

9 УСТАНОВКИ ДУГОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ

9.1 Классификация и область применения сварки

По определению ГОСТ 2601-84* *сварка* – это процесс получения неразъемных соединений деталей посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании.

Существующие способы сварки подразделяют на три класса: термический, термомеханический и механический.

К *термическому* классу относят все виды дуговой, газовой, электрошлаковой, плазменной, электронно-лучевой, лазерной и термитной сварки.

К *термомеханическому* классу относят все виды контактной, диффузионной, высокочастотной и кузнечной сварки.

К *механическому* классу относят холодную, ультразвуковую, магнитно-импульсную сварку, а также сварку трением и взрывом.

Перед другими способами соединения металлических деталей, в частности, клепкой, электрическая сварка имеет следующие преимущества: высокая производительность труда; значительная экономия металла (25-30%); высокая прочность и плотность сварных соединений; меньшая трудоемкость изготовления и себестоимость изделий.

Электрическую сварку широко применяют при изготовлении котлов и сосудов высокого давления, подъемно-транспортных сооружений, вагонов, автомобилей, самолетов, ракет, атомных реакторов, турбо- и гидроагрегатов, сельскохозяйственных машин, поршневых и реактивных двигателей, химической аппаратуры, а также в качестве основных процессов в строительстве гидроэлектростанций, мостовых и строительных конструкций, высотных зданий, в судостроении.

Наиболее широкое применение в промышленности получила электрическая дуговая сварка.

9.2 Сварочная дуга и требования к источникам ее питания

9.2.1 Характеристика сварочной дуги. Электрической дуговой сваркой называют процесс получения неразъемных соединений деталей из различных материалов за счет их сплавления с помощью электрической дуги.

Сварочной дугой называют дугу, представляющую собой длительный устойчивый электрический разряд в газовой среде между электродом и изделием либо между электродами, отличающуюся большим количеством тепловой энергии и сильным световым излучением.

Различают следующие сварочные дуги:

- по характеру среды, в которой происходит дуговой разряд: *открытая*, горящая в воздухе; *закрытая*, горящая под слоем флюса; *защитная*, горящая в защитном газе (аргон, гелий, азот, углекислый газ, водород и т.д.);

- по роду тока – *переменного* и *постоянного* тока. Сварка на постоянном токе производится при прямой (минус на электроде) или обратной (плюс на электроде) полярности;

- по типу электрода – с *плавящимся* (металлическим) и *неплавящимся* (угольным, вольфрамовым, керамическим и др.) электродом;

- по характеру воздействия дуги как источника тепла на свариваемый металл – *прямого*, *косвенного* и *комбинированного* действия;

- по длительности горения – *непрерывную* и *импульсную*;

- по степени механизации – *ручную*, *механизированную* и *автоматическую*.

Ручная дуговая сварка выполняется электродами, перемещение которых, манипуляции их рабочими торцами и поддержание постоянной длины дуги осуществляются вручную; *механизированная* – при механической подаче электродной проволоки с бухты (катушки) и ручном перемещении дуги; *автоматическая* – при механической подаче электродной проволоки и перемещении дуги.

В связи с тем, что теплота, выделяемая сварочной дугой, не вся переходит в сварной шов, а часть теплоты теряется бесполезно на нагрев окружающего воздуха, плавление электродного покрытия или флюса, угар, разбрызгивание металла и т.п., то это приводит к уменьшению КПД. Так, коэффициент полезного действия при сварке открытой дугой составляет 0,5-0,65; электродами с покрытием – 0,7-0,85; под слоем флюса – 0,8-0,92; в среде защитных газов – 0,5-0,6.

9.2.2 Классификация источников питания для дуговой сварки и требования, предъявляемые к ним. Специфическим свойством сварочных источников тока является способность выдерживать многочисленные технологические короткие замыкания во вторичной цепи. Они происходят при зажигании дуги касанием электродов, а также во время сварки, когда скорость подачи плавящего электрода не согласуется со скоростью его плавления.

Источники питания (ИП) сварочной дуги разделяют по следующим признакам:

1) *по назначению* – для ручной дуговой сварки, для механизированной и автоматической сварки в среде защитных газов, для механизированной и автоматической сварки под слоем флюса;

2) *по роду тока* – переменного (сварочные трансформаторы и однофазные электромашинные генераторы повышенной частоты), постоянного (сварочные выпрямители и электромашинные генераторы постоянного тока);

3) *по способу установки* – стационарные и передвижные;

4) *по количеству обслуживаемых постов* – одно- и многопостовые.

Кроме того, ИП различают по конструктивному исполнению, мощности (малой, средней, большой), схеме подключения к сети (одно- и многофазные), назначению (универсальные и специальные).

Каждый источник питания характеризуется следующими величинами: номинальным сварочным током, диапазоном регулирования тока, напряжением на зажимах под нагрузкой, напряжением холостого хода, КПД, коэффициентом мощности, продолжительностью работы (ПР) или продолжительностью включения (ПВ), внешней характеристикой.

Продолжительность работы определяется как отношение продолжительности рабочего периода ИП к длительности полного цикла работы.

Он выражается в процентах:

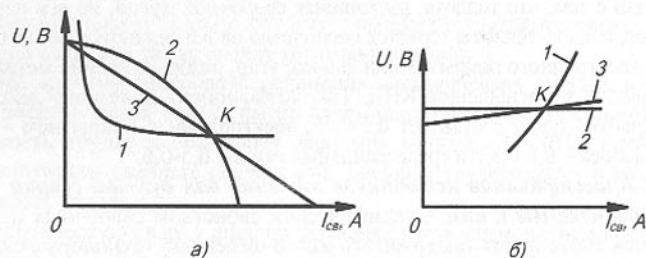
$$PP = (\tau_p / \tau_{\text{ц}}) \cdot 100,$$

где τ_p - время работы под нагрузкой;

$\tau_{\text{ц}}$ - длительность полного цикла.

Условно принято считать, что в среднем $\tau_p = 3$ мин, $\tau_{\text{ц}} = 5$ мин, т.е. среднее оптимальное значение $PP = 60\%$. ПР отличается от ПВ тем, что в первом случае ИП во время паузы не отключается от сети, а работает в режиме холостого хода, во втором случае ИП полностью отключается от сети.

Зависимость напряжения источника питания от тока нагрузки называется *внешней характеристикой*. Внешние характеристики источника питания могут быть *крутопадающими, пологопадающими, жесткими и возрастающими* (рис. 9.1).



Падающие (2 и 3) внешние характеристики источника питания при жесткой (1) статической характеристике дуги (а); жесткая (2) и возрастающая (3) внешние характеристики источника питания при возрастающей (1) статической характеристике дуги (б)

Рисунок 9.1 – Внешние характеристики источника питания для дуговой сварки и ВАХ дуги

Для устойчивого горения дуги необходимо соответствие формы внешней характеристики источника питания форме статической характеристики дуги.

При ручной и автоматической сварке под флюсом с автоматическим регулированием напряжения на дуге, когда ВАХ дуги слабопадающая или жесткая (рис. 9.1, а, кривая 1), внешняя характеристика ИП должна быть крутопадающей (рис. 9.1, а, кривая 2). Чем больше крутизна падения ВАХ источника питания в рабочей точке К, тем меньше колебания тока при случайных изменениях длины дуги и условий ее горения. При таких характеристиках напряжение холостого хода ИП в 1,8–2,4 раза больше напряжения дуги. Кроме того, ограничивается значение тока короткого замыкания в пределах $1,25 < I_k / I_0 < 2$.

При автоматической сварке под флюсом с саморегулированием дуги, имеющей жесткую характеристику, ВАХ ИП должна быть пологопадающей (рис. 9.1, а, кривая 3) для повышения саморегулирования дуги. При сварке в среде защитных газов в условиях большой плотности постоянного тока в электроде ВАХ дуги возрастающая (рис. 9.1, б, кривая 1). В этом случае внешняя характеристика ИП должна быть жесткой или возрастающей (рис. 9.1, б, кривые 2,3).

Критерием оценки динамических свойств источников питания служит скорость нарастания напряжения на его зажимах при переходе от режима КЗ к режиму холостого хода. Особенно важно время нарастания напряжения от нуля до значения достаточного для возбуждения дуги, и время восстановления напряжения. По ГОСТу оно не должно превышать 0,03с.

Поэтому для дуговой сварки создаются специальные источники питания постоянного и переменного токов, которые должны:

- иметь напряжение холостого хода в момент зажигания дуги достаточное для ее возбуждения, но не превышающее предельных, безопасных для жизни сварщика. При сварке постоянным током металлическим электродом $U_0 = 30-40$ В, а для угольного электрода – $U_0 = 45-55$ В. При сварке переменным током $U_0 = 50-60$ В;
- надежно работать в режимах частых технологических КЗ;
- иметь внешнюю характеристику, соответствующую ВАХ дуги, и иметь достаточную мощность;
- снабжаться специальными устройствами для плавного регулирования тока;
- соответствовать требованиям удобства эксплуатации и экономичности.

9.3 Источники питания сварочной дуги постоянного тока

Источники питания постоянного тока подразделяются на сварочные преобразователи, сварочные агрегаты и выпрямительные установки.

Сварочный преобразователь состоит из генератора постоянного тока и приводного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя; **сварочный агрегат** – из генератора и двигателя внутреннего сгорания (бензинового или дизельного).

Выпрямительные сварочные установки собирают из селеновых или кремниевых полупроводниковых элементов.

Сварочные преобразователи (генераторы) постоянного тока подразделяются на:

- многопостовые и однопостовые;
- стационарные и передвижные с падающими, жесткими, возрастающими или пологопадающими внешними характеристиками;
- однокорпусные (сварочный генератор и двигатель на одном валу, в одном корпусе) и отдельные (сварочный генератор и двигатель выполнены на общей раме, а их валы соединены муфтой) и т.д.

9.3.1 Многопостовые сварочные генераторы. Сварочные генераторы с жесткими и пологопадающими внешними характеристиками используются либо как многопостовые источники питания, либо как однопостовые для питания автоматов и полуавтоматов с постоянной скоростью подачи электродной проволоки.

Многопостовой генератор (рис. 9.2) представляет собой машину постоянного тока смешанного возбуждения, которое обеспечивает достаточно жесткие внешние характеристики во всем диапазоне нагрузки.

Для этого потоки возбуждения обмоток 1 и 3 направлены согласно, а напряжение холостого хода устанавливается реостатом 2. Каждый сварочный пост включается через балластное сопротивление 4. Исходя из напряжения многопостового генератора 60 В и напряжения дуги 20 В, балластный реостат обычно рас-

считывается на погашение напряжения около 40 В. Применение балластных реостатов в установках многопостовой сварки является вынужденным решением, обеспечивающим независимое устойчивое горение дуги каждого поста и позволяющее регулировать ток сварки в широких пределах.

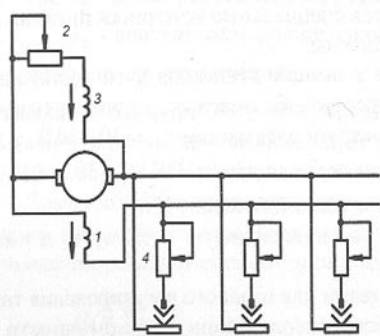


Рисунок 9.2. – Схема многопостового преобразователя с балластными реостатами

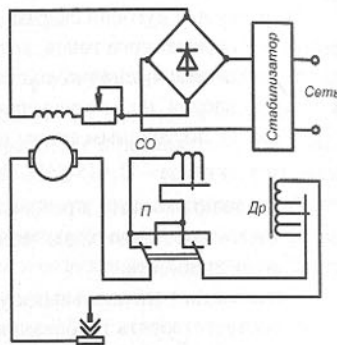


Рисунок 9.3. – Схема универсального сварочного генератора

Универсальный сварочный генератор имеет возможности менять форму внешней характеристики и регулировать динамические свойства. Так, в генераторе, выполненном по схеме смешанного возбуждения (рис. 9.3), переход с падающей характеристики на жесткую осуществляется переключением последовательной обмотки *СО* со встречного включения на согласное и соответствующим изменением числа включенных витков; регулируемый дроссель *ДР* позволяет получить требуемые динамические свойства. Выпускающийся промышленностью преобразователь ПСМ-1000 рассчитан на одновременное питание девяти постов со сварочным током 200 А или шести постов со сварочным током 300 А.

Достоинствами установок для многопостовой сварки являются: снижение стоимости оборудования и эксплуатационных расходов на единицу полезной мощности; экономия производственной площади; повышенная надежность в эксплуатации.

Наряду с этим установки для многопостовой сварки обладают существенными недостатками: значительными потерями электроэнергии в балластных реостатах и меньшей маневренностью оборудования при стационарной установке сварочного преобразователя.

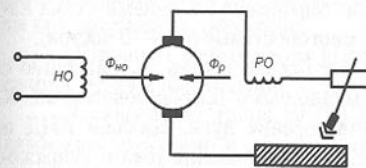
9.3.2 Однопостовые сварочные генераторы. Они существенно отличаются от многопостовых по своим внешним характеристикам и конструктивному исполнению. Поскольку однопостовой генератор питает сварочную дугу непосредственно (без балластного реостата), его внешняя характеристика должна быть, как правило, крутопадающей. Он должен обладать незначительной магнитной инерцией и быстро восстанавливать напряжение после коротких замыканий в сварочной цепи.

Однопостовые генераторы должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) напряжение холостого хода должно быть больше напряжения зажигания дуги;

- 2) величина тока КЗ не должна превышать величину рабочего тока больше, чем на 40%;

- 3) сварочный ток должен регулироваться в широких пределах.



Простейшим однопостовым сварочным генератором является генератор с размагничивающей обмоткой, включенной последовательно с якорем.

Схема такого сварочного генератора приведена на рис. 9.4, где *НО* - независимая обмотка возбуждения, создающая магнитный поток $\Phi_{НО}$, а *РО* - размагничивающая обмотка, создающая поток $\Phi_{Р}$, направленный встречно потоку $\Phi_{НО}$.

Рисунок 9.4 – Принципиальная схема сварочного генератора с размагничивающей обмоткой

При холостом ходе генератора размагничивающий поток $\Phi_{Р}=0$ и напряжение генератора будет равно:

$$U_0 = C \cdot \Phi_{НО}, \quad (9.1)$$

где *C* - постоянная величина.

При нагруженном генераторе напряжение на сварочной дуге будет равно:

$$U_d = C \cdot (\Phi_{НО} - \Phi_{Р}) - I_d \cdot R_{я} \quad (9.2)$$

где I_d - ток дуги;

$R_{я}$ - сопротивления якоря генератора.

Магнитный поток $\Phi_{Р}$ с увеличением тока I_d увеличивается, вследствие чего внешняя характеристика сварочного генератора получает требуемый от нее падающий вид (рис. 9.5). Регулирование тока короткого замыкания $I_{К}$ производится изменением тока независимого возбуждения (рис. 9.5, а) или переключением числа витков размагничивающей обмотки *РО* (рис. 9.5, б).

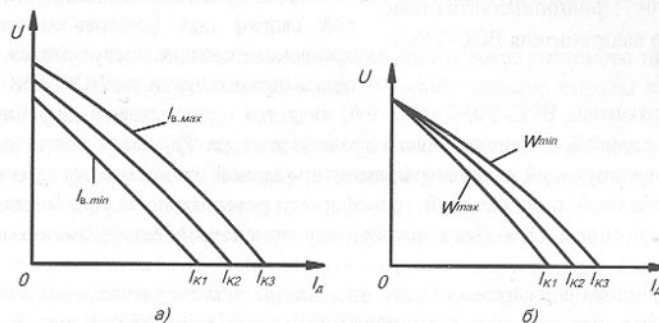


Рисунок 9.5 – Внешние характеристики генератора с размагничивающей обмоткой

9.3.3 Сварочные выпрямители. Выпрямители для дуговой сварки состоят из трансформатора с регулирующим устройством, выпрямительного блока, измерительной и защитной аппаратуры. Иногда в комплект выпрямителя входит дроссель, включаемый в цепь постоянного тока для создания определенных динамических характеристик. Выпрямители выпускаются одно- и многопостовые (на 4-30 постов).

Сварочные выпрямители имеют значительные преимущества по сравнению с другими источниками питания, в том числе с машинными преобразователями. К преимуществам относятся: высокая стабильность горения дуги, высокий КПД и меньшие потери холостого хода, широкие пределы регулирования тока и напряжения, равномерная нагрузка силовой сети переменного тока и лучшее использование трансформатора, питающего выпрямитель; незначительная электромагнитная инерция и высокие динамические свойства, отсутствие вращающихся частей трущихся контактов обеспечивает их более высокую эксплуатационную надежность и т.д.

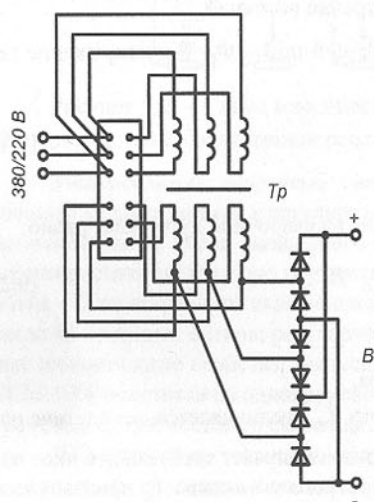


Рисунок 9.6 – Принципиальная схема сварочного выпрямителя ВСС-300-3

Выпрямитель ВСС-300-3 (рис. 9.6) является однопостовой сварочной установкой, состоящей из понижающего трансформатора *Tr*, блока селеновых шайб *В*, пускорегулирующей аппаратуры, смонтированной в общем кожухе, и вентилятора. Трехфазный понижающий трансформатор выполнен с увеличенным магнитным рассеянием. Это обеспечивает получение семейства падающих внешних характеристик.

Регулирование сварочного тока производится за счет изменения потока рассеяния между первичной и вторичной обмотками трансформатора. Изменение пределов регулирования сварочного тока производится переключением обмоток

Почти все сварочные выпрямители отечественного и зарубежного производства собирают по трехфазной мостовой схеме Ларионова с селеновыми или кремниевыми вентилями. КПД селеновых вентилей значительно ниже (до 70%), чем у кремниевых (до 99%), но они дешевле и обладают большей перегрузочной способностью. Селеновые вентили применяются для выпрямителей с жесткими и пологопадающими характеристиками. Для нормальной работы вентилей необходимо, чтобы переходные процессы установления тока КЗ не сопровождались чрезмерно большими и длительными перегрузками вентилей по току. Поэтому необходимы интенсивное охлаждение и защитные устройства.

Для ручной и автоматической дуговой сварки под флюсом отечественной промышленностью выпускаются сварочные выпрямители типов ВСС, ВКС и ВД.

трансформатора со звезды на треугольник.

Выпрямительный блок выполнен по трехфазной мостовой схеме и состоит из трех соединенных параллельно селеновых столбов. Выпрямитель снабжен фильтрами для подавления радиопомех, а также схемой защиты, отключающей его от сети при чрезмерном перегреве.

Основным назначением выпрямителя ВСС-300-3 являются ручная дуговая сварка, резка и наплавление металлов.

Выпрямители типов ВКС-120, ВКС-300 и ВКС-500 с кремниевыми вентилями конструктивно и по схеме аналогичны выпрямителям ВСС. Основным назначением наиболее мощного выпрямителя ВКС-500 являются полуавтоматическая и автоматическая дуговая сварка, а также резка и наплавление металлов.

Однопостовые сварочные выпрямители с падающими внешними характеристиками ВД-306 и ВД-502 выполнены передвижными, рассчитаны на повторнократковременный режим работы при принудительном воздушном охлаждении. Для формирования падающей внешней характеристики и плавного регулирования сварочного тока использован управляемый реактор, включенный во вторичную цепь трансформатора.

Для многопостовой сварки применяются сварочные выпрямители типа ВКСМ и ВДМ, предназначенные для ручной сварки покрытыми электродами, а выпрямители ВДГМ и ВМГ – для автоматической и механизированной сварки плавящимся электродом в углекислом газе.

Развитие полупроводниковой техники позволило создать новые источники с применением тиристоров. Разработанные *тиристорные выпрямители* представляют собой замкнутую систему автоматического регулирования с отрицательной обратной связью по току при падающих внешних характеристиках и положительной обратной связью по выходному напряжению при жестких внешних характеристиках.

Для аргоно-дуговой сварки металлов малых толщин постоянным и импульсным токами применяются *транзисторные преобразователи* серии АП.

9.4 Источники питания сварочной дуги переменного тока

В тех случаях, когда сварка на переменном токе обеспечивает необходимые качества соединения, она обладает следующими преимуществами перед сваркой на постоянном токе:

- 1) меньшая стоимость источников сварочного тока, питаемого непосредственно от сети переменного тока, и, соответственно, меньше затраты на единицу свариваемой продукции;
- 2) простота устройства и высокая степень надежности работы сварочного оборудования переменного тока обуславливает меньшие эксплуатационные расходы на его обслуживание и ремонт;
- 3) меньший расход энергии на единицу свариваемой продукции.

Источниками питания при дуговой сварке на переменном токе являются специальные *сварочные трансформаторы*, обычно подключаемые к сети переменного тока напряжением 220 или 380 В. Они подразделяются на одно- и трехфазные, а по количеству сварочных постов – на одно- и многопостовые.

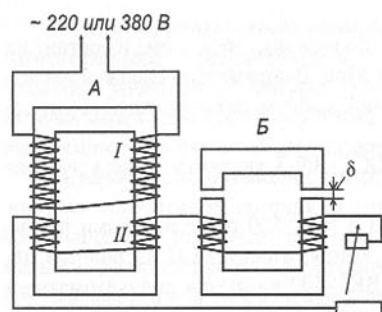


Рисунок 9.7. — Схема сварочного аппарата с отдельным регулятором

Трансформаторы с отдельным дроссельным регулятором (рис. 9.7) в настоящее время не выпускаются, однако, в эксплуатации имеется значительное количество таких трансформаторов четырех типоразмеров: СТЭ-22, СТЭ-23, СТЭ-32 и СТЭ-34 на максимальные сварочные токи (при $PR=65\%$) соответственно 250, 300, 450 и 500 А.

Трансформатор состоит из сердечника *А* с двумя обмотками: первичной *I* и вторичной *II*, создающей напряжение холостого хода 60-65 В. Первичную обмотку подключают к сети напряжением 220 или 380 В.

Регулятор тока — дроссель *Б* состоит из магнитопровода (ярма) и обмотки, расположенной на неподвижной части магнитопровода (якоре). Между ярмом и якорем имеется воздушный зазор δ , изменяя который с помощью регулирующего винта осуществляется плавное регулирование сварочного тока.

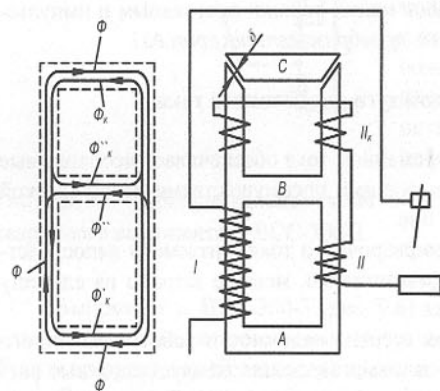


Рисунок 9.8. — Схема трансформатора СТН со встроенным регулятором

Сварочный трансформатор типа СТН со встроенным регулятором (рис. 9.8) отличается от предыдущего тем, что на общем магнитопроводе находятся три обмотки: первичная *I* и вторичная *II* обмотки трансформатора и обмотка регулято-

ра. По способу получения падающих внешних характеристик и регулирования тока различают источники питания двух типов: трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием и дополнительной реактивной катушкой (дросселем), которая может выполняться либо в виде отдельной единицы (рис. 9.7), либо встроенной в общий магнитопровод (рис. 9.8) и трансформаторы с развитым магнитным рассеянием (с подвижными катушками (рис. 9.9, а), с магнитным шунтом (рис. 9.9, б), с витковым ступенчатым регулятором).

При увеличении зазора δ между подвижной и неподвижной частями сердечника электрическое сопротивление (индуктивное) дросселя уменьшается, в результате чего увеличивается ток в сварочной цепи. При уменьшении зазора δ электрическое сопротивление дросселя увеличивается, а ток уменьшается. Наличие дроссельной катушки в цепи создает падающую внешнюю характеристику, благодаря чему напряжение на дуге изменяется в соответствии с колебаниями и изменениями ее длины.

