

А. В. Манин

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

Часть I

Рекомендовано Методическим  
Советом Рыбинской государственной  
авиационной технологической  
академии имени П. А. Соловьева в  
качестве учебного пособия

Рыбинск 2010

Манин А. В. Электротехнологические процессы и установки. Ч. 1: Учебное пособие. – Рыбинск: РГАТА имени П. А. Соловьёва, 2010. – 188 с.

В первой части учебного пособия описаны электротермические процессы и установки, установки дугового и высокоинтенсивного нагрева, электрохимикоэрозионные процессы и установки, электрокинетические методы обработки материалов.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 210106 «Промышленная электроника», направления 140600 Электротехника, электромеханика, электротехнологии всех форм обучения.

Рецензенты: кафедра общей и технической физики Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова;  
директор АООТ «Алгоритм» В. Д. Афанасьев

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	<b>6</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>7</b>
<b>РАЗДЕЛ I. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ</b> .....	<b>10</b>
<b>ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ</b> .....	<b>10</b>
1.1. Электротермические установки и области их применения .....	10
1.2. Теплопередача в электротермических установках .....	11
1.3. Материалы, применяемые в электропечестроении .....	13
<b>ГЛАВА 2. УСТАНОВКИ НАГРЕВА СОПРОТИВЛЕНИЕМ</b> .....	<b>16</b>
2.1. Физическая сущность электрического сопротивления .....	16
2.2. Нагревательные элементы.....	18
2.3. Установки электроотопления и электрообогрева .....	21
2.4. Электрические печи сопротивления .....	23
2.5. Электрооборудование и регулирование параметров печей сопротивления .....	27
2.6. Нагрев сопротивлением жидких сред.....	30
2.7. Электрошлаковые установки.....	31
<b>ГЛАВА 3. УСТАНОВКИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ</b> .....	<b>32</b>
3.1. Физические основы электрической контактной сварки .....	32
3.2. Стыковая сварка .....	35
3.3. Точечная сварка.....	36
3.4. Шовная сварка .....	38
3.5. Электрооборудование установок контактной сварки .....	39
<b>ГЛАВА 4. УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА</b> .....	<b>43</b>
4.1. Физико-технические основы индукционного нагрева .....	43
4.2. Индукционные плавильные установки.....	47
4.3. Индукционные нагревательные установки.....	51
4.4. Физические основы диэлектрического нагрева .....	54
4.5. Установки диэлектрического нагрева .....	57
4.6. Источники питания установок индукционного и диэлектрического нагрева .....	59
<b>РАЗДЕЛ II. УСТАНОВКИ ДУГОВОГО НАГРЕВА</b> .....	<b>63</b>
<b>ГЛАВА 5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И СВОЙСТВА ДУГОВОГО РАЗРЯДА</b> .....	<b>63</b>
5.1. Ионизация газов. Понятие плазмы.....	63
5.2. Структура электродугового разряда .....	65
5.3. Особенности дуги переменного тока.....	70

