - это комплекс способов обработки материалов энергетическими потоками ионов, в результате воздействия которых изменяется форма, физико-химические, механические, электрические и магнитные свойства обрабатываемых изделий.

Несмотря на высокую стоимость технологического оборудования и относительную сложность его обслуживания, все больше новейшего оборудования ионно-лучевой технологии появляется в цехах и лабораториях современных производств.

Ионное легирование

Ионное, легирование материалов, или другими словами, ионное внедрение и ионная имплантация. в настоящее время становится основным технологическим процессом из применяемых для модификации электрофизических, химических, оптических, механических и других свойств поверхностных слоев материалов. Метод ионного легирования основан на контролируемом внедрении в материал (твердое тело) ускоренных ионизированных атомов и молекул. Особенно перспективным метод ионного легирования оказался для полупроводниковой электроники. Этот метод обладает преимуществами: универсальность, т.е. возможность введения любой примеси в любой материал; локальность воздействия; отсутствие нагрева подложки; возможность строгого дозирования примесей; простота управления; высокая чистота вводимых примесей и т.д.

Контрольные вопросы к лекции

1.Что такое электростатическая установка? В чем ее отличительные особенности?

2. Каковы физические основы действия электростатических установок?

3. Что такое электрофорез и электроосмос?

4. Изложите принцип действия установки разделения на компоненты сыпучих веществ.

5. Каковы конструкция и принцип действия установки электрогазоочистки в электростатическом поле высокого напряжения?

6. Электрическая схема питания электрофильтра, ее принцип действия.

7. Установки для очистки воды и разделения на компоненты эмульсий и суспензий: конструкция, принцип действия.

8. Каковы конструкции и принцип действия установки для окраски металлических изделий и лакирования изделий из древесины в электростатическом пале?

Список литературы

Основная литература

1. Фомичев А.Н. Электротехнологические технологические установки. – М.: Наука, 2001.

2. Болотов А.В., Шепель Г.А. Электротехнологические установки. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1998.

3. Правила устройства электроустановок. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2004.

4. Электротехнологические промышленные установки. Учебник для вузов. Под ред. А.Д.Свенчанского. – М.: Энергия, 1982.

5. Электротехнический справочник (в 4-х томах). – М.: Изд-во МЭИ, 2003.

Дополнительная литература

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Госэнергонадзор, 2003.

2. Сборник инструктивных материалов Главгосэнергонадзора. Вып.2 – М.: ЗАО «Энергосервис», 2000. – 250 с.

3.Быстрицкий Г.Ф. Энергосиловое оборудование промышленных предприятий. Учебное пособие. –М.: Академия, 2005.

4.Сибикин Ю.Д. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок промышленных предприятий. Учебник. – М.: Академия, 2004. – 50 экз.