ра *III*к, включенная последовательно со вторичной обмоткой.

Регулирование сварочного тока осуществляется изменением воздушного зазора δ между магнитопроводом и якорем *С*.

К преимуществам трансформаторов этой системы следует отнести компактность, меньший расход меди и трансформаторной стали; при регулировании тока большего значения на меньшее напряжение холостого хода несколько увеличивается, что повышает устойчивость горения дуги.

Трансформаторы с повышенным магнитным рассеянием получили наиболее широкое распространение при ручной дуговой сварке, где регулирование сварочного тока осуществляется изменением расстояния между первичной и вторичной обмотками или подвижным магнитным шунтом.

Это изменяет сопротивление потока рассеяния и индуктивность трансформатора. Чем больше сопротивление шунтирующей цепи, тем меньше индуктивность рассеяния трансформатора и больше сварочный ток. Наибольшее распространение в промышленности получили трансформаторы с подвижными обмотками (рис. 9.9, а) типов СТШ, ТС, ТСК, ТД, а в последнее время ТДМ, которые имеют значительное расстояние между обмотками, вследствие чего часть магнитного потока не охватывает вторичную обмотку *2*. Сближение и удаление обмоток обеспечивает регулирование тока. Для расширения диапазона регулирования первичную обмотку *3* выполняют из двух частей, соединяемых последовательно или параллельно.

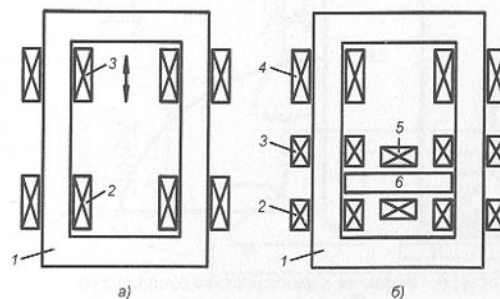


Рисунок 9.9 — Схемы сварочных трансформаторов

Однопостовые сварочные трансформаторы типа ТС, ТСК и ТД используют для ручной дуговой сварки, резки и наплавки. Трансформаторы ТСК отличаются от ТС тем, что в них параллельно первичным обмоткам включены конденсаторы, обеспечивающие повышение коэффициента мощности.

Трансформаторы типов ТД являются усовершенствованными моделями трансформаторов типа ТС.

У трансформаторов с подмагничиваемым шунтом ТДФ вторичная обмотка состоит из двух частей (рис. 9.9 б). Основная часть *2* находится у нижнего ярма сердечника *I*, дополнительная часть *3* расположена вместе с первичной обмоткой *4* у верхнего ярма. Магнитный шунт *6* с подмагничивающей обмоткой управления *5* размещен между основной и дополнительной частями вторичной обмотки. Большой ток подмагничивания шунта обеспечивает большой сварочный ток.

Трансформаторы типов ТДФ-1001, ТДФ-1601 и ТДФ-2001 в основном предназначены для автоматической сварки под слоем флюса. Регулирование сварочного тока в них осуществляется магнитными шунтами, питаемыми постоянным то-

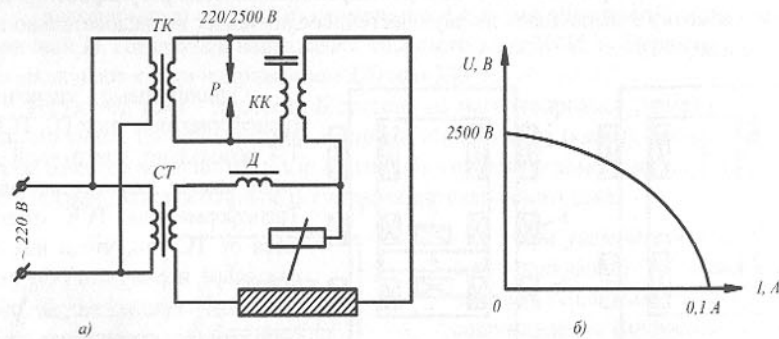
ком от встроенных выпрямителей.

Трансформаторы ТДФ-1001 и ТДФ-1601 имеют, кроме того, ступенчатое регулирование сварочного тока переключением секций вторичных обмоток. Схема управления трансформатором ТДФ-2001 обеспечивает стабилизацию сварочного режима при колебаниях напряжения сети в пределах +5 до -10% номинального значения.

Трансформаторы ТДФ имеют падающие внешние характеристики, в них предусмотрена возможность дистанционного (с пульта управления сварочного автомата) включения и регулирования сварочного тока.

Если поддержание устойчивой дуги переменного тока при сварке на малых токах затруднено или необходимо возбуждение дуги без соприкосновения с изделием (сварка вольфрамовым электродом, аргоно-дуговая сварка и т.п.), применяют **осцилляторы** – вспомогательные аппараты для ионизации дугового промежутка.

По принципу действия осциллятор представляет собой искровой генератор колебаний высокой частоты. Колебательным контуром является цепь, состоящая из индуктивности, емкости и искрового промежутка. На рис. 9.10 представлена схема осциллятора, на которой изображены сварочный трансформатор **СТ**, дроссель **Д**, трансформатор колебательного контура **ТК** и колебательный контур **КК**.



а – присоединение к сварочному посту; б – внешняя характеристика осциллятора

Рисунок 9.10. – Схема осциллятора

При наложении на дуговой промежуток высокого напряжения (2,5-3,5 кВ) поддержание устойчивой сварочной дуги не представляет трудности, так как в дуговом промежутке создаются токопроводящие мостики под влиянием мощной ионизации за счет высокой напряженности электрического поля.

Применение напряжения 2,5-3,5 кВ при нормальной частоте невозможно по условиям техники безопасности; при достаточно же высокой частоте (150-250 кГц) такое напряжение не представляет опасности для сварщика.

Высокое напряжение подается на колебательный контур от повышающего трансформатора **ТК**, первичная обмотка которого может быть включена как на первичное, так и на вторичное напряжение сварочного трансформатора. Вольфрамовые контакты разрядника **Р** снабжаются сильно развитой поверхностью охлаждения в виде стальных дисков.

Осциллятор позволяет успешно зажигать дугу при мощности подводимых к дуговому промежутку высокочастотных колебаний, равной 15-20 Вт.

Повышающий трансформатор осциллятора, питающий колебательный контур, имеет крутопадающую характеристику с небольшим током короткого замыкания (рис.9.10,б).

Промышленность выпускает осцилляторы типа ОСПЗ-2М, ОСЦВ-2, М-3, ОСПЗ-300М и др. на параллельное и последовательное включение в сварочную цепь.

Для **многопостовой сварки** можно использовать любой сварочный трансформатор с жесткой внешней характеристикой. При этом к каждому посту должен быть подсоединен дроссель, обеспечивающий падающую характеристику цепи.

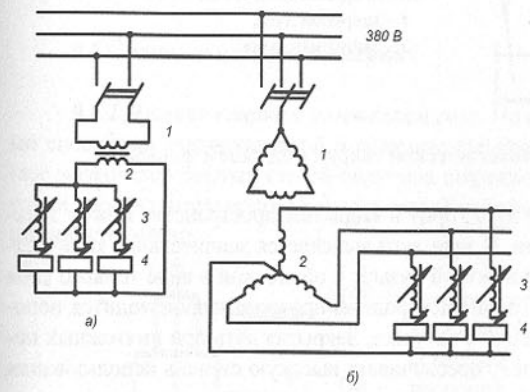
Количество подключаемых к трансформатору постов:

$$n = I_{н.тр} / (k \cdot I_{н.п}), \quad (9.3)$$

где $I_{н.тр}$ – номинальный ток сварочного трансформатора, А;

$I_{н.п}$ – сварочный ток поста, А;

k – коэффициент загрузки (0,6-0,8).



а – однофазного; б – трехфазного

Рисунок 9.11. – Схемы многопостовой сварки на переменном токе от источника питания с жесткой внешней характеристикой

Электрическая схема многопостовой сварки на переменном токе показана на рис. 9.11. Первичная обмотка **1** подключается к питающей сети.

Фазное напряжение вторичной обмотки **2** составляет 65-70 В. Регулирование сварочного тока и обеспечение падающей характеристики производится установленными на каждом посту **4** регуляторами тока – дросселями **3**.

Многопостовая сварка осуществляется от однофазного (рис.9.11, а) или трехфазного (рис.9.11,б) трансформатора.

9.5 Автоматическая дуговая сварка

С развитием сварочной техники и ростом объема сварочных работ выявились существенные недостатки ручной дуговой сварки: низкая производительность (один варщик выполняет при обычных толщинах свариваемого металла 5-10 м шва

в час), следствием чего является высокая стоимость сварочных работ; зависимость качества шва от квалификации и условий работы сварщика; потери дорогого электродного материала на огарки, угар и разбрызгивание.

Для осуществления непрерывной автоматической сварки необходимо было перейти от применения штучных электродов к электродной проволоке, сматываемой по ходу сварочного процесса с бухты.

Основной трудностью в решении проблемы автоматической сварки оказалось сочетание принципа непрерывной подачи электродной проволоки с необходимостью защиты металла шва и электрода при помощи обмазок. Простым и рациональным решением этой проблемы оказалось применение голой электродной проволоки с подачей сыпучего защитного флюса в зону сварки. Этот способ получил название *автоматической сварки под слоем флюса* (рис. 9.12).

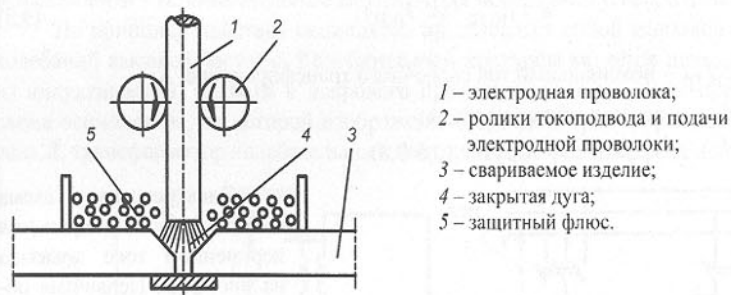


Рисунок 9.12- Принцип автоматической сварки под слоем флюса

При таком способе сварки дуга горит в закрытом пространстве между электродом и свариваемыми деталями. В зоне дуги выделяется значительное количество газов и паров, создающих парогазовый пузырь с оболочкой в виде тонкого слоя расплавленного флюса. Подача голой электродной проволоки производится непосредственно с бухты, разматываемой с катушки. Закрытая дуга при ничтожных потерях теплоты в окружающую среду обеспечивает высокую степень использования мощности источника сварочного тока и выгодные условия получения высококачественного однородного шва без заметного воздействия кислорода и азота воздуха на сварочную ванну.

Автоматическая сварка под слоем флюса дает возможность работать на токах 1000-3000 А и выше, тогда как при ручной дуговой сварке максимальный сварочный ток обычно не превышает 700 А. Производительность при автоматической сварке под слоем флюса обычно составляет 50-150 м шва в час.

Технология и оборудование для автоматической сварки под слоем флюса разработаны в Институте электросварки АН УССР под руководством академика Е.О. Патона.

К установкам для механизированной и автоматизированной сварки под слоем флюса относятся сварочные полуавтоматы, сварочные автоматы и сварочные тракторы.

Сварочные полуавтоматы обеспечивают сварку и наплавку с механизиро-

ванной подачей проволоки и других сварочных материалов в зону горения дуги и ручным перемещением дуги вдоль линии сварного шва.

Сварочные автоматы обеспечивает механизированное возбуждение и поддержание дугового разряда, подачу сварочных материалов и перемещение дуги вдоль линии сварки, выключение дуги. С помощью автоматической сварки изготовляют наиболее ответственные конструкции – корпуса котлов, трубы большого диаметра, цистерны, несущие конструкции сооружений, корпуса морских судов и др.

Сварочные автоматы снабжены механизмами передвижения, корректировки направления и положения электрода, сматывания электродной проволоки, устройствами подачи и отсоса флюса. Они осуществляют подачу проволоки с постоянной или регулируемой скоростью. Для выполнения сварочных операций автоматы могут быть подвесными, самоходными, а также в виде сварочных тракторов общего или специального назначения.

Сварочный трактор – самоходный агрегат для сварки в основном под флюсом, несущий на самоходной тележке подающий механизм, сварочную горелку, механизм настроечных и корректировочных перемещений, флюсовую аппаратуру, систему управления. Многие конструктивные узлы трактора унифицированы с узлами автоматов и полуавтоматов. Существуют тракторы, перемещающиеся по изделию и перемещающиеся по рельсам.

9.6 Специальные виды сварки

9.6.1 Дуговая сварка в углекислом газе. По сравнению с ручной и некоторыми способами автоматической и полуавтоматической сварки сварка в углекислом газе низкоуглеродистых сталей получила широкое распространение благодаря высокой производительности процесса, малой токсичности выделяемых газов и самой низкой стоимости.

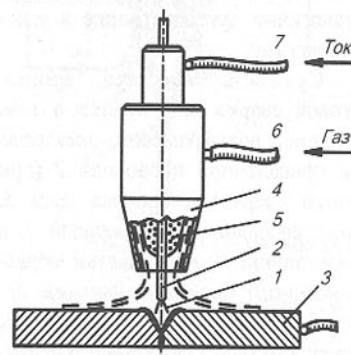


Рисунок 9.13 – Схема сварки в углекислом газе

Дуга 1 (рис. 9.13) горит между голой электродной проволокой 2 и свариваемыми деталями 3 в пространстве, заполненном углекислым газом. Струя газа, непрерывно вытекающая из сопла 4, защищает металл от воздействия кислорода и азота воздуха. Электродная проволока диаметром 0,5-2 мм подается в зону сварки механически через токоподводящий наконечник 5. Ток подводится кабелем 7, газ – шлангом 6.

Сварка обычно осуществляется постоянным током обратной полярности (плюс на электроде) силой 35-500 А. Вследствие большой плотности тока проволока и кромки деталей быстро расплавляются и процесс сварки протекает на высоких скоростях.

Сварка в углекислом газе имеет следующие преимущества: не требуется обмазок и флюсов; сварка ведется голой стальной проволокой; дуга не закрыта флю-

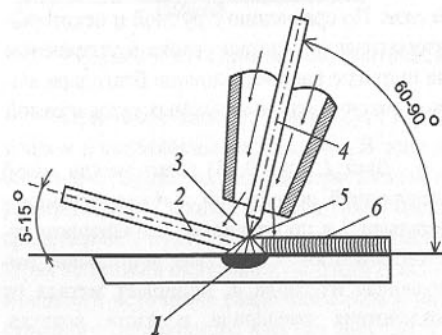
сом, сварщик может управлять ею при сварке различных швов; высокая производительность (до 18 кг/ч наплавляемого металла); не требуются дефицитные материалы.

Сварка плавящимся электродом в среде углекислого газа выполняется автоматами и полуавтоматами. Одними из наиболее распространенных в промышленности являются шланговые полуавтоматы А-547Р, А-825М и полуавтоматы ПДГ-301-1, ПДГ-303-1, ПДГ-304-1, ПДПГ-500-1 и др.

Для сварки в среде углекислого газа применяются следующие источники постоянного тока: преобразователи ПСО-300, ПС-500, ПС-500-3 и ПСМ-1000, предназначенные также для питания сварочной дуги при ручной дуговой сварке и сварке под слоем флюса; сварочные преобразователи ПСГ-350, ПСГ-500 и ПСУ-500 с жесткими внешними характеристиками; сварочные выпрямители ВС-200, ВС-300 и ВС-600, предназначенные для автоматической и полуавтоматической сварки, в том числе для сварки в углекислом газе.

Горелки для полуавтоматической и автоматической сварки в углекислом газе обычно выполняются двух типов: для сварки на малых токах (до 300 А) без водяного охлаждения и для сварки на больших токах с водяным охлаждением.

9.6.2 Аргоно-дуговая сварка. При аргоно-дуговой сварке источником теплоты является дуга, которая горит между концом электрода и свариваемым изделием в струе инертного газа - аргона, защищающего расплавляемый металл от вредного воздействия окружающего воздуха.



Существует два вида аргоно-дуговой сварки: с неплавящимся вольфрамовым электродом (рис. 9.14) и непрерывно подаваемым в зону сварки плавящимся электродом (аналогично дуговой сварке в углекислом газе).

Сущность процесса аргоно-дуговой сварки заключается в том, что конец вольфрамового электрода 4 и присадочной проволоки 2 (при ручной сварке), сварочная дуга 5, ванна расплавленного металла 1 и прилегающие к ней участки нерасплавленного металла защищены аргоном, непрерывно вытекающим струей 3 из сопла сварочной горелки.

Рисунок 9.14 – Схема аргоно-дуговой сварки с неплавящимся вольфрамовым электродом

Оболочка аргона защищает расплавленный металл и прилегающий к нему нерасплавленный металл, нагретый до высокой температуры, и сварной шов 6 от образования окислов и других соединений в контакте с окружающим воздухом.

Основными достоинствами аргоно-дуговой сварки являются:

1) высокое качество шва вследствие надежной защиты от воздуха металла шва, электрода и присадочного металла;

- 2) нет необходимости применять специальные электроды или флюсы и связанную с ними последующую очистку шва от шлака и флюса;
- 3) простота механизации благодаря малому расходу вольфрамового электрода;
- 4) возможность сварки изделий очень малой толщины.

Аргоно-дуговую сварку применяют при изготовлении конструкций из жаропрочных и жаропрочных сталей, а также цветных металлов (алюминия, меди, магния, титана, циркония, тантала, ниобия) и их сплавов.

Аргоно-дуговая сварка ведется на постоянном и переменном токе. Сварку постоянным током можно выполнять на прямой и обратной полярности.

В качестве источника питания дуги постоянного тока применяют обычные сварочные генераторы с балластными реостатами РБ-200 или РБ-300, включаемыми в сварочную цепь для регулирования тока при малых его значениях и для обеспечения устойчивости горения дуги.

При сварке на переменном токе в схему включается осциллятор для облегчения зажигания дуги и для повышения ее устойчивости. Для аргоно-дуговой сварки вольфрамовым электродом целесообразно применение сварочных трансформаторов с повышенным напряжением холостого хода (130-200 В).

Для аргоно-дуговой сварки применяют горелки типов ЭЗР-3-58, ГРАД-200, ГРАД-400, ГРАД-3, АР-10 и др., а также аппараты УДАР-300, УДАР-500, АДНГ-300, АСДВ-1М (для переменного тока); АГВ-2 и АТВ (для постоянного тока).

9.6.3 Плазменно-дуговая сварка и резка. Для сварки и резки металлов применяют плазматроны прямого или косвенного действия.

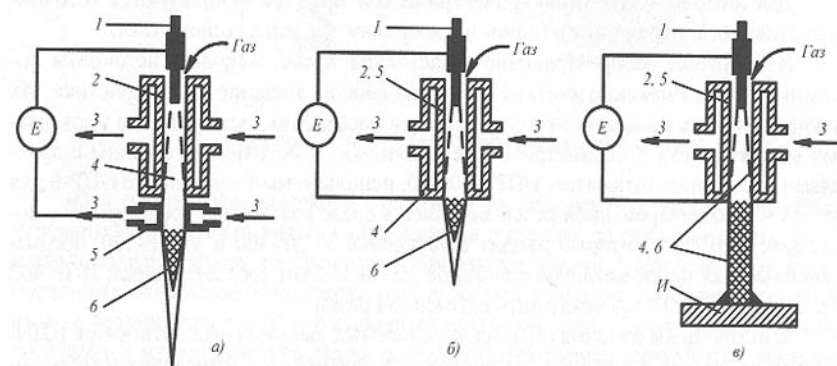


Рисунок 9.15 – Схемы устройств для создания плазменной струи

На рис. 9.15 показаны три схемы устройства для получения плазменной струи. В плазматронах косвенного действия (рис. 9.15, а) дуга 4 горит между электродом 1 и электродом 5, который является соплом, отделенным от канала; в схеме на рис. 9.15, б соплом является выходное отверстие канала; в плазматроне прямого действия (рис. 9.15, в) сопло также совмещено с выходным отверстием канала, а дуга 4 горит между электродом 1 и соплом и изделием. Схема рис. 9.15, в может быть применена только для плазменной обработки электропроводных материалов.

Через канал 2 вдоль столба дуги пропускается газ, который, проходя по направлению от электрода 1 к соплу, ионизируется и выходит из сопла в виде плазменной струи 6. Канал и отдельное сопло имеют водяное охлаждение 3. Напряжение дуги и мощность плазменной струи регулируются изменением уровня погружения электрода 1 в канал.

Для осуществления плазменной сварки, резки и поверхностной обработки используют преимущественно плазмотроны постоянного тока, обеспечивающие двойное сжатие дугового разряда: каналом сопла и плазмообразующим газом.

Плазмотроны переменного тока применяются в ряде случаев в силу технологических требований процесса. Например, плазменную сварку алюминия и его сплавов необходимо вести на переменном токе, так как в моменты, когда деталь становится катодом, разрушается тугоплавкий оксид алюминия и формируется качественное сварное соединение. Существенным недостатком плазмотронов переменного тока является меньшая стабильность горения дуги, обусловленная прохождением тока через нуль, что может вызвать погасание дуги.

В Институте электросварки им. Е.О. Патона разработаны надежные в эксплуатации и удовлетворяющие всем требованиям машинной резки металлов плазмотроны ВПР-10 мощностью 50 кВт и ВПР-9 мощностью 100 кВт. Эти плазмотроны успешно применяются при плазменной резке металлов средних толщин (до 60 мм).

Для ручной микроплазменной сварки на переменном и постоянном токах до 30 А применяются плазмотроны ОБ-1160А.

Для питания плазмотронов электрической энергией используются источники постоянного, переменного (одно- и трехфазного) и импульсного тока.

Наибольшее распространение в настоящее время получили источники постоянного тока, имеющие жесткие и крутопадающие внешние характеристики. Их можно разделить на источники с дросселями насыщения, источники на управляемых выпрямителях и параметрические источники. К источникам питания с дросселями насыщения относятся: ИПР-120/600, используемый в установке ОПР-6 для ручной и механизированной резки металлов в среде азота или в среде аргона с водородом; ИПГ-500, который входит в установки УГЭР-300 и УГЭР-500, предназначенные для резки металлов толщиной до 30-150 мм соответственно; ВПР-402 установки АПР-401 для воздушно-плазменной резки.

К источникам питания (ИП) на управляемых выпрямителях относятся ИПН-160/600, входящий в комплект установок для плазменного напыления и металлизации УПУ-3 и УПУ-3М, снабженные механизмом перемещения магнитных шунтов. Наибольшее распространение получили ИП на тиристорах. Этими ИП снабжаются установки типа АПР-402; УПР-201. Работа параметрических источников питания основана на принципе стабилизации и регулирования тока дуги с помощью мощных транзисторов; такие ИП генерируют ток 30-100 А и напряжение холостого хода 40В. Они входят в комплект установок АП-4, АП-5, предназначенных для плазменной и микроплазменной сварки.

9.6.4 Электрошлаковая сварка (ЭШС). Используется в промышленности для соединения металлов повышенной толщины: стали, чугуна различного состава, меди, алюминия, титана и их сплавов. С помощью ее можно сваривать металл практически любой толщины (до 2500 мм), расположенный в вертикальном или

наклонном до 30 градусов положении.

ЭШС разработана и внедрена в производство Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. Принцип ее состоит в расплавлении электродного металла и оплавлении основного (свариваемого металла) за счет выделения теплоты при протекании тока через расплавленный шлак (флюс), обладающий достаточной электропроводностью.

Схема процесса показана на рис. 9.16.

Один (рис. 9.16, а) или несколько (рис. 9.16, б) сварочных электродов 4 вводятся в зазор между свариваемыми деталями 1. Формирование сварного шва осуществляется двумя медными водоохлаждаемыми ползунами 2, перемещаемыми по изделию автоматически со скоростью, равной скорости сварки.