5.4. Устойчивость и регулирование параметров электрической дуги .....	73
<b>ГЛАВА 6. ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ ПЕЧИ.....</b>	<b>77</b>
6.1. Классификация дуговых печей.....	77
6.2. Электрооборудование дуговых печных установок .....	79
<b>ГЛАВА 7. ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ .....</b>	<b>81</b>
7.1. Устройства для получения низкотемпературной плазмы и области их применения .....	81
7.2. Энергетические характеристики плазмотронов и источники питания.....	86
7.3. Плазменные плавильные установки .....	88
7.4. Установки плазменной резки и сварки металлов.....	90
7.5. Установки плазменного нанесения покрытий .....	92
<b>ГЛАВА 8. УСТАНОВКИ ДУГОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ.....</b>	<b>94</b>
8.1. Физико-технические основы дуговой сварки.....	94
8.2. Источники питания дуговой сварки .....	99
8.3. Ручная дуговая сварка .....	107
8.4. Установки механизированной и автоматической сварки.....	108
<b>РАЗДЕЛ III. УСТАНОВКИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО НАГРЕВА .....</b>	<b>111</b>
<b>ГЛАВА 9. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА.....</b>	<b>111</b>
9.1. Физико-технические основы электронно-лучевого нагрева.....	111
9.2. Технологическое применение электронно-лучевого нагрева.....	112
<b>ГЛАВА 10. ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ (ЛАЗЕРЫ) .....</b>	<b>115</b>
10.1. Основные принципы работы лазеров .....	115
10.2. Типы оптических квантовых генераторов .....	118
10.3. Основы технологии светолучевой обработки.....	120
<b>РАЗДЕЛ IV. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....</b>	<b>123</b>
<b>ГЛАВА 11. ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ УСТАНОВКИ .....</b>	<b>123</b>
11.1. Основы электрохимической обработки.....	123
11.2. Электролиз растворов и расплавов .....	124
11.3. Электрооборудование электролизных производств .....	127
11.4. Применение электрохимической обработки материалов в машиностроении...	131
11.5. Источники питания установок электрохимической обработки .....	134
<b>ГЛАВА 12. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>137</b>
12.1. Общая характеристика и физические основы процесса.....	137
12.2. Параметры импульсных разрядов .....	139

12.3. Генераторы импульсов .....	140
12.4. Разновидности электроэрозионной обработки и её оборудования .....	145
12.5. Электроконтактная обработка .....	147
<b>ГЛАВА 13. ЭЛЕКТРОХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА В ЭЛЕКТРОЛИТАХ.....</b>	<b>149</b>
13.1. Анодно-абразивная обработка.....	149
13.2. Анодно-механическая обработка .....	151
13.3. Оборудование электрохимико-механической обработки .....	154
<b>РАЗДЕЛ V. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ .....</b>	<b>156</b>
<b>ГЛАВА 14. УСТАНОВКИ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>156</b>
14.1. Физико-технические основы.....	156
14.2. Элементы оборудования магнитоимпульсных установок .....	159
14.3. Характеристика операций магнитоимпульсной обработки .....	162
14.4. Электромагнитные насосы.....	164
<b>ГЛАВА 15. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>166</b>
15.1. Физические основы электрогидравлического эффекта .....	166
15.2. Технологическое использование высоковольтного разряда.....	167
<b>ГЛАВА 16. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ.....</b>	<b>169</b>
16.1. Физическая сущность ультразвуковой обработки .....	169
16.2. Элементы оборудования ультразвуковых установок .....	171
16.3. Технологическое использование ультразвуковых колебаний .....	175
<b>РАЗДЕЛ VI. ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>177</b>
<b>ГЛАВА 17. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННО-ИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>177</b>
17.1. Характеристика электронно-ионных процессов .....	177
17.2. Осаждение в электрическом поле .....	178
<b>ГЛАВА 18. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ.....</b>	<b>180</b>
18.1. Принцип действия и устройство электрофильтров.....	180
18.2. Источники питания электрофильтров .....	182
18.3. Электростатические технологические процессы и их оборудование.....	184
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>186</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>186</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предметом курса «Электротехнологические процессы и установки» является ознакомление с физическими основами процессов преобразования электрической энергии в веществе, элементами инженерного расчёта параметров электротехнологических установок.

Этот курс базируется на знаниях, полученных при изучении физики и математики, и имеет исключительно важное значение для формирования знаний у специалистов об использовании элементов и устройств промышленной электроники в электротехнологиях.

В свою очередь, специфическое электрооборудование электротехнологических установок органически связано с технологическим процессом и может правильно создаваться и эксплуатироваться только при глубоком понимании основ технологии.

В первой части пособия излагаются физические основы электротехнологий и описания элементов электротехнологических установок.

Во второй части представлены основы проектирования источников электропитания для установок различного электротехнологического назначения.

## ВВЕДЕНИЕ

Установки, в которых происходит превращение электрической энергии в другие виды с одновременным осуществлением технологических процессов, называют электротехнологическими. Эти установки имеют сложное оборудование, включающее в себя рабочий орган, например, плазмотрон, плазменный реактор, электронную пушку, электродные системы дуговых и ионных агрегатов; специфические источники питания, автоматически поддерживающие заданный режим работы.