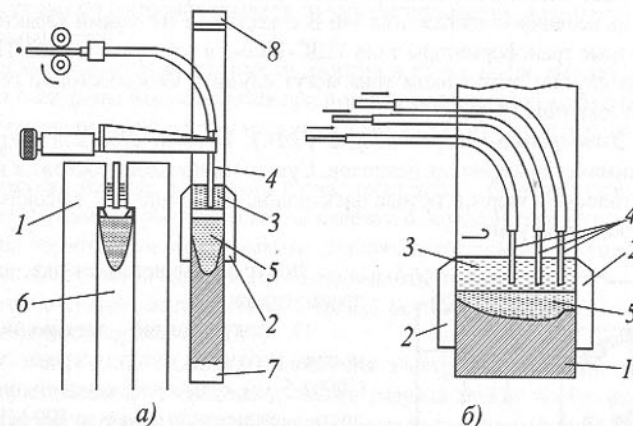


Рисунок 9.16 – Схема электрошлаковой сварки

Для обеспечения высокого качества и однородности сварного соединения начальный и конечный участки шва должны выходить за пределы длины свариваемых изделий. Снизу к изделию привариваются планки 7, дающие возможность образовать начальную зону сварки (ванну жидкого металла 5). Сварка заканчивается на верхних планках 8, где выводится шлаковая ванна. После окончания сварки планки с излишними участками шва удаляются газовой резкой или механическим способом.

Питание ЭШС может производиться как постоянным, так и переменным током; при этом применяют обычно плавящиеся проволочные, пластинчатые или ленточные (толщиной 1-2 мм) металлические электроды. Источники питания ЭШС должны быть с жесткой или несколько возрастающей внешней характеристикой, т.е. с увеличением сварочного тока в ванне жидкого металла напряжение ИП должно быть неизменным или несколько повышаться. Падение напряжения в шлаковой ванне обычно составляет 30-50 В.

Аппараты для ЭШС принято различать на следующие основные виды:

1) *рельсовые аппараты* с перемещением по вертикальным рельсам или по специальным направляющим;

2) *безрельсовые аппараты* с перемещением непосредственно по свариваемым изделиям за счет механического сцепления с ними;

3) *шагающие аппараты* с перемещением непосредственно по свариваемым изделиям и сцеплением с ними при помощи системы электромагнитов.

Наибольшее распространение в промышленности получил рельсовый трех-электродный универсальный аппарат типа А-372Р для сварки стыковых, угловых и тавровых соединений. Аппарат позволяет производить сварку как проволочными, так и пластинчатыми электродами.

К безрельсовым аппаратам для ЭШС относятся аппараты типов А-306, А-340, А-350 и А-612.

В качестве источников тока при ЭШС обычно применяют сварочные трансформаторы на первичное напряжение 380 В с жесткими внешними характеристиками – трехфазные трансформаторы типа ТШС-1000-3 и однофазные типа ТШП-10-1. В некоторых случаях источником тока могут служить многопостовые генераторы постоянного тока типа ПСМ-1000.

9.6.5 Электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Применяется для сварки тугоплавких и химически активных металлов. Сущность процесса состоит в использовании кинетической энергии потока электронов, движущихся с высокими скоростями в глубоком вакууме.

Электронно-лучевая сварка имеет ряд преимуществ:

1) фокусировкой электронного луча можно получить пятно нагрева диаметром 0,0002-5 мм с высокой концентрацией мощности электронного пучка до 500 МВт/см² облучаемой поверхности, что позволяет сваривать за один проход металлы толщиной от десятых долей миллиметра до 200 мм, керамику и т.д. Уменьшение протяженности зоны термического влияния снижает вероятность рекристаллизации основного металла в зоне сварки;

2) малое количество вводимой теплоты в 4-5 раз меньше, чем при дуговой сварке. В результате резко снижается коробление изделия;

3) отсутствует окисление и насыщение расплавленного металла газами, что обеспечивает высокое качество сварного соединения деталей даже из весьма тугоплавких металлов, например, из молибдена и вольфрама, не поддающихся дуговой и газовой сварке.

ЭЛС может производиться непрерывным электронным лучом с частотой импульсов 100-500 Гц.

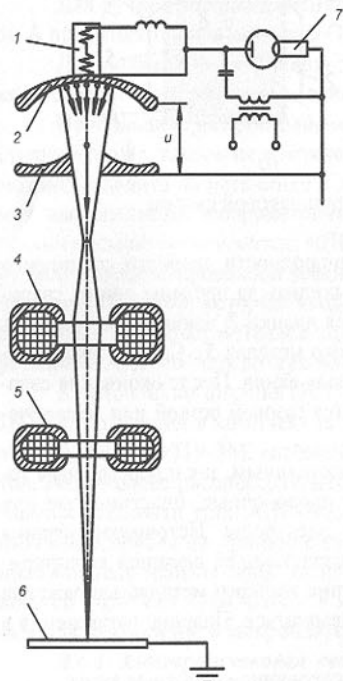


Рисунок 9.17 – Схема сварки электронным пучком

Схема процесса сварки и основные элементы электронной пушки показаны на рис. 9.17. За счет нагревателя 1 обеспечивается высокая температура катода 2, необходимая для термоэлектронной эмиссии. На некотором расстоянии от катода располагается второй электрод 3 (анод) с отверстием.

Поверхности обоих электродов имеют определенные формы, обеспечивающие создание электронного пучка диаметром, близким к диаметру отверстия в аноде. За счет высокой разности потенциалов между анодом и катодом, составляющей десятки тысяч вольт, эмитированные катодом электроны, двигаясь к аноду, приобретают значительную скорость и кинетическую энергию.

Пройдя через отверстие в аноде, электроны стремятся двигаться по инерции прямолинейно и равномерно, однако, за счет отталкивания друг от друга одинаково заряженных электронов диаметр пучка увеличивается, а плотность энергии в пучке уменьшается.

С целью увеличения плотности энергии в пучке после выхода из анодного отверстия электроны фокусируются при помощи специальной магнитной линзы 4, а для перемещения луча по свариваемому стыку служит магнитная отклоняющая система 5.

Сфокусированные в плотный пучок электроны с большой скоростью бомбардируют ограниченную площадку на изделии 6, в результате чего энергия электронов при торможении в свариваемых деталях превращается в теплоту и нагревает небольшой участок изделия до весьма высокой температуры.

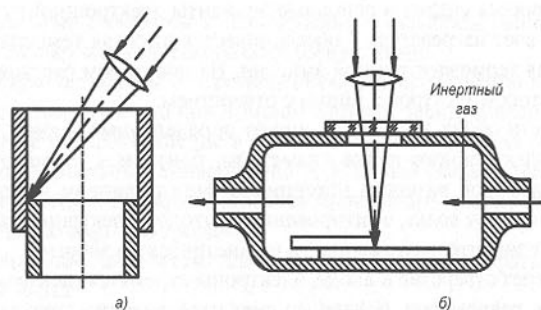
Питание пушки электрической энергией осуществляется от высоковольтного источника постоянного тока 7.

Для обеспечения свободного движения электронов, для защиты катода от окисления, а также во избежание дугового разряда между электродами в электронно-лучевой установке создается весьма низкое давление (порядка 0,01 Па).

Ток электронного пучка можно регулировать двумя способами – изменением температуры катода и изменением напряжения между анодом и катодом. В простейшей сварочной электронной пушке поток электронов формируется только катодом, а анодом является само свариваемое изделие.

Катоды электронных сварочных пушек по виду нагрева разделяются на два вида – катоды *прямого* нагрева и катоды *косвенного* нагрева. В катодах первого вида нагрев осуществляется за счет выделения теплоты в самом катоде, через который протекает ток накала. Катоды второго вида нагреваются специальными нагревательными элементами, располагаемыми вблизи тела катода. Лучшими являются катоды косвенного нагрева, создающими более равномерную плотность эмиссии и обладающие большей долговечностью.

9.6.6 Лазерная сварка. Наиболее эффективна в микроэлектронике. Так, при помощи рубинового лазера можно приваривать вводы к контактам на кремниевых пластинах и тонкие провода к тонким пленкам. СО₂ - лазеры применяют для пробивания отверстий в керамических подложках для микросхем.



а – в труднодоступном месте; б – в камере, заполненной инертным газом

Рисунок 9.18 – Лазерная сварка

Одной из уникальных особенностей лазерного луча – возможность производить сварку через прозрачную для света перегородку, в вакуумированном объеме и вообще в различных труднодоступных местах (рис. 9.18, а). Большой практический интерес представляет сваривание тех или иных элементов микроэлектроники в камере, заполненной инертным газом (рис. 9.18, б). В этом случае предотвращаются реакции окисления.

С помощью лазерной сварки можно соединять металлы с различными теплофизическими и химическими свойствами, а также с неметаллами. Она может применяться также для сварки крупногабаритных деталей и узлов.

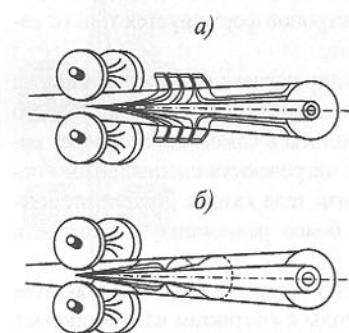
9.6.7 Высокочастотная сварка. Применяется в производстве прямо- и спиральношовных труб из черных и цветных металлов, оболочек электрических кабелей, в приварке ребер, изготовлении различных профилей.

Достоинствами высокочастотной сварки являются:

- 1) высокая степень локализации энергии;
- 2) возможность в широких пределах изменять параметры режима сварки;
- 3) меньшая энергоемкость, чем при дуговой и контактной сварке;
- 4) нет принципиальных ограничений по скорости сварки.

Высокочастотная сварка осуществляется с использованием двух способов передачи энергии: контактного и индукционного.

При использовании *контактного способа* на расстоянии 30–200 мм от места схождения кромок трубной заготовки на них накладываются контакты, которые при движении скользят по поверхности (рис. 9.19, а).



а) – контактный способ подвода тока;
б) – индукционный способ подвода тока

Рисунок 9.19 – Схемы процесса высокочастотной сварки

Вследствие поверхностного эффекта ток, подведенный к изделиям, течет в

тонком слое на их наружных поверхностях и замыкается в месте схождения свариваемых кромок. Для снижения тока шунтирования и повышения доли тока, протекающего на свариваемых поверхностях, внутри трубной заготовки располагают магнитопровод из материала с большой магнитной проницаемостью.

При использовании *индукционного способа* подвода тока к кромок на расстоянии 30–300 мм от места их схождения устанавливается индуктор (рис. 9.19, б). Под действием поля индуктора в поверхностном слое заготовки наводится ток, который течет под индуктором по наружной поверхности. Наведенный ток, дойдя до щели, разветвляется; большая часть его вследствие эффекта близости течет вдоль кромок и замыкается в месте их схождения. Часть тока замыкается по периметру внутри заготовки. Для уменьшения тока шунтирования применяют внутренние магнитопроводы, а для повышения концентрации его на свариваемых поверхностях наряду с внутренним используют наружный магнитопровод. При частоте 8–10 кГц для сварки труб среднего диаметра применяют внутренний индуктор.

Рассмотренные два способа высокочастотной сварки относятся к сварке давлением с оплавлением.

Установленная мощность электрооборудования трубоэлектросварочных станков достигает 30–50 МВт. Напряжение питания потребителей 380, 6000 или 10000 В. В качестве источника питания применяются ламповые (ВСЧ) или машинные (ОПЧ) преобразователи. Ламповые преобразователи применяются для сварки тонкостенных труб любого диаметра. Сварка производится частотой 440 кГц. Машинные преобразователи применяют для сварки толстостенных труб (6–10 мм и более) большого диаметра (219 мм и более). Сварка производится частотой 8–10 кГц.

В настоящее время выпускают выпрямители типов ВВТ-250/12 и ВПТ-250/14 на номинальный выпрямленный ток 250 А и номинальное напряжение 12 и 14 кВ и установки с машинными преобразователями типа ИС-1000/10, ИС1-1500/10, ИС1-2000/10, ИС1-4000/10, выполненные на основе преобразователей ОПЧ250-10, каждый мощностью по 250 кВт, частотой 10000 Гц. Приводные двигатели генераторов переменного тока изготовляют на напряжение 6 или 10 кВ.

В шкафу выпрямительного сварочного устройства монтируются высокочастотный трансформатор, конденсаторная батарея и система охлаждения.

Техника безопасности при производстве сварочных работ. Основной опасностью в процессе проведения электросварочных работ является опасность поражения электрическим током.

Опасность поражения электрическим током возникает как при непосредственном соприкосновении с находящимися под напряжением токоведущими частями установки, так и при касании металлических частей оборудования, случайно оказавшихся под напряжением вследствие повреждения изоляции. Наибольшую опасность представляет первичное напряжение агрегатов для сварки постоянным током и сварочных трансформаторов, которое обычно составляет 220 или 380 В. Вторичное напряжение холостого хода, обычно не превышающее в установках дуговой сварки 80 В, является значительно менее опасным, но в сыром помещении, если обувь не обеспечивает надежной электрической изоляции от земли, оно становится опасным и сварщик должен работать в резиновых сапогах.

Для обеспечения электробезопасности в соответствии с ПУЭ применяют надежное защитное заземление корпусов сварочных машин, аппаратов, установок, держателей плазмменных резачков, зажимов обратного провода и т.п. Необходимо также заземлять тот вывод обмотки сварочного трансформатора, который соединяется со свариваемым изделием.

Передвижные сварочные установки до включения их в сеть обязательно заземляют; заземление снимается только после окончания работ. Заземляющий провод или шина вначале присоединяется к магистрали заземления, а затем к сварочному оборудованию; снятие заземления производится в обратном порядке.

Запрещается использовать в качестве обратного провода сварочной цепи контуры заземления, трубы санитарно-технических устройств, металлоконструкции законченных зданий и технологического оборудования.

Электросварочные установки при работах в особо опасных или с повышенной опасностью помещениях должны иметь ограничители напряжения холостого хода, снижающие напряжение до 12 В и ниже, не позже, чем через 1 с.

Одной из главных причин нарушения изоляции обмоток сварочного оборудования и проводов является их чрезмерная перегрузка по току. Сечение проводов и плавких вставок предохранителей должно соответствовать сварочному току. Предохранители с излишне большими сечениями плавких вставок могут явиться причиной повреждений сварочного оборудования и пожаров.

При дуговой сварке на переменном токе с применением осциллятора может возникнуть серьезная опасность поражения током высокого напряжения в случае замыкания между обкладками контурного конденсатора, если отсутствует или поврежден блокировочный конденсатор. Поэтому в целях безопасности должна быть обеспечена исправность контурного и блокировочного конденсаторов, для чего они должны подвергаться регулярным осмотрам.

Для обеспечения недоступности токоведущих частей осциллятора применяют глухой кожух с исправной блокировкой, отключающей питание при снятии кожуха.

Для обеспечения электробезопасности во время работы при ручной дуговой сварке руки, рукавицы, обувь и одежда должны быть сухими.

Кроме поражения током, существуют опасности: излучения открытой сварочной дуги; ожогов; отравления токсическими газами и парами; травматизма при сварке на высоте; взрывоопасность при работе с горючими газами и парами; пожарная опасность. Поэтому при проведении сварочных работ необходимо соблюдать все правила, обеспечивающие их безопасность.

Вопросы для самопроверки

1. На какие классы подразделяют сварку?
2. Какие преимущества электрической дуговой сварки и области её применения?
3. Что такое сварочная дуга?
4. Как классифицируют сварочные дуги?
5. По каким признакам разделяют источники питания сварочной дуги?
6. Какие бывают внешние характеристики источников питания сварочной дуги и при каких видах сварки они применяются?
7. Какие бывают источники питания дуги постоянного тока?
8. Как подразделяются сварочные преобразователи постоянного тока?
9. Что представляет собой многопостовый генератор?
10. Какие возможности имеет универсальный сварочный генератор?
11. Какие достоинства и недостатки многопостовой сварки?
12. Какие требования предъявляют к однопостовым сварочным генераторам?
13. Принцип работы однопостового сварочного генератора.
14. Принцип работы и конструктивное исполнение сварочных выпрямителей.
15. Какие преимущества сварки на переменном токе перед сваркой на постоянном токе?
16. Какие источники питания применяют при дуговой сварке на переменном токе?
17. Конструктивное исполнение сварочных трансформаторов СТЭ, СТН, ТС, ТД.
18. Назначение, конструктивное исполнение и работа осцилляторов.
19. Принцип автоматической сварки под слоем флюса.
20. Какое оборудование используют при автоматической сварке?

21. Область применения и принцип действия дуговой сварки в углекислом газе.
22. Назначение, сущность процесса и достоинства аргоно-дуговой сварки.
23. Плазменно-дуговая сварка, сущность процесса и источники питания.
24. Сущность процесса электрошлаковой сварки.
25. Какие аппараты применяют для электрошлаковой сварки?
26. Какие преимущества и недостатки имеет электронно-лучевая сварка?
27. Сущность электронно-лучевой сварки.
28. Назначение и область применения лазерной сварки.
29. Какие достоинства имеет высокочастотная сварка?
30. Способы осуществления высокочастотной сварки.
31. Какое электрооборудование используют для высокочастотной сварки?
32. Какие меры безопасности необходимо соблюдать при производстве сварочных работ?

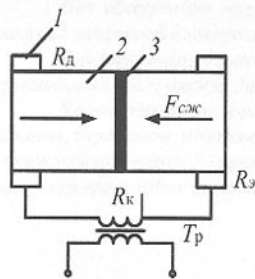
10. УСТАНОВКИ КОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРОСВАРКИ

10.1 Физические основы электрической контактной сварки

Контактная сварка представляет собой процесс образования неразъемного соединения, возникающего в результате нагрева металла, протекающим через детали электрическим током и пластической деформации зоны соединения.

Контактная сварка объединяет большую группу методов сварки, отличительной особенностью которых являются надежность получаемых соединений, высокий уровень автоматизации и механизации, высокая производительность процесса и культура производства.

Область применения контактной электросварки чрезвычайно широка - от космических аппаратов до миниатюрных полупроводниковых устройств и пленочных микросхем. Видное место этот способ сварки занимает в авиастроении, автомобилестроении, вагоностроительной и судостроительной промышленности, при монтаже трубопроводов, рельсов, в котлостроении и при изготовлении инструмента.



Контактная электросварка может осуществляться как на постоянном, так и на переменном токе. На практике наиболее широкое применение получил переменный ток, так как необходимые для сварки токи в тысячи и десятки тысяч ампер при низких напряжениях порядка 1-16 В могут быть наиболее просто получены при помощи трансформаторов. Специальные источники постоянного тока для этой цели были бы слишком дороги, сложны в изготовлении и менее надежны в эксплуатации.

По способу получения соединений различают стыковую, точечную и шовную контактную сварку. На рис. 10.1 показана схема стыковой контактной сварки.

От сварочного трансформатора T_p ток к свариваемым деталям 2 подводится посредством водоохлаждаемых электродов 1. В месте сварки 3 происходит сваривание деталей за счет выделяющейся теплоты с последующим сжатием. Общее количество энергии Q (Дж), выделяющейся между электродами,

$$Q = \int_0^{\tau} [R_k(\tau) + R_d(\tau)] I^2(\tau) d\tau, \quad (10.1)$$

где R_k - контактное сопротивление между деталями, Ом;

R_d - сопротивление детали от электрода до места сварки, Ом;

I - сварочный ток, А;

τ - время прохождения тока, с.

Из формулы следует, что необходимая для сварки энергия при весьма малых значениях сопротивления в точке контакта свариваемых деталей и во избе-

жание потерь теплоты на ненужный нагрев всей массы деталей может быть получена только при больших значениях токов (сотни и тысячи ампер), протекающих через сопротивление контакта в течение короткого промежутка времени (единицы секунд). Для повышения КПД контактной сварки необходимо, чтобы сопротивление цепей сварочного тока и электродов было как можно меньше.

Режимы сварки с применением токов большой величины при минимальном времени нагрева принято называть «жесткими». Они применяются при сварке чувствительных к нагреву легированных сталей и легкоплавких цветных металлов, например, алюминия и его сплавов, и имеют следующие показатели: $j = 160 - 400 \text{ А/мм}^2$; $P = 0,4 - 1,2 \text{ ГПа}$; $t_{св} = 0,1 - 1,0 \text{ с}$.

Режимы с длительным прохождением тока и постепенным нагревом называются «мягкими». Они применяются при сварке обычных углеродистых сталей, менее чувствительных к нагреву при сварке, и имеют следующие показатели: $j = 80 - 160 \text{ А/мм}^2$; $P = 0,15 - 0,4 \text{ ГПа}$; $t_{св} = 0,5 - 3 \text{ с}$.

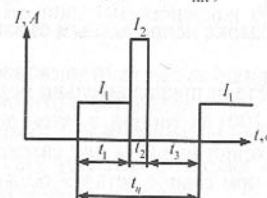
Сварочные установки для контактной сварки имеют две основные части: электрическую и механическую. Электрическая часть состоит из сварочного трансформатора специальной конструкции, токопроводящих частей и устройств для включения и выключения сварочного тока. Механическая часть установок представляет собой устройство для импульсного сжатия свариваемых деталей.

10.2 Стыковая сварка

При стыковой сварке соединяемые детали свариваются по всей плоскости их касания в месте стыка. Стыковая сварка применяется для сварки в стык стержней, профильного и фасонного металла, полос и листов, труб, рельс, замкнутых контуров (колес, цепей и т.д.), составного инструмента и цветной проволоки.

Различают два способа стыковой сварки - сопротивлением и оплавлением. Основным способом является сварка оплавлением. Он позволяет сваривать крупные детали сечением до 15000 мм^2 .

При сварке *сопротивлением* (рис. 10.1) свариваемые детали 2 укрепляют в токоподводах 1 и сжимают с усилием сжатия $F_{сж}$. При пропускании по ним тока происходит нагрев деталей в стыке 3 до температуры, близкой к температуре плавления металла ($0,8 - 0,9 T_{пл}$).



I_1, t_1 - ток и время нагрева;
 I_2, t_2 - ток и время осадки;
 t_3 - время паузы;
 $t_{ц}$ - время цикла сварки

Рисунок 10.2 - Типовой график нагрузки стыковой машины при сварке сопротивлением

Затем резко увеличивают усилие сжатия (осадка деталей), в результате чего в твердой фазе образуется сварное соединение. На рис. 10.2 приведен график на-

грузки стыковой машины при сварке сопротивлением.

Сварку *оплавлением* подразделяют на сварку непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом.

При сварке *непрерывным оплавлением* детали сближаются при включенном трансформаторе, но без сдвливания их заметным усилием.



Рисунок 10.3 – Типовой график нагрузки стыковой сварки оплавлением

Рисунок 10.4 – Типовой график нагрузки стыковой сварки оплавлением с предварительным подогревом

В момент касания между ними образуется контакт, сопротивление которого из-за отсутствия сжимающих сил относительно велико. При протекании через такой контакт большого сварочного тока металл почти мгновенно плавится, образуя между торцами деталей жидкие перемычки. При дальнейшем нагреве перемычки взрываются, что приводит к выбрасыванию из зазора частиц металла в виде искр и некоторому укорочению деталей. После образования на торцах тонкого слоя расплавленного металла и достаточного прогрева деталей по длине они сдвигаются осевой силой (осаживаются). При этом расплавленный металл («грят») вытесняется из зазора, а расположенный под ним чистый, хорошо разогретый металл пластически деформируется и сваривается.

График нагрузки стыковой машины при сварке непрерывным оплавлением приведен на рис. 10.3.

При сварке *оплавлением с подогревом* детали предварительно подогревают методом кратковременных замыканий (от 2 до 100) их торцов, а затем оплавливают. На рис. 10.4 приведен график нагрузки стыковой машины при сварке оплавлением с подогревом. Этот способ применяется при сварке деталей больших сечений и деталей из жаропрочных сталей.

Стыковая сварка оплавлением по сравнению со сваркой сопротивлением имеет следующие преимущества: более прочный шов, не требующий большой механической обработки; меньшая мощность сварочной установки; пониженный удельный расход электроэнергии; возможность сваривания различных металлов.

10.3 Точечная сварка

Точечная сварка применяется для соединения листовых заготовок одинаковой или разной толщины, пересекающихся стержней, а также листовых заготовок со стержнями и прокатом различного профиля.

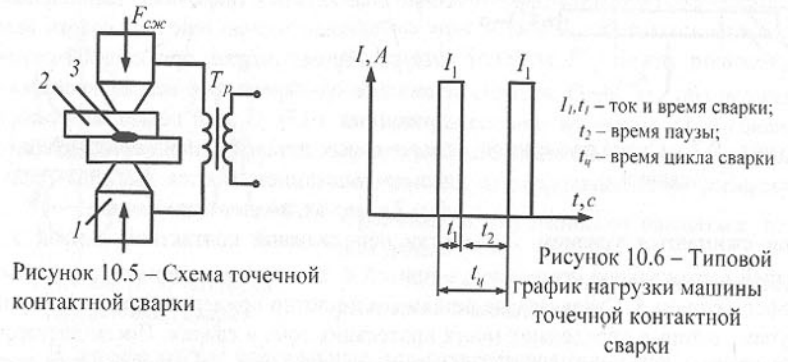


Рисунок 10.5 – Схема точечной контактной сварки

Рисунок 10.6 – Типовой график нагрузки машины точечной контактной сварки

При точечной сварке (рис. 10.5) свариваемые детали 2 помещают между двумя охлаждаемыми водой медными электродами 1, закрепленными в специальных электроподдержателях, и сжимают усилием $F_{сж}$. Electrodes connect to the secondary winding of the welding transformer T_p , upon connection of which intensive local heating of the details occurs in the area, clamped by the electrodes, and in the zone adjacent to it. The current in the welding circuit reaches tens of amperes at a voltage of several volts. The welding process continues until the metal melts in the central, most heated zone, after which the current is switched off, and after some time (forging) the force $F_{сж}$ is reduced. After cooling, a local connection is formed in the form of a round weld point 3.

Время, необходимое для сварки одной точки, зависит от толщины свариваемых деталей, физических свойств свариваемого материала, мощности сварочного аппарата, степени сжатия деталей и колеблется от тысячных долей секунды (при сварке тонких листов цветных металлов) до нескольких секунд (толстых стальных деталей). На рис. 10.6 приведен график нагрузки машины точечной контактной сварки.

В зависимости от числа одновременно свариваемых точек различают одно-, двух- и многоточечную сварку.

Машины для *многоточечной сварки* последовательно сваривают несколько точек за одну установку изделия и обеспечивают высокую производительность процесса точечной сварки.

Наибольшее применение имеют многоточечные многотрансформаторные машины (сварочные прессы).

При создании полностью автоматических линий для сборки и сварки крупногабаритных изделий таких, как кузова автомобилей и железнодорожных ваго-

нов, многоточечные сварочные машины объединяются в поточные автоматические линии.

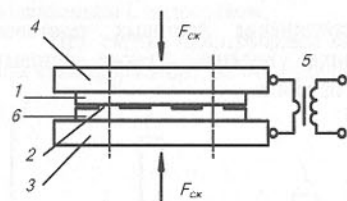


Рисунок 10.7 – Схема рельефной сварки

Детали сжимаются усилием $F_{сж}$ между неподвижной контактной плитой 3 и имеющей вертикальное перемещение плитой 4. Плиты соединены со сварочным трансформатором 5. Свариваемые детали 1 и 6 плотно прилегают друг к другу по выступам, которые определяют места протекания тока и сварки. После достаточного нагрева выступов усилие $F_{сж}$ обычно увеличивается, и осуществляется сварка с одновременным расплющиванием выступов. После сварки детали плотно прилегают друг к другу по всей поверхности.

Возможно также выполнение сварки на каждом выступе в отдельности (рельефно-точечная сварка); при этом производительность сварки существенно уменьшается, но обеспечивается более высокое и стабильное качество соединений в сравнении с обычной точечной сваркой без необходимости зачистки стальных заготовок.

Мощности машин для точечной сварки примерно такие же, как и для стыковой сварки.

Для сварки изделий, которые затруднительно перемещать к стационарным машинам, применяются подвесные машины, комплектуемые сварочными клещами. Особенно широко применяются такие машины в автомобилестроении, для сварки арматурных каркасов железобетонных изделий и т.д.

К точечной сварке можно отнести и конденсаторную.

Конденсаторная (импульсная) сварка применяется для сварки изделий из легких сплавов, легированных и жаропрочных сталей, а также из сплавов других цветных металлов. В конденсаторных машинах сварку производят за счет энергии, запасенной в батарее низковольтных конденсаторов, которые заряжаются от сети переменного тока до определенного напряжения через управляемый выпрямитель. Переключающим устройством батарею разряжают через первичную обмотку сварочного трансформатора, а на сварочном токе во вторичной обмотке этого трансформатора осуществляют сварку.

К преимуществам машин для конденсаторной сварки следует отнести стабильность сварочного импульса, к недостаткам – сложность и более высокую стоимость.

10.4 Шовная (роликовая) сварка

Шовная сварка – вид контактной сварки, при котором между свариваемыми деталями образуется непрерывный шов постановкой последовательного ряда частично перекрывающихся друг друга сварных точек.

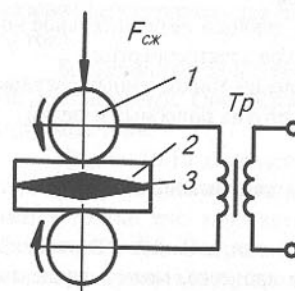


Рисунок 10.8 – Шовная (роликовая) сварка

При шовной (роликовой) сварке (рис. 10.8) свариваемые детали 2 собираются внахлестку и сжимаются усилием $F_{сж}$ между роликами 1 из меди или ее сплавов. Один или оба ролика имеют принудительное вращение от специального привода. После сжатия деталей включается ток, подводимый от сварочного трансформатора T_p к роликам, и они начинают вращаться, перемещая изделие.

Шовная сварка бывает *непрерывной*, *прерывистой* и *шаговой*.

В первом случае свариваемые детали перемещаются с постоянной скоростью $V_{св}$ при непрерывно включенном сварочном токе I_1 (рис. 10.9, а), во втором – кратковременные импульсы t_1 тока I_1 чередуются с паузами t_2 при непрерывном движении детали (рис. 10.9, б). При шаговой сварке (рис. 10.9, в) в момент включения тока детали неподвижны.

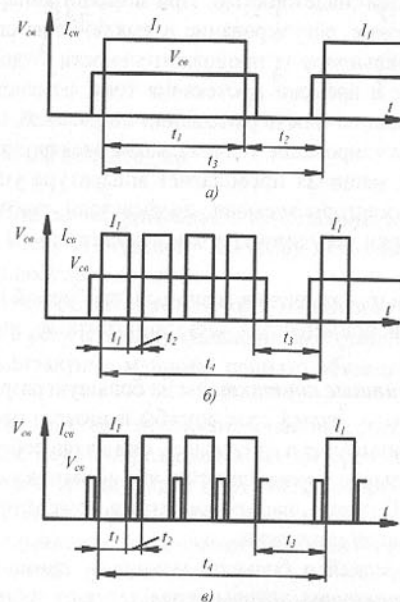


Рисунок 10.9 - Типовые графики нагрузки шовной сварки

Непрерывный режим применяется при сварке листов суммарной толщиной до 1,5 мм, поскольку при большей толщине после выхода из-под роликов сваренные листы могут расслоиться вследствие медленного остывания нагретого до пластического состояния стыка. Кроме того, при непрерывной подаче тока может происходить значительное коробление свариваемых листов.

Наиболее распространен *прерывистый режим*, дающий незначительное коробление листов и обеспечивающий наименьший расход электроэнергии.

Шовная сварка весьма эффективна при изготовлении тонкостенных сосудов, при производстве сварных металлических труб и ряда других подобных изделий.

10.5 Коммутационная аппаратура машин для контактной сварки

Регулирование количества подводимой энергии при заданном сопротивлении контакта, определяемом условиями сварочного процесса, может осуществляться либо изменением сварочного тока, либо изменением продолжительности протекания тока. В большинстве случаев регулирование процесса контактной сварки производится установлением той или иной длительности цикла сварки при заданном сварочном токе.

Надежность сварных соединений зависит от правильности выбранного режима сварки и его стабильной повторяемости, что определяет особые требования к аппаратуре управления, которая должна быть максимально автоматизирована, малоинерционна, должна обладать высокой чувствительностью, точностью работы и эксплуатационной надежностью. При помощи аппаратуры управления осуществляется: включение, регулирование и выключение сварочного тока; регулирование последовательности и продолжительности отдельных операций цикла сварки, в том числе и времени протекания тока; изменение скорости вращения роликов шовной машины или перемещения подвижной плиты (стыковые машины); включение и регулирование усилия сжатия электродов и т.п.

В контактных машинах преобладает аппаратура управления однофазными машинами – это регуляторы времени, прерыватели, вентильные контакторы. Регуляторы цикла сварки регулируют ток и стабилизируют его при колебаниях напряжения сети.

В зависимости от назначения машины и требуемой надежности получаемых сварных соединений применяются электромагнитные, игнитронные и тиристорные контакторы.

Электромагнитные контакторы на большую разрывную мощность имеют значительные габариты, малый срок службы и низкую производительность. Имея большое время срабатывания и отпускания, они не способны пропускать строго дозированные и стабильные порции энергии, что особенно сказывается при работе на жестких режимах. Поэтому электромагнитные контакторы иногда применяются только в машинах малой мощности.

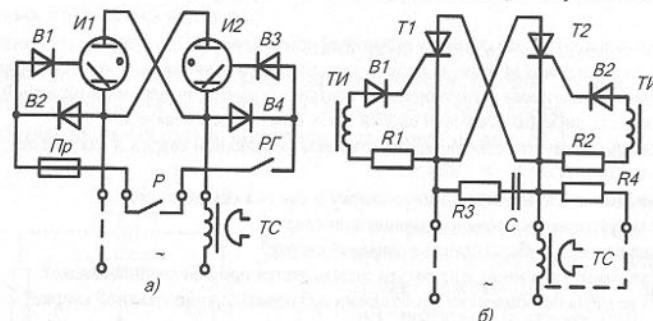
В машинах средней и большой мощности применяют **игнитронные** или **тиристорные контакторы**, которые представляют собой два игнитрона или тиристора, включенных встречно-параллельно (рис. 10.10). Анод одного вентиля со-

единен с катодом другого, и эта группа включена последовательно со сварочным трансформатором.

Простейший игнитронный контактор типа КИА – контактор игнитронный с асинхронным включением (рис. 10.10, а), выпускается на токи 500, 1000 и 2000 А при ПВ=20%. Синхронные игнитронные контакторы типа ПИТ и ПИШ снабжены фазовой регулировкой для плавного изменения действующего значения сварочного тока.

Большинство однофазных машин переменного тока оснащено тиристорными контакторами. Они выпускаются различных типоразмеров на разные коммутируемые токи.

На рис. 10.10, б представлена схема тиристорного контактора КТ-0194. Импульсы управления с частотой 100 Гц поступают на тиристоры **T1** и **T2**, но включается только тот, анод которого находится под положительным потенциалом. Цепочка **R3, R4, C** ограничивает скорость восстановления напряжения на тиристорах во время коммутации тока с целью предотвращения возможности самопроизвольного включения, а также снижает импульсы перенапряжений.



а – игнитронного; б – тиристорного

Рисунок 10.10 – Схемы контакторов

Тиристорные контакторы по сравнению с игнитронными имеют меньшее падение напряжения 0,5-1,5 В (у игнитронов – 10-15 В), меньшие габариты, меньшее время коммутации и больший срок службы.

Все применяемые тиристорные контакторы имеют импульсное управление и могут работать только с регуляторами, оснащенными фазоимпульсными выходными устройствами. В контактных машинах принято обязательное водяное охлаждение тириستоров.

Последовательность действия механизмов машины для контактной сварки (сжатие, сварка, проковка, пауза) определяется регулятором времени (РВЭ-7-1А-2, РВЭ-8-3) или регулятором цикла сварки (РЦС-403), которые являются либо самостоятельными устройствами, либо входят в виде отдельного функционального блока в состав шкафов управления сварочными машинами и работают по определенной, заранее установленной программе.

Техника безопасности. Для защиты сварщика от поражения электрическим током необходимо, чтобы все металлические части сварочного оборудования, нормально не находящиеся

под напряжением, но могущие оказаться под напряжением при нарушении электрической изоляции, должны заземляться согласно требованиям Правил устройства электроустановок.

При контактной сварке, и в особенности при стыковой сварке оплавлением, выделяется значительное количество пыли, загрязняющей воздух в зоне дыхания рабочего. Поэтому при производстве сварки цветных металлов или сталей со специальными покрытиями, при нагревании которых возможно выделение вредных веществ (свинца, цинка), должна быть предусмотрена местная или общая приточно-вытяжная вентиляция.

При всех видах контактной сварки наблюдается более или менее интенсивное выделение брызг металла, особенно значительное при стыковой сварке оплавлением. При стыковой сварке машина обычно оснащается съемными защитными приспособлениями. При точечной и шовной сварке для защиты глаз от искр и попадания брызг металла при выплесках, сварщик должен работать в очках с обычными стеклами. Для защиты от ожогов сварщик обычно снабжается фартуком (желательно резиновым) и рукавицами.

Для предотвращения возникновения пожара от брызг расплавленного металла стыковую сварку с оплавлением необходимо проводить в помещениях, сооруженных из негорючих материалов и оснащенных средствами пожаротушения.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое контактная сварка и области её применения?
2. Как подразделяют контактную сварку по способу получения сварных соединений?
3. Какими параметрами характеризуют «жёсткий» и «мягкий» режимы контактной сварки?
4. Какие есть способы стыковой сварки и как они осуществляются?
5. Какие существуют разновидности точечной контактной сварки и как они осуществляются?
6. Где используют конденсаторную сварку и как она осуществляется?
7. Как осуществляется шовная (роликовая) сварка?
8. Какие режимы работы присущи шовной сварке?
9. Какая коммутационная аппаратура используется при контактной сварке?
10. Какие меры безопасности необходимо соблюдать при контактной сварке?

11 ЭЛЕКТРОЛИЗ

11.1 Процессы, протекающие при электролизе

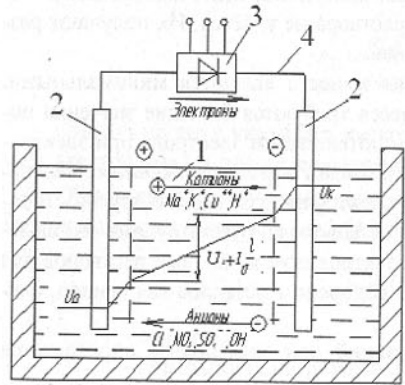
Исходной средой для проведения электролиза являются электролиты. *Электролитами* называются вещества, растворы и расплавы которых могут проводить электрический ток ионами, образующимися в результате электролитической диссоциации. В отличие от металлов и полупроводников растворы и расплавы электролитов обладают ионной проводимостью.

Сущность электролиза заключается в выделении из электролита, при протекании через электролизную ванну (*электролизер*) постоянного тока, частиц вещества и осаждении их на погруженных в ванну электродах (*электроэкстракция*) или в переносе вещества с одного электрода через электролит на другой (*электролитическое рафинирование*).

В общих случаях цель процессов – получение возможно более чистых незагрязненных примесью веществ.

Электролиз распространен в металлургии цветных металлов для получения алюминия, цинка, магния. Для рафинирования меди, никеля, свинца; в ряде химических производств для получения кислорода, водорода, хлора.

Принципиальная схема электролиза показана на рис. 11.1.



- 1 – электролит;
- 2 – электроды;
- 3 – источник питания;
- 4 – проводящие шины.

Рисунок 11.1 – Схема электролизной установки и распределения потенциала между электродами.

Если в электролизер поместить электроды, присоединенные к источнику электрической энергии, то в нём начнёт протекать ионный ток, причем положительно заряженные ионы – *катионы* будут двигаться к катоду (это в основном металлы и водород), а отрицательно заряженные ионы – *анионы* (хлор, кислород, OH^- , SO_4^{2-}) – к аноду. У анода анионы отдают свой заряд и превращаются в нейтральные частицы, осаждающиеся на электроде. У катода катионы отбирают электроны и также нейтрализуются, оседая на нём. Электрический ток во внешней цепи представляет собой движение электронов от анода к катоду.

В процессе электролиза плотность электролита уменьшается, поэтому для поддержания непрерывности процесса его надо обогащать. Так осуществляют извлечение тех или иных веществ из электролита (*электроэкстракция*).

Если же анод может растворяться в электролите по мере уменьшения его концентрации, то частицы его, растворяясь в электролите, приобретают положи-

тельный заряд и направляются к катоду, на котором осаждаются, тем самым осуществляется перенос материала с анода к катоду. При этом процесс ведут так, чтобы содержащиеся в металле анода примеси не переносились на катод; такой процесс называется электролитическим рафинированием.

Каждое вещество характеризуется *нормальным потенциалом* (φ), при котором электрод, помещенный в раствор того же вещества, не будет растворяться и на нём не будет осаждаться вещества из раствора.

Если на электрод подать более отрицательный потенциал, то на нём начнётся выделение вещества (*катодный процесс*), если же более положительный, то начнется его растворение (*анодный процесс*). Значение нормальных потенциалов зависит от концентрации ионов и температуры. Принято считать нормальный потенциал водорода за *нуль*.

Если в электролите имеются ионы разных металлов, то первыми на катоде выделяются ионы, имеющие меньший отрицательный нормальный потенциал (никель, свинец, медь, серебро). Щелочноземельные металлы выделить труднее всего. Кроме того, в водных растворах всегда имеются ионы водорода, выделяющиеся раньше, чем все металлы, имеющие отрицательный нормальный потенциал, поэтому при электролизе этих металлов значительная часть энергии затрачивается на выделение водорода. Путём специальных мер можно воспрепятствовать в определенных пределах выделению водорода, однако металлы с нормальным потенциалом больше 1В (например, магний, алюминий, щелочноземельные металлы) получить электролизом из водного раствора не удастся. Их получают разложением расплавленных солей этих металлов.

Нормальные электродные потенциалы веществ являются минимальными; поэтому для устойчивого протекания процесса требуются большие значения потенциалов. Разность между действительным потенциалом электрода при электролизе и нормальным для него потенциалом называют *перенапряжением*. Перенапряжение увеличивает потери энергии при электролизе. Однако, с другой стороны, увеличивается перенапряжение для ионов водорода, что затруднит его выделение на катоде, а это позволит получить электролизом из водных растворов ряд таких более отрицательных по сравнению с водородом металлов как свинец, олово, никель, кобальт, хром и даже цинк.

Протекание катодных и анодных реакций при электролизе определяется двумя законами Фарадея.

1. Масса вещества $m_{\Sigma 2}$, выделяющегося при электролизе на катоде или перешедшего с анода в электролит пропорциональна прошедшему через электролит количеству электричества $I\tau$:

$$m_{\Sigma 2} = \alpha I \tau, \quad (11.1)$$

где α - электрохимический эквивалент вещества, г/Кл;

I - ток, А;

τ - время прохождения тока, с.

2. Масса выделенного при электролизе вещества одним и тем же количеством электричества прямо пропорциональна атомной массе вещества A и обратно пропорциональна его валентности n :

$$m_{\Sigma 2} = \frac{A}{F_{\Phi} \cdot n} I \tau, \quad (11.2)$$

где $F_{\Phi} = 96485$ - число Фарадея, Кл·моль⁻¹.

Таким образом, электрохимический эквивалент вещества $\alpha = \frac{A}{F_{\Phi} \cdot n}$ пред-

ставляет собой массу вещества в граммах, выделяемую единицей проходящего через электролизер количества электричества - кулоном (А·с).

Для меди: $A=63,54$; $n=2$; $\alpha=0.000329$ г/Кл; для никеля $\alpha=0.000304$ г/Кл; для цинка $\alpha=0.00034$ г/Кл.

В действительности масса выделившегося вещества $m_{\Sigma 2}$ всегда меньше рассчитанной по формулам (11.1, 11.2), что объясняется рядом побочных процессов (например, выделением водорода на катоде, утечкой тока, нагревом электролита).

Отношение количества вещества, полученного при электролизе $m_{\Sigma 1}$, к теоретически возможному количеству вещества, определенному по закону Фарадея, называют *выходом вещества по току* (%):

$$\eta_T = \frac{m_{\Sigma 1}}{m_{\Sigma 2}} \cdot 100. \quad (11.3)$$

Выход по току указывает насколько экономично и рационально идёт процесс электролиза (η_T всегда меньше единицы).

Характерной величиной, определяющей интенсивность электролиза, является электродная плотность тока (А/м²):

$$j_3 = I/S, \quad (11.4)$$

где I - сила тока;

S - поверхность погруженной в электролит части электрода.

С увеличением плотности тока на электродах η_T возрастает, однако при превышении оптимального её значения, при определенных условиях, могут образоваться оксидные пленки сложного состава, которые не растворяются при электролизе, что может привести к остановке процесса анодного растворения.

Эффективность электролизного процесса также оценивается величиной, называемой *выходом по энергии*, (%):

$$\eta_{\Sigma} = \eta_T \cdot \frac{\alpha}{U} \cdot 100, \quad (11.5)$$

где α - электрохимический эквивалент вещества;

η_T - выход металла по току;

U - напряжение на электролизной ванне.

Таким образом, выходом металла по энергии следует считать количество металла в граммах, выделенное на 1 Дж затраченной энергии (г/Дж).

Напряжение на электролизной ванне можно представить в виде трёх составляющих: напряжение электрохимического разложения вещества, приэлектродные падения потенциала и падение напряжения в электролите:

$$U_{эл} = U_1 + U_a + U_k + I \frac{l}{\sigma}, \quad (11.6)$$

где U_1 - напряжение электрохимического разложения вещества;

U_a, U_k - анодное и катодное падение потенциала соответственно;

I - сила тока в ванне;

l - расстояние между электродами;

σ - проводимость электролита.

Мощность, выделяющаяся в электролизной ванне:

$$P_{эл} = I \cdot U_{эл} = I(U_1 + U_a + U_k + I \frac{l}{\sigma}). \quad (11.7)$$

Только часть этой мощности ($I \cdot U_1$) идёт на электрохимическое разложение вещества, остальная же мощность расходуется на нагрев электролита и транспортировку ионов через раствор.

11.2 Электролиз растворов и расплавов

11.2.1 Производство цинка. Электролиз водных растворов металлов осуществляют как для их получения (электроэкстракция), так и для их очистки (электролитическое рафинирование).

Высококачественный цинк получают путём электролиза водных растворов его солей. Он применяется для производства сплавов (например, латуни), покрытия изделий из железа защитным слоем и производства белил. В качестве сырья для производства цинка используют в основном сульфидные руды – ZnS . Электролитом служит водный раствор содержащий 5-6% сернокислого цинка $ZnSO_4$ с добавлением 10 – 12% серной кислоты H_2SO_4 , повышающей его проводимость.

Во время электролиза на катоде осаждается металлический цинк, на аноде выделяется газообразный кислород, а в растворе образуется серная кислота.

Процесс электролиза ведут в прямоугольных ваннах, выполненных из сборного железобетона (иногда дерева или стали) с защитой из кислотоупорных материалов. В дне ванн имеется отверстие для выпуска шлама. Ванны длинными бортами устанавливают рядом, соединяют последовательно в блоки по 20-30 ванн.

Сверху в ванну опускают аноды прямоугольной формы срок службы которых 1,5–2 года. Катоды помещают между анодами.

Аноды изготавливают из свинца с добавлением 1% серебра для снижения коррозии. Толщина анодных пластин 5–8мм. Катоды изготавливают из листового алюминия толщиной 4 мм.

Слирку цинка с алюминиевых катодов производят раз в сутки или раз в двое суток. Они подвергаются систематической очистке один раз в 10 дней на катодочистительной машине. Аноды очищают один раз в 20-25 дней. Износ катодов составляет около 1,5кг, а анодов – 0,8-1,5кг на 1т цинка.

Полученные пластины катодного цинка промывают водой, формируют в пакеты и затем переплавляют в индукционных канальных печах.

В процессе электролиза электролит непрерывно циркулирует через электролизеры и очистительную установку. Для получения высокого выхода металла по току температуру электролита необходимо поддерживать на уровне 308–313 К. На практике применяется индивидуальное для каждой ванны охлаждение электролита с помощью алюминиевых или углеродистых змеевиков.

Чтобы обеспечить осаждение цинка на катоде, электролиз ведут при повышенных плотностях тока (400-600А/м²) и добавляют в раствор поверхностно-активные вещества, которые препятствуют выделению водорода на катоде. При таких плотностях тока перенапряжение при выделении катионов водорода на катоде достигают – 1,1В, благодаря чему оказывается возможным осаждение цинка, имеющего нормальный электродный потенциал – 0,76В.

В производстве цинка выход по току составляет 88–94%, напряжение на ванне равно 3,5-4,5В (все электроды включены параллельно), ток ванны составляет 7000-12000А, а расход электроэнергии 3500кВт·ч на 1 т цинка.