Совершенствование электротехнологии повлекло за собой создание материалов, обладающих новыми свойствами: более высокими прочностью, термостойкостью, устойчивостью к агрессивному действию химических реакций, и имеющих высокие электроизоляционные свойства и низкую теплопроводность. Современные успехи большинства отраслей промышленности и науки достигнуты благодаря применению электротехнологических процессов.

В настоящее время освоение технологии плазменного нанесения покрытий и пленок, ионно-лучевого легирования, плазменного травления, лазерной сварки, фотолитографии, а также применение новых материалов, полученных в электротехнологических установках, позволило создать принципиально новые устройства микроэлектроники.

Благодаря внедрению контактной сварки достигнут высокий уровень механизации сборочных работ в автомобильной промышленности и авиационной, обеспечивающий высокую скорость изготовления транспортных средств.

Электротехнологические процессы имеют весьма короткий срок перехода из стен лаборатории в производство и быт. Развитие физики и электротехники позволило создать и предложить производству технологические процессы, в которых используются свойства самих обрабатываемых веществ и материалов, обнаруживающиеся в электрических и магнитных полях. Например, на основе явлений поляризации диэлектриков, электромагнитной индукции разработаны такие прогрессивные электротехнологические процессы, как высокочастотная сушка сыпучих и пористых неэлектропроводных материалов, индукционный нагрев и плавка металлов.

Как известно, вещество может находиться в четырех агрегатных состояниях – твердом, жидком, газообразном и плазменном.

Твердое состояние – проводники, полупроводники и диэлектрики, металлы и неметаллы, кристаллические и аморфные вещества.

Жидкое состояние – проводники (расплавы металлов, солей, щелочей, оксидов), диэлектрики (минеральные и органические), особая разновидность – жидкие кристаллы.

Газообразное состояние – сложные активные вещества, которые в совокупности с обычными могут составлять системы, где происходит образование других соединений – целевых продуктов, в дальнейшем выделяемых методом конденсации.

Плазменное состояние – электропроводная среда, позволяющая проводить обменные реакции и транспортные процессы на ионном уровне, быть источником лучистой энергии и средством нагрева веществ.

Электрическое и магнитное поля могут быть постоянными или быстроменяющимися во времени и в пространстве, иметь широкий диапазон изменения напряженности. Посредством электрических и магнитных полей с веществом, находящимся в каждом из агрегатных состояний, можно совершать множество операций – изменение температуры, формы, структуры, состава, свойств в разных направлениях и т. д.

Электротехнологические установки условно группируют по результирующему действию электрического тока и магнитного поля, проявляющемуся в различных условиях.

1. *Установки, основанные на тепловом действии тока.* К ним относят бытовые нагревательные приборы, печи сопротивления прямого и косвенного действия, установки для нагрева жидкостей и газов – электрические котлы разных типов и калориферы, электродные ванны.

В установках контактной сварки электрическая энергия преобразуется в тепловую в переходном сопротивлении в точке контакта двух деталей.

В установках индукционного нагрева используется преобразование энергии переменного тока в энергию переменного магнитного поля, которая преобразуется вновь в электрическую, а затем в тепловую в нагреваемом теле.

Для нагрева диэлектриков применяются установки, использующие высокочастотное электрическое поле, где преобразование электрической энергии в тепловую идет через процессы поляризации веществ.

Нагрев электрической дугой используется в электродуговых печах, сварочных установках, сюда же относятся установки плазменной обработки металлов и неметаллических материалов.

Получения высококонцентрированных потоков тепловой энергии реализовано в электронно-лучевых и лазерных установках.

В установках электроэрозионной обработки тепловая энергия выделяется в канале разряда в жидкости при импульсном протекании тока большой силы.

2. *Установки, основанные на электрохимическом действии тока.* К ним относят электролизные ванны, заполняемые растворами или расплавами, установки для нанесения защитных и декоративных покрытий, а также установки для изготовления изделий методом гальванопластики, установки электрохимико-механической обработки изделий в электролитах.

3. *Электромеханические установки,* где прохождение импульсного тока вызывает возникновение механических усилий в обрабатываемом материале.

4. *Электрокинетические установки,* принцип действия которых основан на преобразовании энергии электрического поля в энергию движущихся частиц. К ним относят установки по разделению сыпучих материалов и эмульсий, очистке сточных вод, электроокраске, электрофильтрам.

# РАЗДЕЛ I. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

## ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

### 1.1. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Понятие «электротермия» объединяет большой класс технологических процессов в различных отраслях промышленности, основой которых служит нагрев материалов и изделий с помощью электрической энергии.

В электротермии можно выделить следующие способы преобразования электрической энергии в тепловую.

*Нагрев сопротивлением* происходит за счет выделения теплоты в проводящем материале при протекании по нему электрического тока. Этот вид нагрева основан на законе Джоуля-Ленца и применяется в установках прямого и косвенного действия.

В установках прямого действия теплота выделяется непосредственно в нагреваемом изделии, включаемом в цепь. В установках косвенного действия тепловая энергия выделяется в специальных нагревательных элементах и затем по законам теплопередачи поступает в нагреваемый объект. В обоих случаях нагреваемые объекты могут быть в твердом, жидком или газообразном состоянии.

*Индукционный нагрев*, основанный на преобразовании энергии электромагнитного поля в тепловую посредством наведения в нагреваемом теле вихревых токов и тепловыделения в нем по закону Джоуля-Ленца. Нагрев может осуществляться прямым или косвенным методом.

*Диэлектрический нагрев* помещенных в высокочастотное электрическое поле непроводящих материалов и полупроводников, происходящий за счет сквозных токов проводимости и смещения при поляризации.

*Дуговой нагрев*, при котором материал нагревается за счет теплоты, поступающей в него из опорных пятен дуги, а также вследствие теплообмена с дугой и электродами.

*Электронно- и ионно-лучевой нагрев*, в результате которого тепловая энергия выделяется при столкновении быстро движущихся электронов или ионов, ускоренных электрическим полем, с поверхностью нагреваемого объекта.

*Плазменный нагрев*, основанный на нагреве газа за счет пропускания его через дуговой разряд или высокочастотное электромагнитное или электрическое поле. Полученная таким образом низкотемпературная плазма используется для нагрева различных сред.

*Лазерный нагрев*, происходящий за счет нагрева поверхности объектов при поглощении ими высококонцентрированных потоков световой энергии, полученных в лазерах – оптических квантовых генераторах.

## 1.2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

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

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

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией теплопроводность обусловлена тепловым движением и энергетическим взаимодействием микрочастиц (молекул, атомов, электронов). Частицы с большей энергией отдают часть своей энергии менее нагретым при соударении. Скорость теплопередачи в этом случае зависит от физических свойств вещества, в частности от его плотности. При стационарных процессах теплопередачи тепловой поток, проходящий через тело в единицу времени, постоянный, т. к. в процессе передачи теплоты теплосодержание тела не изменяется.

Тепловой поток (Вт) через однослойную плоскую стенку при установившемся режиме определяется по формуле Фурье:

$$Q = \frac{(t_1 - t_2)}{lF\lambda}, \quad (1.1)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температуры поверхностей стенки, К;  $l$  – ее толщина, м;  $F$  – площадь проводящей стенки, м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, зависящий от природы вещества и температуры, Вт/(мК).

Для большинства применяемых в печестроении материалов:

$$\lambda = \lambda_0(1 + \beta t_{\text{CP}}), \quad (1.2)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности при 273 К;  $\beta$  – температурный коэффициент;  $t_{\text{CP}} = 0,5 \cdot (t_1 + t_2)$  – средняя температура стенки, К.