11.2.2 Производство алюминия. Алюминий получил широкое распространение в авиастроении, автомобилестроении, транспортном машиностроении, электротехнике, металлургии, химии, строительстве и т.д. Так как нормальный потенциал алюминия – 1,67В, то его получают электролизом расплавленных солей. Исходным материалом служат алюминиевые руды: бокситы, нефелины, алуниты, каолины. Из этих руд специальной обработкой получают глинозём Al_2O_3 , который не электропроводен и имеет высокую температуру плавления (2320К). Поэтому в качестве электролита используют раствор глинозёма в расплавленном криолите Na_3AlF_6 , в котором глинозём растворяется в результате чего температура процесса электролиза снижается до 1220К.

Поскольку фторидные расплавы являются сильно агрессивными средами, электролиз алюминия ведут с расходуемым угольным электродом, а внутренние поверхности ванн футеруют угольными плитами и блоками.

Электролизеры для получения алюминия можно классифицировать по ряду признаков:

1) *по мощности (силе тока)*: 40-50кА – малой мощности; 60-80кА – средней мощности; 100-160кА – большой мощности; 200-250кА – сверхбольшой мощности;

2) *по способу подвода тока*: боковой – электролизеры малой и средней мощности; верхний – электролизеры большой мощности;

3) *по конструкции анода*: самоспекающийся за счет теплоты ванны и обожженный. Обоженные аноды имеют только верхний подвод тока. Самоспекающиеся аноды устанавливают по одному на каждой ванне.

Размеры анода определяются заданной мощностью ванны и допустимой плотностью тока, которая для ванн средней мощности составляют $8000-9500 \text{ А/м}^2$, а на мощных ваннах снижается до $6500-7000 \text{ А/м}^2$. Обожженные аноды работают при плотностях тока $7500-10000 \text{ А/м}^2$.

Электролизеры объединяют в серию из 160 – 170 штук, причем 4 – 5 из них резервные. Ванны серии обычно устанавливают в двух корпусах в два ряда в каждом. Полы электролизного цеха выполняют электроизолированными.

Схематически процесс электролиза алюминия можно представить как выделение на катоде металлического алюминия и окисление угольного анода, на котором выделяется кислород.

Большие объемы производства алюминия потребуют увеличения производительности электролизеров, что приводит в свою очередь к увеличению рабочего тока до 200 – 250 кА.

Как было отмечено ранее, современные электролизеры для получения алюминия работают с анодными плотностями тока $6500 - 10000 \text{ А/м}^2$. Дальнейшее повышение плотности тока приводит к увеличению падения напряжения на ваннах и резкому увеличению удельного расхода электроэнергии.

При нормальной работе напряжение на ванне составляет 4,2-4,5 В, что достигается поддержанием заданного состава электролита и режимных показателей; выход металла по току 85 – 90%, а удельный расход электроэнергии $(16000 \pm 500) \text{ кВт·ч}$ на 1 т алюминия.

При недостатке глинозема (0,5-1,5%) начинает проявляться *анодный эффект*. Напряжение на ванне сначала постепенно, а потом резко возрастает до 50-60 В. Эффект сопровождается ярким свечением, обильным выделением газа и паров, перегревом электролита, что влечет за собой потерю фтористых солей и перерасход электроэнергии. Эффект ликвидируют добавкой глинозема в электролит.

Для сигнализации о появлении анодного эффекта служат *низковольтные лампы*, включенные параллельно к каждой ванне, которые загораются при повышении напряжения на ванне.

Выливку металла из ванны производят с помощью вакуум-ковша. Вылитый из ванны алюминий поступает в миксеры литейного корпуса, где он после отстаивания разливается в слитки.

11.3 Источники питания электролизных установок

Питание электролизных установок постоянным током осуществляется от генераторов постоянного тока или полупроводниковых выпрямительных агрегатов, преобразующих переменный ток промышленной частоты в постоянный. К ним предъявляют следующие требования:

- 1) высокая точность регулирования силы тока (колебания силы тока в серии ванн не должно быть более $\pm 1\%$ установившегося значения при электролизе алюминия и не более $\pm 2\%$ при электролизе других растворов);
- 2) плавное регулирование напряжения. Это вызывается необходимостью точной стабилизации силы тока серии ванн с большой противо-ЭДС. Допустимые колебания напряжения для серии ванн:

$$\delta U_{d,t} = \Delta I_d \left(1 - \frac{E_d}{100}\right) \%, \quad (11.8)$$

где ΔI_d - точность регулирования выпрямленного тока, %;

E_d - противо-ЭДС серии ванн.

При электролизе никеля: $\delta U_{d,t} = \pm 1,5-1,7\%$, $E_d = 15-25\%$; при электролизе алюминия: $\delta U_{d,t} = \pm 7\%$, $E_d = 30\%$. Чем больше ванн, тем больше $\delta U_{d,t}$: 82 ванны - $\delta U_{d,t} \leq 3\%$; 164 ванны - $\delta U_{d,t} \leq 6\%$.

В нормальном режиме напряжение на ванне в зависимости от металла составляет 3-7 В, а на зажимах серии ванн - 230-850 В. Допустимое колебание напряжения $\delta U_{d,t} \leq 2-3\%$;

3) высокая надежность - источники питания относятся к 1-й категории электроснабжения;

4) многофазная система выпрямления тока (для обеспечения меньшей пульсации).

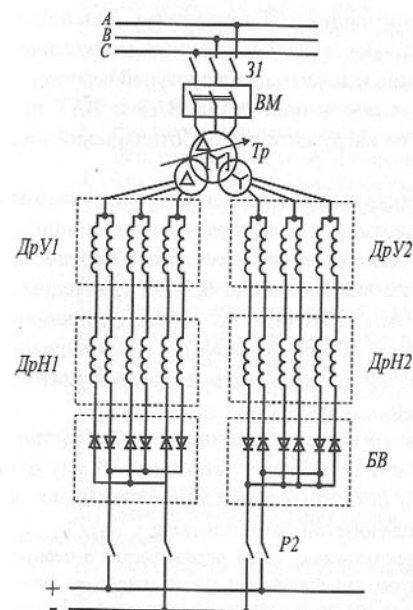


Рисунок 11.2 – Схема силовой части вентильного преобразователя ВАКВ2 (ВАКД)

Наиболее широкое распространение получили кремниевые агрегаты серии ВАКД и ВАКВ2 на ток 12500 А и напряжение 300, 450, 600, и 850 В, имеющие КПД 97-99%.

Выпрямительные агрегаты выполняются с неуправляемыми и управляемыми вентилями. Принципиальная схема силовой части вентильного преобразователя с неуправляемыми вентилями показана на рис. 11.2. Эти агрегаты предназначены для питания электролизных установок с противо-ЭДС ванн не более 70% выпрямленного напряжения. Сетевая обмотка силового трансформатора T_p соединена в треугольник с последовательным и параллельным соединением ее частей посредством переключения ПБВ.

Одна вентильная обмотка соединена треугольником, а одна – звездой. Трансформатор питает два параллельно включенных блока вентилей $ВВ$ на выпрямленное напряжение 300-850 В, которые включены по трехфазной мостовой схеме (схеме Ларионова) и имеют двенадцатиульсный режим выпрямления.

В состав агрегата входят масляный выключатель *ВМ*, разъединители переменного *Р1* и постоянного *Р2* тока, дроссели насыщения *ДрН₁* и *ДрН₂*, уравнивающие дроссели *ДрУ₁* и *ДрУ₂* (в зависимости от мощности один или два), панели защиты от перенапряжений (1-4 шт.).

К каждому агрегату поставляется щит управления, шкаф АВР, панель с предохранителями, панель стабилизации тока и диспетчерский пульт.

С диспетчерского пульта можно отключить агрегаты, переключать ступени трансформатора *Т_р*, регулировать ток каждого из параллельно работающих агрегатов и суммарный выпрямленный ток установки.

Уравнивающие дроссели *ДрУ₁* и *ДрУ₂* предназначены для равномерного распределения токов между выпрямительными блоками, поскольку напряжение соединенных в треугольник обмоток трансформатора на 1% выше обмоток соединенных звездой.

Регулирование напряжения происходит в результате комбинированного действия двух устройств: переключателя ступеней трансформатора *Т_р* (грубая регулировка) и дросселей насыщения *ДрН₁* и *ДрН₂* (тонкая регулировка).

Преобразовательные агрегаты мощных электролизных установок подсоединяют к серии ванн непосредственно без коммутационной аппаратуры. Установки сравнительно небольшой мощности подключают с использованием автоматических выключателей, являющихся одновременно и защитной аппаратурой агрегата.

Быстродействующие автоматические выключатели серии ВАБ и ВАТ используются для оперативных отключений без нагрузок и редких отключений под нагрузкой.

К электролизным ваннам ток от источника питания подается по специальным шинопроводам, состоящих из собранных в пакеты отдельных прямоугольных шин.

Сечение шинопроводов определяют, исходя из экономической плотности тока. Для алюминисевых шин при электролизе она составляет 0,3-0,4, для медных 1,0-1,3, для шин из чугуна и стали 0,15-0,2 А/мм². Рассчитанное сечение шинопровода затем проверяют: на допустимое значение потери напряжения в шинопроводе (она должна быть не более 3%); допустимый нагрев в установившемся режиме (не выше 343К) и на механическую прочность.

Шинопроводы, подводящие электроэнергию от выпрямительной подстанции к электролизному цеху, монтируются на специальных эстакадах. Между отдельными электролизными ваннами внутри цеха шинопроводы прокладывают в специальных шинных каналах, закрытых железобетонными плитами.

Требования к *технике безопасности* в электролизных цехах определяются в первую очередь тем, что электролизеры являются электрическими аппаратами, работающими на высоком, опасном для жизни напряжении. Хотя напряжение на ваннах не превышает 5-7 В, они включены последовательно в серию и их общее напряжение может достигать 500 В и более, тогда как безопасным напряжением для таких цехов является 12 В. Поэтому особое внимание должно быть обращено на состояние изоляции находящихся под напряжением деталей, а также на состояние заземления, которое должно выполняться из полос нержавеющей стали.

Кроме того, в электролизных цехах персонал работает в агрессивной среде: атмосфера цеха наполнена туманом из мельчайших капелек электролита, часто имеющим кислотный характер. При электролизе расплава металлов процесс протекает при высоких температурах, поэтому возможны ожоги.

Ввиду изложенного для предупреждения травматизма и заболеваний обслуживающего персонала необходимо применять индивидуальные и общие средства защиты.

К индивидуальным средствам защиты относятся:

- 1) спецодежда (брезентовая, суконная или поливинилхлоридная), кислотостойкие рукавицы, резиновые сапоги, фартуки, защитные очки, защищающие глаза от брызг растворов;
- 2) спецжиры для смазывания кожи для предохранения ее от разъедающего действия паров и капель;
- 3) местная вентиляция в тех местах, где наблюдается повышенная концентрация кислотных паров.

К общецеховым средствам защиты относятся:

- 1) ограждение опасных, находящихся под напряжением или горячих участков электролизных установок;
- 2) общая вентиляция цеха для удаления паров воды, тумана из взвешенных в воздухе капелек электролита, а также излишней теплоты, выделяемой работающими на электролизе расплавами ваннами. В электролизных цехах помимо естественной вентиляции применяется и приточная. Удаление воздуха приточной вентиляцией осуществляется через фонари перекрытия цеха. В зимнее время включаются калориферы, подогревающие приточный воздух.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется электролитом?
2. В чем заключается сущность электролиза?
3. Что такое электроэкстракция и электролитическое рафинирование?
4. Что такое нормальный потенциал вещества?
5. Ионы каких веществ в первую очередь выделяются на катоде?
6. Что такое перенапряжение? К чему оно приводит?
7. Дать пояснение первому и второму закону Фарадея.
8. Что характеризует выход вещества по току и энергии?
9. Объяснить составляющие напряжения на электролизной ванне.
10. Электролизом чего получают цинк?
11. Что является исходным сырьем для получения цинка?
12. Из каких материалов выполняются ванны для электролиза цинка?
13. Из чего изготовляют аноды и катоды при электролизе цинка?
14. Какие электрические показатели работы электролизеров при получении цинка?
15. Как получают алюминий?
16. Что является электролитом при производстве алюминия?
17. Как классифицируют электролизеры для получения алюминия?
18. Какие электрические показатели работы электролизеров при получении алюминия?
19. Что такое анодный эффект? Как его обнаружить и устранить?
20. Какие требования предъявляются к источникам питания электролизных установок?
21. Какие источники питания используют в электролизных установках. Их конструктивное исполнение?
22. Как осуществляется регулирование напряжения в агрегатах серии ВАКД и ВАКВ 2?
23. Как определяют сечение шинопроводов к электролизным ваннам?
24. Как прокладывают шинопроводы?
25. На что необходимо обращать внимание при эксплуатации электролизных установок с точки зрения техники безопасности?
26. Что относится к индивидуальным средствам защиты?
27. Что относится к общецеховым средствам защиты?

12 МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

12.1 Электрохимические методы обработки материалов

В основу электрохимических методов обработки материалов положены принципы, протекающие при электролизе. Катодные процессы (выделение вещества на катоде) широко используются в гальванотехнике. Анодные процессы (растворение анода) нашли широкое применение для самых разнообразных электрохимических и электроэрозионно-химических методов обработки (электрохимическое травление, шлифование, полирование, глянцевание, профилирование, электрохимическая маркировка, заточка, анодно-механическая, анодно-абразивная обработка и т. д.).

12.1.1 Гальванотехника. Процесс нанесения металлопокрытий на поверхность изделия методом электролиза называется гальванотехникой. В свою очередь, гальванотехника подразделяется на гальваностегию, гальванопластику и анодирование.

Гальваностегия – электрохимическое нанесение металла на поверхность изделия с целью повышения их механической прочности, коррозионной устойчивости и придания красивого внешнего вида. Процесс электролиза ведут с растворимыми анодами и лишь в отдельных случаях при хромировании – с нерастворимыми.

Основой электролита являются соли осаждающегося металла. Кроме того, для улучшения проводимости электролита в него часто вводят кислоты и щелочи, придающие электролиту кислый и щелочной характер. При покрытии никелем или хромом стальных изделий в ряде случаев детали предварительно омедняют, а затем уже проводят никелирование и хромирование. Иногда применяют и трехслойное покрытие (медь – никель – хром). Такие покрытия защищают изделия от окисления при нагреве до 750-800K.

Серебрение и золочение в основном применяют в декоративных целях. Для лучшего сцепления покрытия с основным металлом при золочении, серебрении и омеднении в электролит вводят цианистые соединения.

При гальваностегии, как и при электролитических процессах, применяется постоянный ток обычно низкого напряжения (6-24В) от генераторов или от полупроводниковых преобразователей. Регулирование процесса осуществляется изменением плотности тока. При увеличении плотности тока увеличивается количество осаждаемого в единицу времени металла, однако при превышении ею определенного значения (своего для каждого процесса) качество покрытия резко ухудшается.

Гальванопластика – электрохимический процесс нанесения металлов на шаблоны, применяемые при изготовлении штампов различных изделий (музыкальные пластинки – диски, типографические клише, статуи и т. д.). При нанесении металлов шаблоны (из воска, гипса, дерева и т. п.) предварительно покрывают слоем графита для придания их поверхности электропроводности.

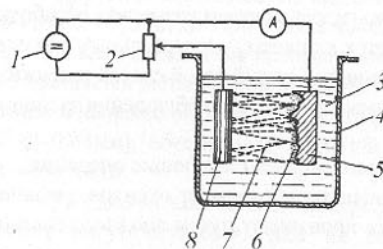
Анодирование – процесс получения оксидных антикоррозийных покрытий на поверхности металлических изделий путем их анодной обработки в соответст-

вующих растворах. Оно широко применяется для защиты от коррозии изделий из алюминия, магния и их сплавов.

Ванны для гальванотехнических покрытий обычно изготавливают из стали, а при использовании кислых растворов их изнутри изолируют пластмассой, резиной, эбонитом или покрывают кислото- и термостойкими лаками. Катодные и анодные шины устанавливают на изоляторах. На катодные шины подвешиваются изделия, а на анодные – пластины металла, которым покрывают изделия. Для интенсификации процесса электролиза электролит подогревают.

12.1.2 Анодно-электрохимическая обработка. В случае, когда требуется не нарастить пленку металла на поверхность изделия, а наоборот, снять с его поверхности лишний металл для очистки поверхности (травление), придания ей гладкости (шлифование или полирование) или для изменения его формы (анодная обработка), изделие соединяют с положительным полюсом источника питания электролизной ванны, т.е. оно становится анодом.

На рис 12.1 показана схема электрохимической обработки в стационарном электролите.



- 1 – источник питания;
- 2 – регулятор тока;
- 3 – электролит;
- 4 – ванна;
- 5 – обрабатываемое изделие (анод);
- 6 – продукты растворения;
- 7 – линии тока;
- 8 – электрод (катод).

Рисунок 12.1 – Схема электрохимической обработки в стационарном электролите.

(50-500 мм³/мин), поэтому очищенная поверхность иногда бывает шероховатой. Анодное полирование ведется при малых плотностях тока и на малых скоростях растворения металла.

Процесс снятия металла с поверхности изделия при удалении продуктов прианодных реакций сильной струей электролита при работе в проточном электролите называется **анодно-гидравлической** размерной обработкой изделий (рис 12.2).

Принципиальная схема электрохимической обработки в проточном электролите работает следующим образом. Обрабатываемую деталь 1 устанавливают

При прохождении электрического тока через электролит 3 и электроды 5 и 8 происходит растворение поверхности анода в электролите и образование продуктов растворения 6. Они задерживаются в углублениях поверхности анода и изолируют ее от прохождения тока по всей поверхности, сосредотачивая силовые линии тока 7 на незащищенных участках поверхности анода. Выступы растворяются быстрее впадин, в результате чего происходит сглаживание поверхности изделия – ее полирование.

При анодном травлении растворяется и снимается с поверхности изделий тонкий слой металла, а вместе с ним и слой жира, грязи и окислов. Анодное травление ведется на сравнительно больших скоростях растворения

относительно электрода-инструмента 2 с зазором, через который прокачивается электролит 3. Деталь подключена к положительному полюсу и является анодом, а электрод-инструмент – катодом.

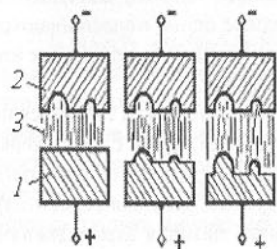


Рисунок 12.2 – Схема анодно-гидравлической размерной обработки изделия (копирования профиля)

рабочую камеру, обычно закрытую прозрачным щитком для наблюдения за ходом процесса.

Электрохимическим способом могут производиться следующие операции:

- 1) очистка поверхности металла анодным травлением от оксидов, ржавчины, жирных пленок и других загрязнений. Ее производят путем анодного растворения поверхности изделия;
- 2) заострение и заточивание режущего инструмента, изготовление игл и цилиндрических прутков. Это выполняется за счет создания на режущем лезвии и острие повышенных плотностей тока;
- 3) профилирование металлических заготовок. При этом способе обрабатываемое изделие помещено внутрь катода. Анодное растворение происходит интенсивнее в участках, более близких к катоду;
- 4) гравирование и маркирование по металлам. На изделие, которое является анодом, наносится слой воска, лака или другого изолирующего вещества. Анодное растворение происходит в тех местах, где металл обнажен;
- 5) изготовление сеток (аналогично электрохимическому гравированию). Сетку-рисунок наносят изолирующим составом на поверхность анода. Она предохраняет металл от растворения. Обнаженные участки внутри лаковой сетки растворяются;
- 6) изготовление листового металла малой толщины путем анодного растворения.

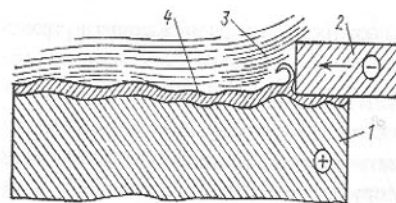
12.1.3 Анодно-механическая обработка металлов. При анодно-механической обработке удаление с анода появляющейся на его поверхности пленки продуктов растворения 4 осуществляется механическим путем (рис 12.3).

Инструмент (катод) 2 и заготовка (анод) 1 движутся относительно друг друга с большой скоростью. Инструмент и заготовка прижаты друг к другу так, что между ними остается очень тонкая пленка электролита 3.

При прохождении электрического тока по цепи электрод-инструмент – электролит – анод последний под действием происходящих электрохимических процессов растворяется, при этом на нем осуществляется копирование формы электрода-инструмента.

При движении электролита в межэлектродном пространстве можно не только удалять образующиеся гидроокиси, но и выполнять обработку на повышенных плотностях тока (до сотен А/см^2), если обеспечить интенсивное охлаждение электролита, нагреваемого большими токами.

Анодно-гидравлическая размерная обработка осуществляется в станках, универсальных или специализированных. Каждый такой станок содержит



1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – электролит; 4 – пленка продуктов растворения

Рисунок 12.3 – Схема чистовой анодно-механической обработки.

Механические усилия, прикладываемые к инструменту для удаления пленки продуктов растворения сравнительно невелики и ни в какое сравнение не идут с усилиями, приложенными к инструменту при механической обработке.

Разновидностью чистовой анодно-механической обработки является *электроабразивная* обработка. В этом случае вместо металлического диска в качестве инструмента применяют токопроводящие абразивные круги.

Они изготавливаются из смеси абразивных зерен с металлическими порошками или графитом, придающими кругам электропроводность.

В некоторых случаях абразивные зерна подаются вместе с электролитом в межэлектродное пространство (между инструментом и заготовкой).

Другой разновидностью анодно-механической обработки является *электроалмазная* обработка. При этом в качестве инструмента применяют металлические круги с нанесенными на их поверхность алмазными зернами. В этом случае предотвращается металлический контакт инструмента с изделием, что позволяет повышать напряжение и плотность тока (до $300-500 \text{ А/см}^2$) при очень малых зазорах ($0,01-0,03 \text{ мм}$), обеспечивая высокую производительность при высокой чистоте поверхности.

Анодно-механические, электроабразивные и электроалмазные методы обработки могут осуществляться на обычных, лишь слегка измененных, шлифовальных станках.

12.1.4 Источники питания установок электрохимической обработки.

Электрохимическая обработка, основанная на анодном растворении, ведется на постоянном, импульсном, пульсирующем и асимметричном переменном токе. Источники питания (ИП) преобразуют электрическую энергию промышленной сети в необходимую для электрохимической обработки.

ИП должны отвечать ряду требований:

- обеспечение необходимой точности и стабильности обработки;
- исключение разрушения электродов при коротких замыканиях;
- обеспечение плавного и ступенчатого регулирования выходных величин и их стабилизацию.

Кроме того, они должны быть экономичными, удобными в эксплуатации, малогабаритными. Технологические возможности ИП определяются их внешними характеристиками, которые могут быть жесткими, естественными (слабопадающими) и крутопадающими.

В качестве ИП раньше использовались генераторы постоянного тока, а сейчас в основном используются полупроводниковые выпрямители, регулирующими элементами в которых являются тиристоры. Эти ИП могут обеспечивать, необходимое для работы, выпрямленное напряжение от 2 до 36В и токи до 30000А.

Источники питания состоят из следующих узлов: понижающего трансформатора, выпрямителя, цепи стабилизации условий обработки, регулирования параметров, а также защиты ИП и самого станка при нарушении нормального протекания процесса обработки.

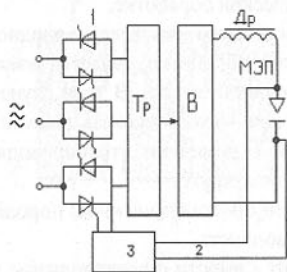


Рисунок 12.4 – Принципиальная схема тиристорного источника питания установки электрохимической обработки.

В статических источниках питания в качестве регулирующего элемента применяют тиристорные регуляторы, поскольку они имеют малую массу и габариты, меньшую инерционность, более высокий КПД. Кроме того, они снабжены быстродействующей системой защиты оборудования от коротких замыканий.

В схеме рис. 12.4 используются тиристоры 1 на первичной стороне силового трансформатора Тр с неуправляемым выпрямителем В на его вторичной стороне. Тиристоры 1 включены в расщелку фаз сети.