*Конвекция* – теплопередача в жидкостях и газах, при которой перемещаются отдельные частицы и отдельные элементы объема вещества, переносящие присущий им запас тепловой энергии. Перенос теплоты вместе с переносом массы вещества называют *конвективным теплообменом*.

Если передача теплоты конвекцией обусловлена лишь разностью плотностей вещества вследствие различных температур, то такая конвекция называется *естественной* или *свободной*. При наложении на нагретый объем вещества внешних сил (принудительное перемещение вещества) теплоперенос называют *вынужденной конвекцией*.

Тепловой поток конвективного теплообмена определяют на основании закона Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha_K (t_C - t_r) F, \quad (1.3)$$

где  $\alpha_K$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $t_C$  – температура стенки;  $t_r$  – температура окружающей среды;  $F$  – поверхность конвективного теплообмена, м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_K$  представляет собой количество теплоты, передаваемой в единицу времени через единицу поверхности при разности температур между поверхностью и омывающей жидкостью в 1 К.

*Излучение* – передача теплоты в невидимой (инфракрасной) и видимой частях спектра. При передаче теплоты излучением энергия передается в форме электромагнитных волн. Для передачи тепловой энергии наиболее существенными являются тепловое излучение с длиной волны 0,4 – 400 мкм. Между нагретыми телами, расположенными в пределах видимости друг друга, всегда происходит лучистый теплообмен. При этом суммарный тепловой поток направлен от более нагретого тела к менее нагретому. Этот поток определяется температурами тел, степенью их черноты и размерными факторами.

При излучении нагретого тела в неограниченное пространство (при односторонней теплопередаче) лучистый тепловой поток ( $\text{Вт/ м}^2$ ):

$$Q = c_s \varepsilon \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (1.4)$$

где  $c_s$  – постоянный коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\varepsilon$  – степень черноты тела, численно равная его поглощающей способности (для абсолютно черного тела  $\varepsilon = 1$ );  $T$  – абсолютная температура, К.

### 1.3. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОПЕЧЕСТРОЕНИИ

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

*Огнеупорные материалы* – материалы, используемые для сооружения различных печей и аппаратов, работающих в условиях высокотемпературного (выше 1200 К) нагрева.

По специфическим условиям работы они должны удовлетворять следующим требованиям.

1. Огнеупорность – это способность без деформации и оплавления противостоять воздействию высоких температур. В зависимости от степени огнеупорности их подразделяют на три класса: огнеупорные (огнеупорностью 1580 – 1770 К); высокоогнеупорные (1770 – 2000 К включительно); высшей огнеупорности (выше 2000 К).

Материалы с огнеупорностью ниже 1580 К называют *теплоизоляционными*.

2. Механическая прочность. При высоких температурах она имеет важное значение, поскольку огнеупорные материалы в процессе работы подвергаются воздействию значительных механических нагрузок в условиях высоких температур. Механическая прочность огнеупоров определяет верхний температурный предел их применения. Максимальной рабочей температурой огнеупорного материала принята температура, при которой начинается деформация материала от сжимающей нагрузки 20 кПа.

3. Термическая устойчивость – это способность материала без разрушения выдерживать резкие колебания температуры. Выгрузка из печи нагретого и последующая загрузка холодного материала создают в печах резкие колебания температуры, которые приводят к термическим напряжениям, способным разрушить огнеупорный материал.

4. Химическая нейтральность. По отношению к нагреваемому материалу и внутренней кладке печи огнеупорные материалы должны быть химически нейтральны, чтобы не засорять нагреваемую продукцию и не разрушаться ею путем химической эрозии.

5. Малая электропроводность. Огнеупорный материал в электрических печах часто одновременно является и электроизоляционным материалом. На нем монтируются электронагревательные элементы, он является тепло- и электроизолятором ванны печи от корпуса. По этой причине огнеупорный материал должен обладать хорошими электроизоляционными свойствами в условиях рабочих температур.

6. Малая теплопроводность. Она способствует снижению тепловых потерь через стенки электрической печи без чрезмерного увеличения их толщины.