Для получения жесткой внешней характеристики источника питания блок 3 управляет тиристорами по сигналам обратной связи 2 по выходному напряжению с межэлектродного промежутка (МЭП). Дроссель Др включен в цепь для уменьшения пульсаций рабочего тока при тиристорном регулировании.

Правила техники безопасности при эксплуатации станков для анодно-механической обработки те же, что и при обычном шлифовании и полировании. Для предотвращения поражения электрическим током необходимо проверять сопротивление изоляции токоведущих частей относительно корпуса и исправность заземления. Кроме того, необходимы местные защитные приспособления для защиты рук от повреждений быстро вращающимися частями станков, местная вентиляция, в ряде случаев – защитные очки.

Вопросы для самопроверки.

1. Что такое гальваностегия?
2. Что такое гальванопластика?
3. Как осуществляется анодное травление и полирование металлов?
4. Какие операции можно производить электрохимическим способом?
5. Как осуществляется анодно-гидравлическая обработка изделий?
6. Как осуществляется анодно-механическая обработка металлов?
7. Что применяется в качестве инструмента при электроабразивной и электроалмазной обработке?
8. Какой ток используется при электрохимической обработке?
9. Какие требования предъявляют к источникам питания для электрохимической обработки?
10. Какие источники питания используются для электрохимической обработки?
11. Какие правила техники безопасности необходимо соблюдать при эксплуатации станков для анодно-механической обработки?

12.2 Электрофизические методы обработки материалов

12.2.1 Физические основы электроэрозионной обработки металлов. При электроэрозионной (искровой) обработке удаление металла с отдельных частей изделия обуславливается тепловым воздействием униполярных импульсов электрической энергии на поверхности изделия.

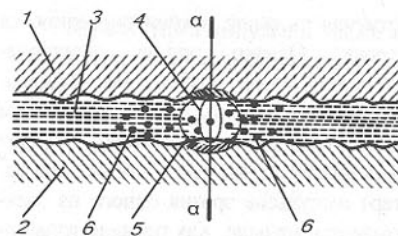


Рисунок 12.5 – Схема развития электроэрозионного разряда.

Электроэрозионный способ позволяет обрабатывать токопроводящие изделия любой механической прочности, вязкости, хрупкости, получать детали сложных форм и осуществлять операции, невыполняемые другими методами. Однако по сравнению с механической электроэрозионная обработка имеет ряд недостатков: низкая производительность, большой расход электроэнергии; для получения высокой чистоты поверхности приходится затрачивать

гораздо больше времени, чем, например, при абразивной обработке.

На рис. 12.5 показана схема электроэрозионного разряда.

В процессе электроэрозионной обработки при сближении электрода инструмента – 1 и электрода-изделия – 2 между ними возникает серия разрядов, имеющая весьма кратковременный (импульсный) характер с длительностью импульса 10^{-2} – 10^{-6} с. Межэлектродный промежуток при этом должен быть заполнен рабочей жидкостью 3.

Так как поверхность обоих электродов – изделия и инструмента не является идеально гладкой, а имеет выступы и впадины, пробой межэлектродного промежутка при сближении происходит в наиболее узком месте, где расстояние между выступами минимальное.

Из-за высокой концентрации энергии в месте разряда в нем развиваются высокие температуры, благодаря чему металл выступов плавится и испаряется, а на их месте на поверхности обоих электродов образуются лунки. В зоне разряда образуется газовый пузырь 4 из паров металла и рабочей жидкости и под действием высокого давления паров и динамических усилий капли расплавленного металла 5 выбрасываются за пределы электродов и застывают в рабочей жидкости в виде металлических шариков 6. После окончания импульса разряда происходит деионизация (восстановление) разрядного промежутка.

Если электрическая прочность промежутка успеет восстановиться до начала нового импульса, то следующий разряд возникает уже в другом месте. В результате снимаются микронеровности на обоих электродах. При этом в месте разряда происходит образование лунок, поверхность остается шероховатой, благодаря чему местные разряды продолжаются и с обоих электродов постепенно снимаются

все новые порции металла. Естественно, что электроды по мере срабатывания необходимо сближать.

Если к моменту начала следующего импульса разрядный промежуток не успевает деионизироваться, то разряд повторится в том же самом месте и может перейти в непрерывно горящую дугу, что приведет к выходу из строя изделия и инструмента. Возможность образования дуги тем вероятнее, чем выше частота импульсов при той же длительности и чем больше их длительность при той же частоте.

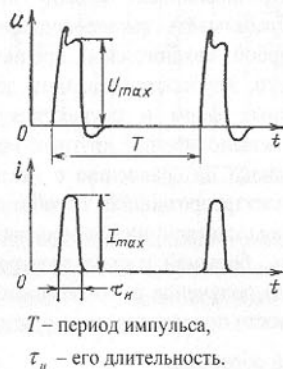


Рисунок 12.6 – Импульсы напряжения и тока в межэлектродном промежутке

Поэтому электроды-инструменты выполняют обычно из латуни, меди, алюминия. С другой стороны, выброс материала при прочих равных условиях будет меньше, чем выше температура плавления материала. Поэтому иногда в качестве материала электрода-инструмента применяют тугоплавкие материалы: графит, вольфрам, композиции меди и вольфрама.

Кроме того, эрозия электродов зависит также от электрического режима обработки. При увеличении длительности импульсов теплота быстрее рассеивается в толще электрода с большей теплопроводностью, чем с меньшей. Поэтому, применяя униполярные импульсы, подбирая материал для электрода-инструмента и регулируя электрический режим обработки, можно добиться малой эрозии инструмента, а в ряде случаев свести ее практически к нулю.

В качестве рабочей жидкости обычно применяют керосин, дизельное топливо, технические масла и в ряде случаев воду. Почти все жидкости горючие и требуют высокой осторожности в работе во избежание их возгорания. Ввиду этого применяют сорта масел и топлива с высокой температурой вспышки.

Режимы электроэрозионной обработки можно подразделять на *черновые*, *чистовые* и *отделочные*. Этим режимам соответствуют большие и малые энергии импульсов. При большой энергии импульса больше снимается металла, что приводит к увеличению производительности и шероховатости поверхности; и наоборот. Поэтому часто прибегают к регулированию режима установки в процессе обработки: вначале работают на повышенных энергиях импульсов, снимая относи-

тельно быстро основной металл, а затем снижают мощность разрядов для получения более гладкой поверхности.

Импульсы тока в разряде характеризуются амплитудой U_{max} и I_{max} , длительностью τ_u , частотой и скважностью q

$$q = \frac{T}{\tau_u}. \quad (12.1)$$

Параметрами импульсов также являются максимальные и средние значения тока и напряжения, максимальная и средняя мощность импульса, а также его энергия:

$$I_{cp} = \frac{1}{\tau_u} \int_0^{\tau_u} i(\tau) d\tau, \quad U_{cp} = \frac{1}{\tau_u} \int_0^{\tau_u} u(\tau) d\tau. \quad (12.2)$$

где i и u - мгновенное значение тока и напряжения.

Действующее значение тока и напряжения за период соответственно

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(\tau) d\tau}, \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(\tau) d\tau}. \quad (12.3)$$

Энергия импульса

$$A = \int_0^{\tau_u} U(\tau) i(\tau) d\tau. \quad (12.4)$$

Средняя мощность импульса

$$P_{u,cp} = \frac{A}{\tau_u} \quad (12.5)$$

Поскольку при прохождении тока разряда межэлектродный промежуток имеет малое сопротивление, амплитудные значения тока в импульсах достигают нескольких миллионов ампер, скорость нарастания тока $\frac{di}{d\tau}$ - до 10^8 А/с. При этом плотность тока в опорных пятнах разряда составляют 10^{10} А/см², а давление в зоне разряда достигает 10^8 Н/м².

12.2.2 Источники питания электроэрозионных установок. Для качественной электроэрозионной обработки необходимо, чтобы через межэлектродный промежуток (МЭП) проходили импульсы электрической энергии разделенные промежутками.

Для различных операций требуются различные характеристики импульсов. Для чистовой обработки необходимо ограничить не только энергию импульса, но

и его длительность, следовательно, нужно повысить частоту импульсов. Для черновой обработки можно применять, наоборот импульсы больших энергий, большой длительности и малой скважности.

Для питания электроэрозионных установок применяют различного рода генераторы импульсов (ГИ). К ним предъявляют следующие требования:

- 1) необходимость достижения высокого КПД;
- 2) стабильность импульсов тока (постоянства их длительности зависит от постоянства свойств МЭП и крутизны переднего фронта импульса напряжения);
- 3) высокая степень крутизны переднего фронта импульса напряжения.

Импульсные генераторы различают по принципу действия, конструкции и параметрам импульсов. ГИ условно подразделяют на *зависимые, ограниченно зависящие и независимые*. В первых из них параметры генерируемых импульсов определяются физическим состоянием межэлектродного промежутка. В независимых генераторах импульсы не связаны с состоянием МЭП.

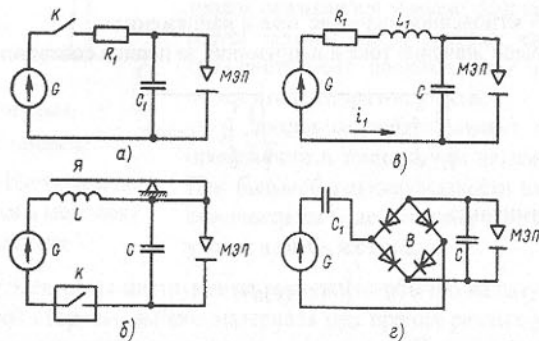


Рисунок 12.7 – Схема импульсных релаксационных генераторов

Одним из основных элементов ГИ является *накопитель*. Электрическая энергия в накопителе может запасаться в виде электрического поля конденсатора или электромагнитного поля индуктивной катушки. Применяются также комбинированные накопители, содержащие активное сопротивление, емкость и индуктивность – *релаксационные генераторы* (рис. 12.7). В процессе их разрядки расходуется энергия, накопленная в реактивных элементах цепи (конденсаторе или индукционной катушке).

RC – генератор импульсов (рис. 12.7, а) состоит из последовательно соединенных источника питания G , ключа K , токоограничивающего сопротивления R_1 и накопительного конденсатора C_1 , подключенного параллельно МЭП.

Емкостной накопитель заряжается от источника питания через ограничивающее сопротивление R_1 , благодаря чему зарядный ток много меньше тока импульса I_u . К концу зарядки напряжение на конденсаторе U_{C1} будет равно напряжению источника питания и наступит пробой межэлектродного промежутка. При этом напряжение на МЭП резко падает и через него протекает импульс разрядного тока I_u . При достижении напряжением значения меньшего, чем напряжение

дуги, разряд прекращается. После этого снова начинается рост напряжения на конденсаторе; одновременно идет деионизация МЭП, восстановление его сопротивления.

Генераторы этого типа дают короткие импульсы с большой скважностью. Их недостатком является низкий КПД (30–40%), что объясняется большими потерями в токоограничивающих резисторах R_1 .

Иногда в ГИ вместо емкостного накопителя используют индуктивный. Однако широкого применения они не нашли, поскольку индуктивный накопитель уступает емкостному по энергетическим показателям.

В импульсном **LC-генераторе** (рис. 12.7, б) зарядный ток проходит к конденсатору C от источника питания G через обмотку вибратора L . Вначале он притягивает якорь $Я$ электромагнитного вибратора и увеличивает МЭП, поднимая электрод-инструмент.

К концу зарядки конденсатора ток через обмотку вибратора постепенно спадает, удерживающая якорь вибратора электромагнитная сила ослабевает и электроды начинают сближаться, уменьшая МЭП. После пробоя промежутка и прохождения импульса тока цикл работы генератора повторяется. Частота импульсов определяется соотношением L и C в цепи генератора.

Генераторы, выполненные по такой схеме имеют высокие КПД и производительность.

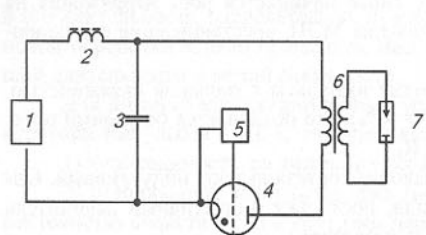
Введение в зарядную цепь **RC – генератора** индуктивности (переход к генератору типа **RLC**) повышает КПД генератора, так как в этом случае снижается токоограничивающее сопротивление. **RLC-генераторы** (рис. 12.7 в) работают при более низком напряжении, чем **RC-генераторы**, так как при наличии резонанса между индуктивностью и емкостью напряжение на конденсаторе-накопителе оказывается больше напряжения источника питания.

В электроэрозионной обработке применяются также **СС-генераторы** импульсов (рис. 12.7, г), в котором в качестве токоограничивающего элемента используется конденсатор C_1 . Такой генератор обладает более высоким КПД по сравнению с **LC** – генератором с электромагнитным вибратором.

Основной недостаток релаксационных генераторов – связь частоты импульсов тока с физическим сопротивлением МЭП. Он может быть устранен, если в разрядную цепь ввести управляемый переключатель, который в заданный момент времени подключал бы к МЭП накопительный конденсатор (рис. 12.8).

Таким путем можно получить короткие импульсы большой мощности и большой скважности с высокой частотой следования, обеспечивающие большую производительность при высоком классе чистоты обрабатываемой поверхности. В качестве коммутационных элементов могут служить тиристоры, электронные лампы, тиратроны и транзисторы.

Генераторы импульсов (ламповые, тиратронные) могут подключаться к высокому напряжению; в этом случае между конденсаторной батареей 3 и МЭП устанавливаются импульсный понизительный трансформатор 6. При этом потери в токоограничивающем резисторе 2 уменьшаются и КПД генератора повышается.



- 1 – высоковольтный генератор;
2 – токоограничивающая индуктивность;
3 – накопитель;
4 – тиристор;
5 – коммутационное устройство;
6 – импульсный трансформатор;
7 – межэлектродный промежуток.

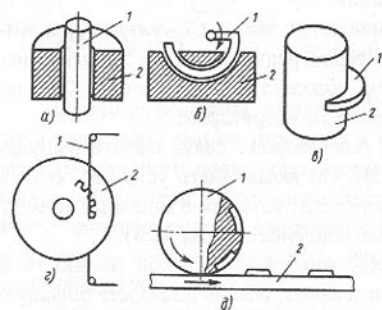
Рисунок 12.8 - Высоковольтный генератор с коммутационным устройством

В случаях, когда требуется получение длительных импульсов с малой скважностью (черновая обработка, высокая производительность, низкая чистота поверхности), применяют машины переменного тока – специальные, дающие униполярные импульсы, или обычные синхронные нормальной или повышенной частоты, в которых импульсы обратной полярности срезаются выпрямителями. Регулирование режима машинных генераторов импульсов осуществляется изменением их напряжения (а следовательно, амплитуды и энергии импульса) путем воздействия на их цепи возбуждения.

Полезная мощность *RC-генераторов* импульсов не превышает нескольких сотен ватт, полезная мощность машинных ГИ может достигать нескольких киловатт.

В электроэрозионных установках кроме регулирования электрического режима применяются специальные регуляторы для регулирования скорости перемещения электрода-инструмента и расстояние между электродами.

12.2.3 Области применения электроэрозионной обработки. Существует несколько технологических схем электроэрозионной обработки:



- 1 – электрод-инструмент;
2 – электрод-изделие.

Рисунок 12.9 – Схема электроэрозионной обработки

2) взаимное перемещение заготовки и электрода-инструмента по определенному закону. Схема имеет сходство с рядом процессов механической обработки, однако срез металла с заготовки в этом случае осуществляется за счет эрозии удаляемого металла под действием подводимых импульсов электрической энергии. По

1) копирования формы электрода-инструмента, представляющего собой обратное отображение формы детали (рис. 12.9, а, б). При этой схеме обработки электрод-инструмент путем поступательного движения внедряется в заготовку по мере удаления металла под воздействием импульсов электрической энергии. Точность формы получаемой детали в этом случае зависит от точности изготовления электрода-инструмента и его износа. Это наиболее распространенная технологическая схема, а выполняемые с ее помощью операции называются копияльно-прошивочными;

этой схеме проводят резание с использованием в качестве электрода-инструмента металлического диска или проволоки (рис. 12.9, в, д);

3) сочетание обеих технологических схем обработки. Осуществляя взаимное перемещение специального инструмента и заготовки по определенному закону, получают изделие сложной формы. Операции по этой схеме получили наименьшее распространение. Они используются при обкатке (рис. 12.9, д), электроэрозионной правке фасонных электроалмазных кругов, образовании в стальных и твердосплавных роликах и валках узких (менее 0,5 мм) канавок и т.д.

Все указанные операции осуществляют на специальных станках, предназначенных для выполнения определенных операций, или универсальных. Для выполнения различных операций могут применяться специальные рабочие головки, например для шлифования, для нарезки резьб, для обработки сферических полостей.

Техника безопасности. В электроэрозионных станках, питаемых напряжением до 250 В, это напряжение подводится непосредственно к электродам, и возможно поражение персонала электрическим током при прикосновении к ним. Поэтому токоведущие части такого станка должны помещаться внутри металлического заземленного корпуса.

Станки, питаемые от генераторов импульсов высокого напряжения, снабжены импульсными трансформаторами и имеют обычно сравнительно низкое напряжение разряда, так что прикосновение к их электродам безопасно. Однако необходимо заземление одного из электродов, чтобы на них не появилось высокое напряжение при пробое изоляции импульсного трансформатора.

При работе на станках с конденсаторными батареями необходимо использовать резисторы для снятия с батарей заряда. В станках с высоким напряжением на конденсаторах необходимы блокировки, автоматически разряжающие батареи замыкателем при открывании двери шкафа. Если цепи управления станка питаются напряжением 220-380 В, то необходима блокировка на дверцах шкафа, отключающая при их открывании все цепи управления от сети.

Так как жидкости, используемые при электроэрозионной обработке, горючи, то возможно их возгорание, если разряды возникают на самой поверхности и если жидкость достаточно нагрета для того, чтобы у ее поверхности происходило выделение паров. Поэтому необходимо следить за тем, чтобы разрядный промежуток отделялся от поверхности слоем жидкости толщиной от 15 до 100 мм и более в зависимости от мощности станка.

Работающий на электроэрозионных станках персонал должен пройти обучение и инструктаж по общим правилам технической эксплуатации и безопасности обслуживания электроустановок промышленных предприятий.

Вопросы для самопроверки

1. Какой принцип электроэрозионной обработки металлов?
2. Какие недостатки имеет электроэрозионная обработка по сравнению с механической?
3. Объяснить схему развития электроэрозионного разряда.
4. Когда электроэрозионный разряд может перейти в непрерывно горящую дугу?
5. От чего зависит эрозия электрода-инструмента и как её уменьшить?
6. Какими показателями характеризуются импульсы тока в разряде?
7. Какие требования предъявляют к генераторам импульсов?
8. Объяснить работу RC-, LC-, RLC- и CC-генераторов импульсов.
9. Какие источники питания применяют для получения длительных импульсов с малой скважностью?
10. Область применения электроэрозионной обработки.
11. Техника безопасности при работе на электроэрозионных станках.

12.3 Установки магнитоимпульсной обработки металлов

При магнитоимпульсной обработке (МИО) металлические заготовки подвергаются деформации под действием сильных магнитных полей, возникающих в проводящем теле, помещенном в переменное магнитное поле.

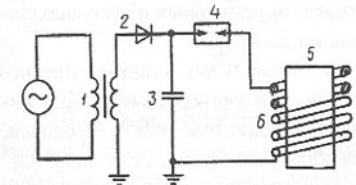


Рисунок 12.10 – Принципиальная схема электрической цепи установки

Принципиальная схема установки для осуществления магнитоимпульсной обработки показана на рис. 12.10. Она включает в себя зарядное устройство, батарею конденсаторов – накопитель энергии, коммутирующее устройство, разрядник и индуктор.

Батарея 3 заряжается от источника питания 1 через выпрямитель 2 постоянным током высокого напряжения.

Когда напряжение на конденсаторах достигнет полного зарядного значения, разрядник 4 пробивается и накопленный в конденсаторах заряд разряжается через индуктор 6.

При этом через индуктор будет проходить импульс тока большой амплитуды, в результате чего вокруг витков индуктора появится мощный импульс магнитного поля. Это поле наводит в заготовке 5 вихревые токи, взаимодействие которых с магнитным полем создают давление на поверхность заготовки. Это давление при сильных магнитных полях может достигать нескольких тонн или даже десятков тонн на каждый сантиметр поверхности заготовки.

Импульс тока при разряде конденсатора емкостью C и индуктивную катушку L имеет длительность и форму, определяемые параметрами разрядного контура R, L и C .

Энергия $A_{\text{раз}}$, выделяемая в цепи L и R при разрядке конденсатора, определяется выражением

$$A_{\text{раз}} = \frac{LI^2}{2} + RI^2\tau \tag{12.6}$$

поскольку $R \ll L$,

$$A_{\text{раз}} = 0,5I^2(L_{\text{уст}} + L_{\text{инд}}), \tag{12.7}$$

где $L_{\text{уст}}$ - индуктивность установки (батареи конденсаторов, ошиновки и разрядников);

$L_{\text{инд}}$ - индуктивность индуктора.

Электромагнитная энергия (12.7), выделяющаяся в цепи, расходуется на механическую работу деформации заготовки, нагрев заготовки и проводников цепи и частично рассеивается в пространстве.

Эффективность использования энергии батареи определяется соотношением

$$\eta = \frac{A_{\text{инд}}}{A_{\text{раз}}} = \frac{L_{\text{инд}}}{(L_{\text{инд}} + L_{\text{уст}})}. \tag{12.8}$$

В процессе магнитоимпульсной обработки витки индуктора также подвергаются большим усилиям, поэтому их конструкция должна быть жесткой. Индуктор выполняют из электропроводящего материала меди или бронзы и снабжают водяным охлаждением.

Выпускаемые промышленностью магнитоимпульсные установки имеют установленную мощность зарядного устройства от 3 до 20 кВА, работают на собственной частоте (разрядного контура) 25-100 кГц и позволяют осуществлять 60-1200 операций в час. Длительность разряда составляет 10^{-6} - 10^{-4} с.

Преимуществами установок МИО следует считать отсутствие движущихся и трущихся частей; легкость управления и регулирования мощности; компактность, простоту обслуживания, ремонтоспособность и возможность встраивать в поточные линии; высокую производительность; несложность механизации и автоматизации операций обработки; лучшие условия труда по сравнению с условиями труда при других методах обработки деталей давлением и т.д.

Недостатками является относительно невысокий КПД процесса; сложность обработки деталей с отверстиями или пазами, мешающими прохождению тока; недостаточная долговечность индукторов при работе в электрических полях высокой напряженности; сложность обработки деталей большой толщины.

Магнитоимпульсная обработка используется для развальцовки тонкостенных металлических заготовок любой формы, опрессовки, выдавливания гофров, раздачи труб, штамповки. Ее можно также использовать для опрессовки кабельных наконечников, обжатия тонкостенных металлических труб с образованием резьбы, напрессовку металлических колпачков на фарфоровые изоляторы, соединение металлических изделий с неметаллическими, сборка узлов и соединений и т.д.

Вопросы для самопроверки

- 1. Принцип магнитоимпульсной обработки металлов.
- 2. Объяснить работу установки для магнитоимпульсной обработки металлов.
- 3. Из каких материалов изготавливают индуктора для МИО?
- 4. Какие преимущества и недостатки установок МИО металлов?
- 5. В каких операциях используется МИО?

12.4 Электромагнитные насосы

Электромагнитные поля используют также в установках электромагнитной транспортировки жидких металлов. По принципу действия их подразделяют на кондукционные и индукционные, хотя те и другие являются насосами магнито-гидродинамического принципа действия.

Кондукционные насосы перекачивают проводящую жидкость в результате воздействия на неё силы, возникающей при взаимодействии магнитного поля,

создаваемого магнитной системой насоса, с электрическим током, проходящем через находящуюся в насосе проводящую жидкость.

Кондукционные насосы могут быть постоянного и переменного токов. Кондукционный насос *постоянного тока* подобен электродвигателю постоянного тока, в котором обмотка якоря заменена электропроводящей жидкостью.

Принцип действия кондукционных насосов *переменного тока* аналогичен принципу действия насосов постоянного тока. Однако в этом случае направление тока должно изменяться в соответствии с изменением направления магнитного поля, создаваемого электромагнитной системой насоса.

Индукционные насосы для перекачки жидких металлов являются одной из разновидностей магнитогидродинамических машин переменного тока. Подвижной частью в них является жидкий металл, для перемещения которого применяется бегущее или вращающееся магнитное поле, образованное трехфазной обмоткой переменного тока. Электромагнитные индукционные насосы в зависимости от формы канала с жидким металлом могут быть винтовые и линейные.

Винтовой индукционный насос по своему устройству аналогичен асинхронному электродвигателю с полым ротором. Он имеет два статора: внешний и внутренний. Трехфазная обмотка, питающаяся от сети трехфазного тока, размещена в пазах магнитопровода внешнего статора. Иногда её размещают и на внешнем и на внутреннем статоре. Между статорами в зазоре находится плоская труба из немагнитного материала, внутри которой протекает жидкий металл.

При подключении насоса к сети трехфазного тока в системе образуется вращающееся магнитное поле, индуцирующее вихревые токи в жидкометаллическом проводнике. Возникающие при этом электромагнитные силы вынуждают жидкий металл двигаться с линейной скоростью в сторону вращения поля.

Плоский линейный индукционный насос по своему устройству схож с асинхронным линейным двигателем. Он состоит из двух плоских статоров – индукторов, в пазах которых располагаются трехфазные многополюсные обмотки. В зазоре между индукторами расположен плоский канал прямоугольного сечения, внутреннюю полость которого заполняет жидкий металл.

Взаимодействие бегущего поля индукторов с индуцированными в жидком металле вихревыми токами приводит к появлению электромагнитных сил. В результате их действия на элементарные объемы металла в нем развивается давление и он перемещается с некоторым скольжением в направлении движения поля.

Существуют также **цилиндрические линейные индукционные насосы**. В них действующие на жидкий металл электромагнитные силы также создаются бегущим полем. Канал с жидким металлом в таком насосе имеет кольцевое сечение. Внутри канала размещается сердечник без обмотки. Поверх его расположен индуктор, охватывающий канал. Трехфазная обмотка расположена в кольцевых пазах индуктора.

Вопросы для самопроверки

1. Назначение и принцип действия кондукционных насосов постоянного и переменного тока.

2. Конструктивное исполнение и принцип действия винтовых индукционных насосов.
3. Конструктивное исполнение и принцип действия плоских линейных индукционных насосов.
4. Конструктивные особенности цилиндрических линейных индукционных насосов.

12.5 Электрогидравлическая (электровзрывная) обработка металлов

Электрогидравлический эффект – это взаимодействие высокого давления (до 300 МН/м^2) в результате высоковольтного электрического разряда между погруженными в непроводящую среду электродами.

По существу, электрический разряд в жидкости – это новый способ преобразования электрической энергии в механическую без промежуточных звеньев и с высоким КПД.

При приложении к двум электродам, находящимся в жидкости, например в технологической воде, высокого напряжения (десятки киловольт) между ними проскакивает искра, сопровождаемая сильным выделением газа и пара, образующим вокруг нее парогазовый пузырь. Если к межэлектродному промежутку приложить весьма кратковременный импульс тока, то выделение газа и пара сводятся к минимуму, а в жидкости появляется ударная волна давления большой силы, распространяющаяся во все стороны в плоскости, перпендикулярной оси разряда.

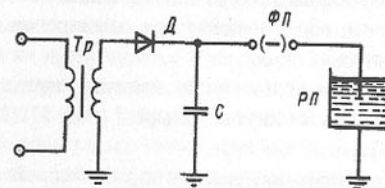


Рисунок 12.11 – Электрическая схема электрогидравлической обработки

В качестве генератора импульсов обычно используют схему с конденсатором-накопителем C , заряжаемым от высоковольтного трансформатора Tr через выпрямитель D (рис. 12.11). Разряд происходит при достижении на конденсаторе рабочего напряжения; сначала пробивается формировочный промежуток $\Phi П$, а за ним рабочий промежуток $Р П$. При этом разряд в жидкости получается очень кратковременным (импульсным) с крутым фронтом тока. Регулируя длину формировочного промежутка, можно изменять амплитуду и длительность импульсного разряда.

Энергетические возможности электрического разряда в непроводящей жидкости (воде) ограничиваются допустимым напряжением зарядки и емкостью конденсаторных батарей установок.

Электрогидравлическая обработка применяется для штамповки, вытяжки, гибки, развальцовки и тому подобных операций холодной деформации листового металла. Схема электрогидравлической штамповки детали показана на рис. 12.12. Листовую заготовку 2 (рис. 12.12, а) укладывают на матрицу 1 и прижимают к ней с помощью прижимных устройств 3. Над заготовкой расположена жидкая передо-

щая среда 4, в которой на определенном расстоянии от заготовки размещены положительный и отрицательный электроды 5, соединенные с генератором импульсов тока электрогидравлической установки.

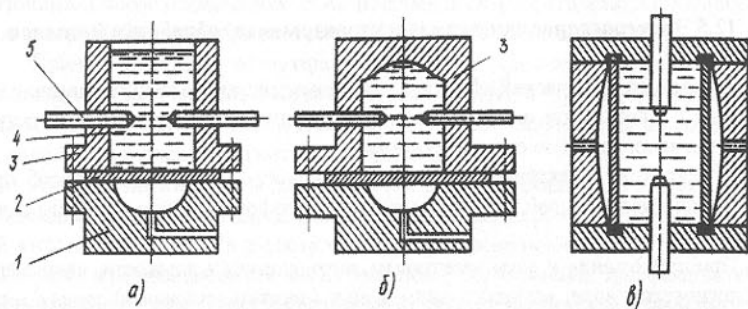


Рисунок 12.12 – Схема электрогидравлической штамповки

При высоковольтном разряде между электродами возникает токопроводящий искровой канал, мгновенное расширение которого приводит к возникновению в жидкости ударной волны. Деформация листовой заготовки происходит под действием ударной волны, образующейся при расширении газовой сферы, и сопутствующего гидротока.

Более эффективному использованию энергии разряда способствует размещение рабочих электродов в замкнутой камере 3 (рис. 12.12, б) или внутри самой заготовки (рис. 12.12, в).

Вторая область применения электрогидравлической обработки – очистка литья от окалины, пригара, формовочной земли.

Наконец, методом электрогидравлического удара можно дробить хрупкие твердые материалы, например, стекло.

Электрогидравлическая обработка пока не нашла широкого применения; выпускаются лишь отдельные установки для чистки литья и штамповки.

Вопросы для самопроверки

1. В чем сущность электрогидравлической обработки металлов?
2. Какая схема используется в качестве генератора импульсов?
3. Каким образом регулируется амплитуда и длительность импульсного разряда?
4. Пояснить схему электрогидравлической штамповки деталей.

12.6 Ультразвуковая обработка материалов

12.6.1 Физические основы ультразвуковой обработки. Ультразвуковой метод обработки является методом механического воздействия на материал. Ультразвуковым он называется потому, что частота ударов соответствует диапазону неслышимых звуков, т. е. составляет от 16 до 10^5 кГц.

Звуковые волны представляют собой механические упругие колебания, которые могут распространяться только в упругой среде в отличие от электромагнитных колебаний. Причем скорость звуковой волны тем больше, чем жестче и легче материалы среды.

При распространении в материальной среде звуковая волна переносит определенную энергию, которая может использоваться в технологических процессах.

Ультразвуковые колебания сопровождаются рядом эффектов, которые могут быть использованы как базовые для разработки различных процессов.

Кавитация – нарушение сплошности жидкости, возникающее при давлении ниже некоторого критического значения. Упругие колебания в жидкости вызывают процессы сжатия и разрежения, повышение и понижение давления. При понижении давления сплошность среды нарушается, в ней появляются полости (пузырьки); при повышении давления пузырьки захлопываются, что вызывает появление мгновенных пиков давления, достигающих значений 10^7 – 10^8 Н/м². В то же время на поверхности кавитационных пузырьков образуются электрические заряды и поля с напряженностью в сотни В/см. Это может вызвать пробой в пузырьках и ионизацию проникших в них паров жидкости. При захлопывании пузырьков ионы попадают в жидкость. Эти процессы могут привести как к чисто механическому воздействию на помещенные в жидкость изделия, так и к ускорению химических реакций, в том числе и электрохимических процессов, например электролиза.

Поглощение ультразвуковых колебаний веществом – необратимый процесс, в котором часть энергии превращается в тепловую энергию, другая же часть расходуется на изменение структуры вещества.

Коагуляция заключается в образовании из мелкодиспергированных частиц (дыма, пыли, тумана) значительно более крупных частиц. Движение частиц при наличии между ними сил притяжения приводит к соударению и в результате к их объединению и укрупнению.

Дегазация жидкостей или расплавов с помощью ультразвуковых колебаний происходит вследствие вытеснения газовых пузырьков, которые приходят в движение, объединяются в пузырьки больших размеров и всплывают.

Диспергирование является эффектом, противоположным коагуляции, и заключается в мелком дроблении вещества и перемешивании его с другим.

12.6.2 Электрооборудование ультразвуковых установок. Источники питания ультразвуковых установок предназначены для преобразования электрической энергии промышленной частоты в энергию переменного тока ультразвуковой частоты для возбуждения преобразователя. Они должны удовлетворять следующим основным требованиям: стабильность генерируемой частоты и возможность её регулирования в заданных пределах; регулирование мощности; небольшая стоимость, масса и размеры; надежность в работе и удобство в эксплуатации.

Основными элементами колебательной системы установок являются источник ультразвуковых колебаний, акустический трансформатор и детали крепления.

Источники ультразвуковых колебаний (УЗК) могут быть двух видов: механические и электрические.

К механическим источникам относятся ультразвуковые сирены и свистки, принцип действия которых основан на преобразовании механической энергии (например, скорости движения жидкостей или газов).

Электрические источники УЗК преобразуют электрическую энергию в механические упругие колебания соответствующей частоты. Для этих целей служат различные преобразователи: электродинамические, магнитострикционные, пьезоэлектрические. Наиболее распространенными являются магнитострикционные и пьезоэлектрические.

Принцип действия магнитострикционных преобразователей основан на продольном магнитострикционном эффекте, который проявляется в изменении длины металлического тела из ферромагнитных материалов (без изменения их объема) под действием магнитного поля. Магнитострикционный эффект у разных металлов различен. Высокой магнитострикцией обладает никель и пермендиор, которые нашли широкое применение в производстве магнитострикционных преобразователей.

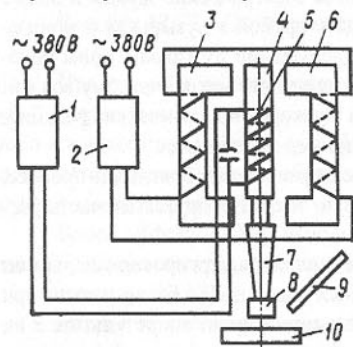


Рисунок 12.13 – Схема магнитострикционного преобразователя.

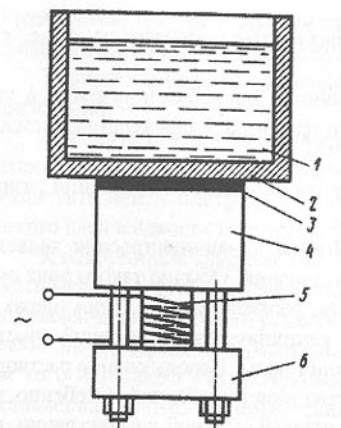
На рис. 12.13 показана схема магнитострикционного преобразователя. Сердечник вибратора 4 под действием высокочастотного магнитного поля, создаваемого обмоткой 5, сокращается, когда напряженность магнитного поля достигает максимума, и удлиняется, когда она уменьшается. При этом создается вибрация с удвоенной частотой по сравнению с частотой генератора 1. Эта вибрация через концентратор (акустический преобразователь скорости) 7 и инструмент 8 передается обрабатываемому изделию 10 в виде ударов с частотой 20-40 тыс. в секунду. Концентратор усиливает амплитуду упругих колебаний во столько раз, во сколько его верхнее сечение больше нижнего. Он представляет собой стержни различного сечения и формы, выполненные из материалов с коррозионной, кавитационной и жаростойкостью, а также стойкостью в агрессивных средах, на истирание и т.д.

Для повышения эффективности работы вибратора, его сердечник поляризуют, накладывая на него постоянное магнитное поле от электромагнитов 3 и 6, питаемых постоянным током от выпрямителя 2. В этом случае высокочастотная переменная слагающая лишь усиливает или ослабляет постоянное магнитное поле, при этом амплитуда его изменения увеличивается, а частота уменьшается.

Через шланг 9 к месту обработки подается рабочая жидкость (суспензия), в которой содержится много зерен абразива, что повышает эффект ультразвуковой обработки.

Недостатками магнитострикционных преобразователей является наличие потерь на перемагничивание сердечника, потребление значительного тока на подмагничивание, не высокая экономичность, низкое КПД.

На рис. 12.13 показана схема магнитострикционного преобразователя. Сердечник вибратора 4 под действием высокочастотного магнитного поля, создаваемого обмоткой 5, сокращается, когда напряженность магнитного поля достигает максимума, и удлиняется, когда она уменьшается. При этом создается вибрация с удвоенной частотой по сравнению с частотой генератора 1. Эта вибрация через концентратор (акустический преобразователь скорости) 7 и инструмент 8 передается обрабатываемому изделию 10 в виде ударов с частотой 20-40 тыс. в секунду. Концентратор усиливает амплитуду упругих колебаний во столько раз, во сколько его верхнее сечение больше нижнего. Он представляет собой стержни различного сечения и формы, выполненные из материалов с коррозионной, кавитационной и жаростойкостью, а также стойкостью в агрессивных средах, на истирание и т.д.



1 – ванна с раствором; 2 – дно ванны; 3 – клеящий состав; 4 – верхняя накладка; 5 – диски из ЦТС; 6 – нижняя отражающая накладка.

Рисунок 12.14 – Конструкция многослойного пьезопреобразователя

Действие пьезоэлектрических преобразователей основано на способности некоторых веществ изменять свои геометрические размеры (толщину и объем) в электрическом поле. Пьезоэлектрический эффект обратим, т.е. если пластину из пьезоматериала подвергнуть деформациям сжатия или растяжения, то на ее гранях появятся электрические заряды. Если пьезоэлемент поместить в переменное электрическое поле, то он будет деформироваться, возбуждая в окружающей среде ультразвуковые колебания. Широкое распространение получили пьезоэлементы на основе титаната бария, цирконата-титаната свинца (ЦТС), ниобата свинца и бария и др. Изделиям из этих материалов можно придавать любую форму, они имеют более высокий КПД, а также точку Кюри, равную 600 К, что позволяет обойтись без водяного охлаждения.

Колеблющаяся пластинка из пьезоэлектрического материала является электромеханическим преобразователем. Удельная мощность таких преобразователей лежит в пределах 1-5 Вт/см². На рис.12.14 показана конструкция пьезоэлектрического преобразователя для ускорения растворения компонентов, находящихся в растворе. Существуют ультразвуковые преобразователи на транзисторах и тиристорах, ламповые и машинные. Широкое распространение получили ультразвуковые генераторы УЗГ8-0,1/22 с автоматической подстройкой частоты. В генераторе имеется возможность ступенчатого регулирования мощности от 10 до 100% номинальной. Потребляемая из сети мощность 180 ВА, выходная мощность – 100 Вт, рабочая частота – (22±1,65) кГц. Генератор предназначен для питания станков размерной обработки.

12.6.3 Технологические применения ультразвука. Существуют три основные области применения ультразвука в технологических процессах: силовое воздействие на материал, интенсификация процессов и ультразвуковые методы контроля.

Наиболее эффективной является силовое воздействие на материал или ультразвуковая размерная обработка хрупких материалов (стекло, кварц, алмаз, керамика, кремний и др.), цементированных и азотированных сталей, титановых сплавов, обработка которых другими способами либо невозможна, либо затруднительна. Подвергать воздействию УЗК вязкие материалы нецелесообразно.

Большие возможности имеет метод ультразвуковой обработки в сварочной технике. Он может быть применен для точечной и шовной сварки, сварки внахлестку, стыковой, прессовой. Хорошо свариваются тугоплавкие и активные металлы

(молибден, цирконий, титан и др.), а также разнородные материалы такие, как медь, алюминий, никель.

Ультразвуковые методы широко используются для пайки и лужения, а также металлизации неметаллических материалов (фарфора, радиокерамики, стекла и теплоустойчивых пластмасс).

Особенно эффективна очистка ультразвуком деталей от загрязнений (жиров, оксидной пленки, окалины, накали и т.д.).

Одним из типичных применений ультразвука в машиностроении является очистка поверхности изделий от различных загрязнений. Обычно такого рода очистка выполняется с помощью моющих средств, растворителей в барокамерах, а также с помощью щеток. При использовании ультразвуковых колебаний очистка дает хорошие результаты даже при использовании воды. Использование растворителей в десятки раз ускоряет процесс и качество очистки изделий. Особенно эффективна ультразвуковая очистка при очистке деталей сложной конфигурации, когда механическая очистка, например щетками, затруднительна.

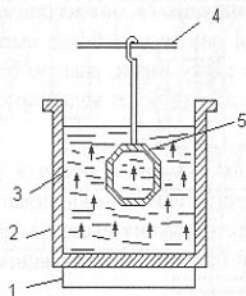


Рисунок 12.15 – Принципиальная схема ультразвуковой очистки

На рис 12.15 показана принципиальная схема ультразвуковой очистки. Подвергаемую очистке деталь 5 крепят на подвеске 4 и помещают в ванну 2, заполненную жидкостью (растворителем) 3, в котором возникают ультразвуковые колебания.

Генератор колебаний 1 может находиться под дном ванны или в самой жидкости. Очистка может осуществляться как на частотах 400-800 кГц при применении пьезоэлектрического преобразователя, так и на более низких частотах (20-30 кГц) при использовании магнитострикционных преобразователей.

Мощность, вносимая в ванну, должна быть такова, чтобы обеспечить кавитацию жидкости; в зависимости от ее состава мощность должна составлять 10-80 Вт на литр или 1-5 Вт/см² поверхности изделия.

Длительное воздействие кавитации может вызвать разрушение не только поверхностной пленки загрязнений, но и поверхности металла, особенно если в жидкости содержится абразивный порошок. В этом случае к разрушительному действию кавитационных пузырьков добавляются удары абразивных частичек. Таким путем можно осуществлять ультразвуковое шлифование, долбление сквозных или глухих отверстий любой сложной формы, сверление, фрезерование, точение, разрезание и даже нарезание резьбы.

Наиболее широкая область практического применения *ультразвуковой интенсификации* технологических процессов. Так сообщение ультразвуковых колебаний электролиту при хромировании ускоряет процесс в 5 раз, а при серебрении в 15 раз.

С помощью ультразвука можно вести *непрерывный контроль* технологического процесса без взятия проб. Так как скорость ультразвука в среде связана с её физико-химическими характеристиками, то, измеряя скорость ультразвука, можно судить

об изменениях состава и свойств данной среды, контролировать ее концентрацию, определять наличие примесей и следить за ходом технологического процесса.

Ультразвук широко применяется и в медицине для диагностики различных заболеваний.

Преимуществом ультразвуковых методов обработки является отсутствие механических и тепловых воздействий на изделие ввиду отсутствия механического контакта между инструментом и обрабатываемой поверхностью из-за наличия тонкого слоя жидкости между инструментом и изделием.

К недостаткам ультразвуковой обработки относятся: повышенная стоимость акустической энергии по сравнению с другими видами энергии; необходимость изготовления специальных установок и аппаратов для генерации ультразвуковых колебаний их передачи и распределения. Поэтому целесообразность использования того или иного ультразвукового метода обработки должна решаться путем составления технико-экономических расчетов, проведенных для различных методов и для каждого применения.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается ультразвуковой метод обработки материалов?
2. Что представляют собой звуковые волны?
3. Какими эффектами сопровождаются ультразвуковые колебания?
4. Какие требования предъявляют к источникам питания ультразвуковых установок?
5. На какие виды подразделяются источники УЗК?
6. Какие источники УЗК относятся к механическим?
7. Принцип действия и конструктивное исполнение магнитострикционных преобразователей.
8. Принцип действия и конструктивное исполнение пьезоэлектрических преобразователей.
9. Какие основные области использования ультразвука?
10. Привести примеры силового воздействия ультразвука на материал.
11. Объяснить, как осуществляется ультразвуковая очистка поверхности изделий.
12. Что лежит в основе ультразвукового контроля технологического процесса?
13. Какие преимущества и недостатки ультразвуковых методов обработки?

13 УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

13.1 Процессы, протекающие в установках электронно-ионной технологии

Современные промышленные предприятия, такие как металлургические, химические и цементные заводы, а также тепловые электростанции, являются источниками загрязнения окружающей среды. Разработаны различные мероприятия для ограничения вредных выбросов в атмосферу, а также в реки и другие водоемы.

Большую роль в защите окружающей среды играют установки электронно-ионной технологии (ЭИТ), в основу которых положен принцип взаимодействия силы электрических полей и электрически заряженных, диспергированных веществ, а также особенности движения этих веществ в электрическом поле.

В основе многочисленных технологических процессов, освоенных промышленностью, в которых используются электрические поля, лежат три явления: электрофорез, электросепарация и электроосмос.

Электрофорез, или **катафорез**, - движение частиц, взвешенных в жидкости или газе под воздействием электрического поля.

Электросепарация, или электростатическое обогащение, - отделение ценных компонентов от пустой породы, разделение смесей, основанное на взаимодействии сильных электрических полей и электрически заряженных диспергированных веществ.

Электроосмос - движение жидкости через капилляры или простые диафрагмы под действием внешнего электрического поля.

На основе этих явлений производят разделение смесей частиц различных веществ в электрическом поле: газа от взвешенных в нем жидких или твердых частиц; твердых частиц различных веществ друг от друга; жидкости от жидкости; жидкости от взвешенных в ней твердых частиц; электроосаждение; электроокраску; электроэмалирование; электроворсование; электроориентацию; применение электрического разряда в газах в химическом производстве.

13.2 Установки электрогазоочистки

Процесс электрогазоочистки можно разделить на следующие стадии:

- 1) зарядка взвешенных в газе частиц, подлежащих удалению;
- 2) движение заряженных частиц к электродам;
- 3) осаждение частиц на электродах;
- 4) удаление осажденных частиц из газового потока.

Установки, в которых высоковольтное электрическое поле используется для очистки загрязненных газов от взвешенных в них частиц, называют **электрофильтрами**.

Электрофильтры, по сравнению с другими типами фильтров, имеют следующие преимущества:

- 1) высокая эффективность очистки больших объемов газов (до степени очистки 99%);

2) возможность очищать газы с концентрацией частиц вплоть до 50 г/м^3 при температуре газа 500°C и с размером частиц от 100 до $0,1 \text{ мкм}$ и менее;

3) малый расход электроэнергии, на порядок меньше по сравнению с другими системами фильтров.

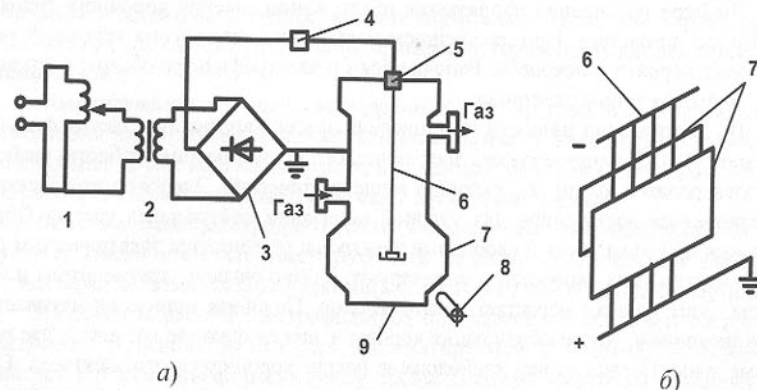


Рисунок 13.1 – Принципиальная схема трубчатого (а) и пластинчатого (б) электрофильтров

На рис. 13.1, а показана принципиальная схема трубчатого вертикального фильтра. Питание фильтра осуществляется от повышающего трансформатора 2 через выпрямитель 3. Напряжение на трансформаторе, а следовательно, и характеристики фильтра можно изменять с помощью регулирующего трансформатора 1. Запыленный газ поступает между коронирующим 6 и осадительным 7 электродами.