Наиболее полно изложенным требованиям удовлетворяют огнеупорные материалы, изготавливаемые на основе кремнезема (2000 К), глинозема (2300 К), оксида магния (2600 К).

Массовыми огнеупорами для электроплавильных печей являются дианас (2000 К), магнезит (2570 К), хромомagneзит, доломит и шамот (2000 К).

Для печей сопротивления основным огнеупорным материалом является шамот, представляющий собой глубоко обожженную огнеупорную глину. Высокотемпературные печи футеруют изнутри в основном высокоглиноземистыми материалами – муллитом, алундом, а также углем и графитом.

Для выплавки тугоплавких металлов и сплавов применяются высококачественные и относительно дорогостоящие огнеупорные материалы – диоксид циркония (температура плавления 2800 К), оксид бериллия (2870 К), диоксид тория (3300 К) и др.

В практике нашли применение искусственные высокотемпературные волокна, теплопроводность которых в 2 раза ниже, чем материалов с ячеистой структурой.

*Теплоизоляционные материалы.* Обладают малой теплопроводностью при достаточной огнеупорности. Поэтому теплоизоляционные мате-

риалы – это, как правило, рыхлые легкие массы, сильно пористые изделия или крупнозернистые порошки.

Наибольшее распространение в качестве теплоизоляционных материалов получили диатомит, шлаковые и минеральные ваты, пеностекло, зонолит, а также комбинированные материалы на основе асбеста.

Диатомит – осадочная горная порода; по химическому составу – кремнезем, используется в виде насыпной изоляции.

Шлаковые и минеральные ваты получают из топочных и доменных шлаков, а также из различных пустых пород путем расплавления их в печах и последующего распыления струи расплава сжатым воздухом или паром.

Пеностекло получают путем добавления в расплав стекла газообразующих веществ. Полученные изделия из пеностекла обладают хорошо развитой пористостью и большой механической прочностью, максимальная рабочая температура 900 – 1000 К.

Зонолит – легкая чешуйчатая масса, получаемая из низкосортной слюды путем обжига. Применяется в виде засыпки (до 1400 К).

Асбест – волокнистый материал, с максимальной рабочей температурой 900 К. В чистом виде применяется в качестве засыпки. Обычно служит армирующим веществом для создания композиционных материалов (асбокартон, асбошнур и т. п.).

*Жаропрочные материалы.* Жаропрочность – свойство материала сохранять высокую механическую прочность при высоких температурах. Жароупорность – устойчивость к химическим реакциям при высоких температурах.

Основные жаропрочные материалы – сплавы железа со специальными легирующими добавками хрома, алюминия, никеля.

Увеличение содержания хрома до 30 % позволяет применять детали при температурах до 1300 – 1400 К.

Увеличение процентного содержания никеля в сплаве улучшает его обрабатываемость, повышает механическую прочность. Хромоникелевые стали используют для изготовления механически нагруженных конструкций и деталей (конвейерные ленты, направляющие толкательных печей и т. п.).

Для высокотемпературных электропечей в качестве жароупорных материалов применяют молибден, ниобий, вольфрам (работающие в защитных газах – аргоне, азоте, водороде), высокоогнеупорную керамику, карбиды и бориды некоторых материалов.

## ГЛАВА 2. УСТАНОВКИ НАГРЕВА СОПРОТИВЛЕНИЕМ

### 2.1. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Электрический ток – это направленное движение положительных или отрицательных электрических зарядов под действием электрического поля. Он может обеспечиваться движением только электронов, как это имеет место в вакууме при эмиссии электронов накаливаемым катодом, металлах и материалах, проявляющих свойство сверхпроводимости. Вещества, обладающие электронной проводимостью, называют *проводниками первого рода*. Проводящие среды, в которых прохождение тока обеспечивается движением частиц вещества – ионов, называют *проводниками второго рода*. К ним относятся электролиты – растворы и расплавы. Плазма имеет смешанную проводимость.