Коронирующий электрод изолирован от земли изолирующим вводом 5 и подключен к отрицательному полюсу источника 3; осадительный электрод подключен к положительному полюсу и заземлен. Между электродами возникает резко неоднородное электрическое поле.

Для известного критического значения E_0 необходимую разность потенциалов U_K для возникновения коронного разряда в фильтре между коронным электродом радиуса r_0 и осадочным R можно определить по формуле:

$$U_K = E_0 r_0 \ln \frac{R}{r_0}. \quad (13.1)$$

Линейную плотность тока в коронном разряде для рассматриваемого случая определяют по формуле Таунсенда:

$$I_K = \frac{2k(U - U_K)U \cdot 4\pi\epsilon_0}{R^2 \ln \frac{R}{r_0}}, \quad (13.2)$$

где I_K - сила тока с единицы длины коронирующего электрода;

- U - напряжение, приложенное к электродам;
 k - подвижность ионов;
 U_k - начальное напряжение коронного разряда.

По мере повышения напряжения после возникновения коронного разряда ток быстро возрастает. При дальнейшем повышении напряжения коронный разряд может перейти в искровой. Рабочие токи в электрофильтре обычно составляют 0,1-0,5 мА/м длины электрода.

По достижению разности потенциалов между электродами электрофильтра значения 50-80 кВ напряженность электрического поля способна сообщить свободным электронам и ионам газа скорость выше критической. Энергия таких электронов становится достаточной для ударной ионизации нейтральных частиц. Образующиеся при этом ионы и свободные электроны разгоняются электрическим полем до критических скоростей и ионизируют, в свою очередь, другие атомы и молекулы. Этот процесс нарастает лавинообразно. Подобная ионизация называется **коронированием**. После образования короны в электрофильтре возникает две различные зоны. Первая из них расположена вокруг коронирующего электрода. Она заполнена положительно и отрицательно заряженными ионами и электронами. Вторая зона занимает пространство между короной и осадительным электродом, она заполнена только отрицательно заряженными электронами и ионами. Поэтому при прохождении через полость электрофильтра запыленного газа большинство пылинок получает отрицательный заряд и направляется к положительному осадительному электроду 7. Осадительные электроды периодически встряхиваются специальными механизмами 8 и осевшая на них пыль осыпается в бункер 9.

Установка электрофильтров дает не только социально-общественный гигиенический эффект, но и весьма значительный экономический эффект, поскольку пыль, улавливаемая электрофильтром, часто представляет большую ценность, в ней содержится серебро, медь, никель, сурьма, цинк, свинец, магний и др.

Конструкцию электрофильтра конкретного назначения в основном определяют технологические условия его работы: состав и свойства очищаемых газов и содержащихся в газах взвешенных частиц, температура, давление и влажность очищаемых газов, требуемая степень очистки и т.д.

Электрофильтры подразделяются на две группы:

- 1) **однозонные**, в которых зарядка и осаждение частиц происходят в одной конструктивной зоне, где расположены коронирующая и осадительная системы;
- 2) **двухзонные**, в которых зарядка и осаждение частиц происходят в двух конструктивных зонах: в первой располагается коронирующая система – ионизатор, во второй – осадительная система – осадитель.

По конструкции осадительного электрода электрофильтры подразделяются на **трубчатые** и **пластинчатые**.

Трубчатые электрофильтры изготавливают из стальных труб, называемых осадительными электродами 7. по оси труб натянута проволока – коронирующий электрод (рис. 13.1, а).

Пластинчатый электрофильтр (рис. 13.1, б) собирают из ряда металлических пластин или частого ряда проволок, являющихся осадительными электродами 7.

Между рядами осадительных электродов подвешивают проволочные коронирующие электроды 6.

Пластинчатые электроды улавливают как жидкие, так и твердые частицы. Электрическое поле в них несколько слабее, чем в трубах, но зато они проще в изготовлении и встряхивать электроды в них значительно легче, чем в трубчатых. В пластинчатых электрофильтрах часто применяют горизонтальное движение очищаемого газа.

Коронирующие электроды выполняют в виде круглых или спиралевидных проводников плоского или крестообразного профиля, в виде свитого каната или цепи. Их монтируют на плоских рамах, или каждый электрод подвешивают сверху на изоляторе, а нижние их концы снабжают натяжными грузами.

Осадительные электроды трубчатых электрофильтров выполняют из труб круглого, квадратного или шестиугольного сечения. Осадительные электроды мокрых пластинчатых электрофильтров представляют собой гладкие пластины.

Надежность работы электрофильтров определяется в основном состоянием электродов, большинство которых эксплуатируются в условиях повышенных температур и агрессивной пылегазовой среды. Поэтому электроды целесообразно изготавливать из материалов повышенного качества: конструкционных и специальных сталей. Для мокрых электрофильтров осадительные электроды можно изготовлять из угля, графита, дерева, кирпича, пластмасс и т.д.

Для удаления с электродов уловленного продукта (если он не удаляется самотеком) в мокрых электрофильтрах используются брызгалки и форсунки, с помощью которых периодически или непрерывно промывается поверхность электродов. Коронирующие электроды промывают также через надеты на них воронки, заполненные промывной жидкостью.

В сухих электрофильтрах для удаления с электродов уловленного продукта применяют различные механизмы встряхивания. Ими могут быть ударно-молотковый, пружинно-кулачковый, магнитно-импульсный и др.

Для подачи высокого напряжения к осадительным электродам электрофильтра прокладывают стальную шину положительной полярности, которую в нескольких местах присоединяют к контуру заземления. Разрывы линии положительной полярности от выпрямителя к электрофильтру недопустимы из-за возможности поражения человека электрическим током.

К коронирующим электродам ток подается по высоковольтному бронированному одножильному кабелю с ограничительным сопротивлением 4 (рис. 13.1, а).

Источники питания электрофильтров выполняются в виде шкафов, содержащих регулятор напряжения, повышающий трансформатор, выпрямитель и систему управления, которые встраиваются в закрытые распределительные устройства. Управление электрофильтрами может выполняться вручную или с помощью автоматических устройств управления.

Эффективность работы электрофильтра характеризуется его КПД, представляющим собой отношение массы пыли, улавливаемой фильтром $G_{\text{ул}}$ к ее содержанию на входе $G_{\text{вх}}$

$$\eta = \frac{G_{\text{ул}}}{G_{\text{вх}}} = \frac{G_{\text{ул}}}{G_{\text{ул}} + G_{\text{вых}}} \quad (13.3)$$

Производительность фильтра и его КПД сильно зависят от приложенного к электродам напряжения, так как скорость движения частиц к осадительным электродам v и ток короны I_K связаны с напряжением на фильтре U соотношением,

$$v \sim AU(U - U_K);$$

$$I_K \sim BU(U - U_K), \quad (13.4)$$

где U_K - критическое напряжение возникновения короны;

A и B - коэффициенты.

Эффективность фильтра при повышении напряжения на нем в режиме искрового разряда сначала повышается, а затем из-за уменьшения напряжения во время разряда начинает снижаться. Поэтому оптимальное напряжение на фильтре должно соответствовать искровому режиму, но с ограниченной частотой искрения, чтобы искровой разряд не перешел в дуговой. Трудность заключается в том, что напряжение пробоя фильтра не остается постоянным, а все время меняется в зависимости от его загрязненности, изменения размеров и свойств частиц и т.п.

Для обеспечения оптимального электрического режима применяют различные системы регулирования питания электрофильтров, которые обеспечивают:

- 1) автоматическое регулирование напряжения от U_{\min} до U_{\max} и поддерживают его в пределах пробивного и сниженного на заданное значение;
- 2) ограничение энергии, выделяющейся при дуговых разрядах в электрофильтрах (для предотвращения плавления электродов), минимальные перерывы в подаче питания, необходимые для гашения дуги при пробое;
- 3) включение высокого напряжения только минимального значения;
- 4) возможность повышения и понижения напряжения вручную;
- 5) аварийное отключение агрегата;
- 6) сигнализацию исправной работы агрегата и аварийного положения.

Электрофильтры относятся к установкам высокого напряжения, поэтому на них распространяются **Правила техники безопасности** при эксплуатации установок напряжением свыше 1000 В, Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и другие нормативные документы.

13.3 Установки для очистки воды

Установки для очистки воды используют явление *электроосмоса*. Они предназначены для очистки морской воды с содержанием сухого остатка до 25-30 кг/м³ и позволяют получить питьевую воду с очень малым содержанием примесей. Установка разделена на 10-12 самостоятельных ячеек, принципиальная схема одной из которых показана на рис. 13.2.

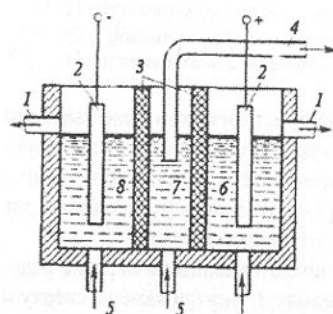


Рисунок 13.2 – Схема установки осмотического опреснения воды.

Ячейка разделена диафрагмами 3 (из керамики, пергамента и др.) на три отделения. В отделения 6 и 8 вводят электроды 2, на которые подают высокое напряжение постоянного тока. Подлежащая очистке вода по трубам 5 поступает в нижнюю часть всех трех отделений ячейки. Растворенные в воде соли Na_2SO_4 , CaSO_4 , CaHCO_3 и другие диссоциируют на катионы Na^+ , Ca^{2+} , H^+ , которые движутся к катоду, а анионы SO_4^{2-} , HCO_3^- , направляются к аноду (отделение 6). В катодном отделении 8 вода становится щелочной, а в анодном 6 – кислой и по трубам 1 отводится из этих ячеек.

Обедненная солями вода из среднего отделения 7 первой ячейки по трубе 4 подается в нижнюю часть второй ячейки. После очищения в ней из среднего отделения второй ячейки вода поступает в нижнюю часть третьей ячейки и так последовательно через все 10-12 ячеек очистительного устройства.

По мере обеднения очищаемой воды солями сопротивление раствора постепенно от ячейки к ячейке возрастает. Поэтому к электродам ячеек от источника постоянного тока подводится напряжение, изменяющееся от 55 до 220 В и увеличивающееся от ячейки к ячейке по мере роста сопротивления раствора.

13.4 Установки для разделения суспензий

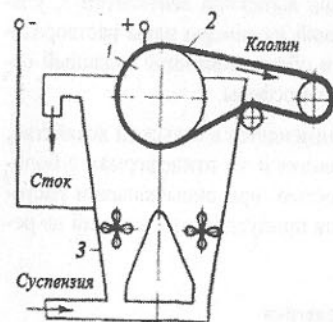


Рисунок 13.3 – Схема для установки разделения суспензий.

Разделение суспензий основано на явлении *электрофореза*. Установки для проведения этого процесса используются в промышленности для обезвоживания каолина при очистке его от примесей (пирита, слюды, кварца, и т.д.). Для этой цели загрязненный каолин размешивают в воде, добавляют в него жидкое стекло и после отстаивания удаляют грубые частицы. Полученную водную суспензию каолина пропускают через разделительную установку, принципиальная схема которой показана на рис. 13.3.

В этой установке вследствие явления электрофореза

твердые частицы суспензии перемещаются в направлении вращающегося анода 1 и осаждаются на фильтровальном сукне 2, покрывающем анод. Отделенная от каолина вода уходит к катоду 3 и затем в слив. Отложение каолина скапливаются на медленно перемещающемся сукне анода.

13.5 Установки электроокраски

Сущность метода окраски распылением в электростатическом поле высокого напряжения (до 140кВ) состоит в том, что между окрашиваемым изделием и коронирующим электродом создается постоянное электрическое поле, в которое вводится распыленный лакокрасочный материал. На рис. 13.4 показана схема установки для окраски металлических изделий в высоковольтном электрическом поле.

На заземленном конвейере 1 подвешивают подготовленные к окраске изделия 2. Конвейер движется от входа камеры к ее выходу 3. Внутри камеры сверху и снизу конвейера на изоляторах 5 подвешены рамы с металлическими сетками 6, соединенными с высоковольтным выпрямителем 4 и являющимися коронирующими электродами. При заданном напряжении между сетками и конвейером начинается коронный разряд.

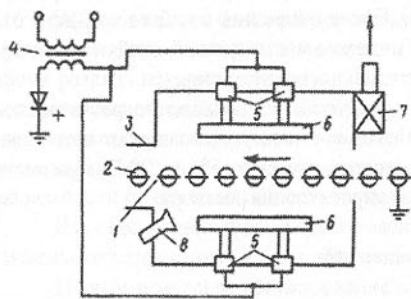


Рисунок 13.4 – Схема установки для окраски изделий в электростатическом поле.

Вдуваемые пневматическим распылителем через сопло 8 частицы краски заряжаются в электрическом поле и, превратившись в отрицательные ионы, движутся к положительно заряженным изделиям (аноду). Заряженные частицы падают на изделия со всех сторон и равномерно окрашивают плотным слоем краски всю его поверхность. В камере окраски установлен вытяжной вентилятор 7, удаляющий из камеры пары растворителей и обеспечивающий заданный состав атмосферы.

Электронно-ионная технология с успехом применяется в сельском хозяйстве, для очистки воздуха в животноводческих помещениях и на птицефермах с большой запыленностью и бактерицидной осемененностью, при опрыскивании растений; в кабельной и резиновой промышленности для припудривания изделий из резины и для других тонких операций.

Вопросы для самопроверки

1. Какие явления используются в установках электронно-ионной технологии?
2. Какие технологические процессы можно осуществлять с помощью установок ЭИТ?
3. На какие стадии можно разделить процесс электрогазоочистки?
4. Принцип работы электрофильтров.
5. На какие группы подразделяются электрофильтры?
6. Какова конструкция трубчатого и пластинчатого фильтров?
7. Из каких материалов изготавливают осадительные электроды?
8. Как осуществляют удаление уловленного продукта с поверхности электродов?
9. Как осуществляют питание электрофильтров?
10. Как оценивается эффективность работы электрофильтров?

11. Назначение систем регулирования питания электрофильтров?
12. Принцип работы установок для очистки воды.
13. Принцип работы установок для электроокраски.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Основные свойства и геометрические характеристики материалов для нагревательных элементов

Таблица ПА.1 – Основные свойства материалов для нагревательных элементов

Материал		Плотность кг/дм ³	Удельное электрическое сопротивление при 20°C, $\times 10^{-6}$ Ом·м	Температурный коэффициент электрического сопротивления (1/°C) $\times 10^{-3}$	Температура плавления, °C	Максимальная рабочая температура, °C
Сплавы						
Нихромы	X20H80-H	8,4	1,1	0,14	1400	1100
	X20H80-T3	8,2	1,15	0,12	1400	1100
	X15H60-H	7,9	1,1	0,14	1390	1000
Железохромоникелевые сплавы	X25H20C2	7,84	0,92	0,38	1420	900
	X23H18	7,8	0,9	0,4	1420	900
Нихромы с алюминием	XH70Ю	7,9	1,34	-	1400	1200
	X15H60Ю3 А	7,9	1,21	-	1390	1200
Железохромоалюминиевые сплавы	OX27Ю5А	7,2	1,42	0,05	1525	1300
	OX23Ю5А	7,27	1,35	0,05	1525	1200
	X13Ю4 (фехраль)	7,3	1,26	0,15	1450	800
Чистые тугоплавкие металлы						
Молибден		10,2	0,052	5,1	2625	1700/ 2200*
Тантал		16,6	0,15	4	3000	2500/ 2800*
Вольфрам		19,34	0,05	4,3	3400	2500/ 2800*
Ниобий		8,5	0,17	4	2470	1700/ 2200*
Неметаллические материалы						
Карборунд		2,3	800-1900	Переменный	-	1500
Графит		1,6	8-13	То же	-	2300/ 2800*
Уголь		1,6	40-60	>>	-	2300/ 2800*
Дисилицид молибдена		5,6	0,2-0,4	Средний 4,8	-	1700

*Числитель - в вакууме, знаменатель - в защитной атмосфере

Таблица ПА.2 – Геометрические характеристики и масса 1 м проволоки и ленты из сплавов высокого сопротивления

Диаметр проволоки (размер ленты), мм	Площадь поперечного сечения, мм ²	Поверхность 1 м, см ²	Масса 1 м, г		
			X15H60; X15H60Ю3; X20H80; X20H80-H	X23H18; X25H20; X27H17Ю3	X23Ю5; X27Ю5Т; X23Ю5Т
Проволока					
2,0	3,1	62	26	24	22
2,2	3,8	69	31	29	27
2,5	4,9	78	41	38	35
2,8	6,2	87	51	48	45
3,2	8,0	100	67	63	59
3,6	10,2	113	85	80	73
4,0	12,6	126	105	99	91
4,5	15,9	141	133	125	115
5,0	19,6	157	164	145	141
5,6	24,6	175	206	181	177
6,3	31,2	197	261	246	225
7,0	38,4	219	322	303	278
8,0	50,2	251	422	396	364
9,0	63,3	282	532	500	459
10,0	78,5	314	659	620	509
11,0	95,0	345	797	750	698
12,0	113,0	376	949	893	819
13,0	132,7	408	1114	1048	961
14,0	153,9	439	1292	1215	1063
15,0	176,7	471	1487	1395	1220
16,0	204,1	502	1686	1587	1388
17,0	227,0	543	1906	1791	1567
18,0	254,5	565	2136	2008	1757
19,0	283,5	596	2379	2238	1957
20,0	314,2	628	2636	2479	2169
Лента					
2,0x10	20	240	168	158	145
1,5x15	22	330	189	178	163
2,0x15	30	340	252	237	217
2,2x20	44	444	370	347	319
2,5x20	50	450	420	395	363
3,0x20	60	460	504	474	435
2,2x25	55	544	462	434	399
2,5x25	62	550	525	494	453
3,0x25	75	560	630	593	545
2,2x30	66	644	554	521	478
2,5x30	75	650	630	593	543
3,0x30	90	660	756	711	653
2,2x36	79	764	664	624	573
2,5x36	90	770	756	711	653
3,0x36	108	780	907	853	783
2,2x40	88	844	740	695	638
2,5x40	100	850	840	790	725
3,0x40	120	860	1020	947	870

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Трансформаторы для электротехнологических установок

Таблица ПБ.1 – Технические данные для электропечных трансформаторов с естественным масляным охлаждением

Таблица ПВ.1 - Технические данные для электронных трансформаторов сестенитовых масляных охлаждающих					
Тип	Мощность, кВА	Напряжение, кВ		Потери, кВт	
		ВН	НН	Х.Х.	К.З.
Трехфазные трансформаторы для питания дуговых сталеплавильных печей					
ЭТПМК-650/10	400	6	0,213	3	10
	400	10	0,213	3	10,5
ЭТПМК-1600/10	1000	6	0,225	5,3	205
	1000	10	0,225	5,3	21,5
ЭТПМК-2700/10	1800	6	0,242	8,2	28,1
	1800	10	0,244	8,1	28,4
ЭТПМК-4200/10	2800	6	0,257	13,5	41,5
	2800	10	0,257	13,5	40,8
ЭТЦПК-7500/10	5000	6	0,278	17,5	84,6
	5000	10	0,278	17,5	82,6
ЭТЦПК-13500/10	9000	6	0,318	32,7	114,4
	9000	10	0,317	32,7	114,7
ЭТЦНК-24000/35	15000	35	0,368	59,5	139
ЭТЦНК-40000/35	25000	35	0,417	85,6	217

Таблица ПБ.2 – Технические данные трансформаторов для дуговых электрических печей

Таблица ПБ.2 - Справочные данные трансформаторов для дуговых электрических печей								
Тип трансформаторного агрегата	Минимальное значение			Потери, кВт		Ток Х.Х. агрегата, % от номинального	Напряжение К.З.	
	Мощность, кВА	Напряжение, кВ		К.З. агрегата	Х.Х. при номинальном первичном токе агрегата		Трансформатора	Агрегата
		ВН	НН					
Однофазные трансформаторы для питания дуговых медеплавильных печей								
ЭПОМ-175/10	175	3 6,3 10,5	0,1	-	-	-	-	-
ЭПОМ-250/10	250	3 6,3 10,5	0,11	-	-	-	-	-
ЭОМК-390/10	250	6,0	0,117	5,2	1,8	8,2	5,2	30,2
		6,0	0,095	6,7	1,1	-	6,6	31,6
		10	0,118	5,2	1,8	8,2	5,3	30,3
		10	0,095	6,7	1,1	-	6,8	31,8
ЭОМК-600/10	400	6,0	0,131	9,1	2,3	7,3	5,4	25,4
		6,0	0,102	12,0	1,3	-	7,2	27,2
		10	0,131	9,1	2,3	7,3	5,3	25,3
		10	0,102	13,0	1,3	-	7,1	27,1

Таблица ПБ.3 – Характеристика однофазных трансформаторов для питания руднотермических печей

Таблица ПП.3 Характеристики однофазных трансформаторов для питания рудотермических печей							
Тип	Мощность, кВА	Напряжение, кВ		Потери, кВт		Напряжение к.з., %	Ток х.х., %
		ВН	НН	х.х.	к.з.		
ЭОЦН – 8200/10	4000	10	0,408	22,5	26,5	3,2	5,5
	5500	10	0,204	22,5	56	4,75	
ЭОЦН – 14000/35	8000	35	0,120	28	155	6,2	3,5
			0,240		86	4,93	
ЭОЦН-25000/35	16667	35	0,360	46,5	78,5	5,25	3,5
			0,800		125	5,3	
ЭОЦН-30000/35	16667	35	0,500	32,5	75,5	4,6	1,25
ЭОЦНК-40000/150	21000	35	0,230	32-40	250	11,9	3
			0,188			19,0	
			1,137			37,0	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтгаузен А.П. Применение электронагрева и повышение его эффективности. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 128с.
- Артамонов Б.А. и др. Размерная электрическая обработка металлов. – М.: Высшая школа, 1978. – 168с.
- Байсупов И. А. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Высшая школа, 1988. – 184с.
- Болотов А.В., Шепель Г. А. Электротехнологические установки. – М.: Высшая шк., 1988. – 336с.
- Волохонский Л.А. Вакуумные дуговые печи. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 328с.
- Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304с.
- Дзюба В.Л. и др. Электродуговые и высокочастотные плазмотроны в химико-металлургических процессах. – К.: Вища школа, 1991. – 170с.
- Донской А. В., Келлер О.К., Кратыш П.С. Ультразвуковые электротехнические установки. – Ленингр. отд-ние, Энергоиздат, 1982. – 204с.
- Дымовые электрофильтры./ В.И. Левитов, И. К. Решидов, В.М. Ткаченко и др. – М.: Энергия, 1980. – 448с.
- Китаев А.М., Китаев Я.А. Дуговая сварка. – М.: Машиностроение, 1983. – 272с.
- Коваленко В.С. Лазерная технология: Учебник. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1989. – 280с.
- Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 240с.
- Немилов Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 164с.
- Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 280с.
- Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1969. – 438с.
- Ракошии П.С. Электроимпульсная штамповка. – М.: Высшая шк., 1990. – 191с.
- Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. Ч.1. Электрические печи сопротивления. М.- Л.: Госэнергоиздат, 1975. – 431с.
- Установки индукционного нагрева./ А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов и др. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 325с.
- Фомичев Е.П. Электротехнологические промышленные установки. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 264с.
- Электрические печи сопротивления и дуговые печи./ М.Б. Гутман, Л.С. Кацевич, М.С. Лейканд и др.; Под ред. М.Б. Гутмана. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360с.

21. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов/А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др.; Под ред. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296с.

22. Электрометаллургия стали и ферросплавов./ Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Рысс М.А. и др. – М.: Металлургия, 1984. – 568с.

23. Электротехнологические промышленные установки: Учебник для вузов/ И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский; Под редакцией А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400с.

24. Электрошлаковые печи/ Б.И. Медовар, Л.М., Ступак, Г.А. Бойко и др.; Под ред. Б.Е. Патона, Б.И. Медовара. – К.: Наук. Думка, 1976. – 310с.

Составитель: Муха Валентин Павлович

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ (конспект лекций)

Подписано к печати 04.04.2008 г. Формат 60х84 1/16.

Усл. печ. л. 15,00. Печать лазерная. Заказ № 779. Тираж 300 экз.

Отпечатано в ООО «Цифровая типография».

г.Донецк, ул. Челюскинцев, 291а. Тел.: (062) 388-07-31, 388-07-30