Соотношения между плотностью тока, напряженностью электрического поля и электропроводностью вещества определяются законом Ома. В общей форме этот закон имеет вид:

$$j = (n_e e_0 \mu_e + n_i e_0 \mu_i) E, \quad (2.1)$$

где  $j$  – плотность тока, А/см<sup>2</sup>;  $n_e, n_i$  – плотность носителей заряда электронов и ионов соответственно, 1/см<sup>2</sup>,  $\mu_e, \mu_i$  – подвижность электронов и ионов, численно равная скорости дрейфа заряженных частиц в направлении электрического поля при его напряженности  $E = 1$  В/см;  $e_0$  – заряд электрона.

Поскольку в металлах ток проводится исключительно электронами, уравнение (2.1) запишем в виде:

$$j = n_e e_0 \mu_e E. \quad (2.2)$$

Из формулы (2.2) следует:

$$\sigma = n_e e_0 \mu_e, \quad (2.3)$$

где  $\sigma$  – электропроводность вещества, зависящая от концентрации носителей зарядов  $n_e$ , а также от вида вещества и его состояния  $\mu_e$ .

С учетом (2.2) и (2.3) можно записать:

$$j = \sigma E. \quad (2.4)$$

Величину, обратную проводимости,  $\frac{1}{\sigma} = \rho$  называют удельным электрическим сопротивлением. Оно зависит от тех же факторов, что и

проводимость и для всех металлов увеличивается с ростом температуры. Удельное сопротивление проводника при заданной температуре:

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20)], \quad (2.5)$$

где  $\rho_{20}$  – удельное сопротивление проводника при температуре 293 К;  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления, Ом/К.

При приближении температуры к абсолютному нулю часть сопротивления, обусловленная тепловыми колебаниями атомов решетки, стремится к нулю, так что остается лишь сопротивление, обусловленное дефектами решетки (примесями и т. п.). У проводников второго рода с повышением температуры электропроводность возрастает.

Зависимость тока от приложенного напряжения называют *вольт-амперной характеристикой* вещества.

Если характеристики выражают зависимость постоянного напряжения от соответствующих значений постоянного тока, их называют статическими. Характеристики при достаточно быстрых изменениях тока называют динамическими. Они отличаются от статических вследствие, например, тепловой инерции проводника. В этом случае рассматривают статическое сопротивление и проводимость и динамическое сопротивление и проводимость проводника (рис. 2.1).

Рис. 2.1. Вольт-амперная характеристика проводника

Удельное статическое сопротивление  $\rho_{ст}$  пропорционально тангенсу угла  $\alpha$  наклона луча, проведенного из начала координат в данную точку характеристики, т. е.  $\rho_{ст} = \operatorname{tg}\alpha$ . Удельное динамическое сопротивление пропорционально тангенсу угла  $\beta$  наклона касательной в данной точке характеристики  $\rho_{дин} = \operatorname{tg}\beta$ . Переходя от удельного сопротивления к проводимости, запишем:  $\sigma_{ст} = \operatorname{ctg}\alpha$ ;  $\sigma_{дин} = \operatorname{ctg}\beta$ .

Величину  $\operatorname{ctg} \alpha = \sigma = \frac{dj}{dE}$  называют удельной дифференциальной проводимостью.

В переменном электрическом поле проводимость проводника является комплексной величиной:

$$\gamma = \sigma - ib, \quad (2.6)$$

где  $\sigma$ ,  $b$  – соответственно активная и реактивная составляющие проводимости.

При соударении с элементами структуры металла электроны обмениваются полученной ими в электрическом поле энергией, что выражается в нагреве проводника. Количество выделяющейся в проводнике теплоты зависит от сопротивления проводника, электрического тока в цепи, времени его прохождения и определяется законом Ленца-Джоуля:

$$Q = I^2 R \tau, \quad (2.7)$$

где  $I$  – ток, А;  $R$  – сопротивление, Ом;  $\tau$  – время, с.

Если выразить  $R$  через удельное сопротивление проводника, учесть его геометрические размеры  $l$  – длину, м, и  $S$  – площадь сечения, м<sup>2</sup>, то выделяющаяся в проводнике мощность:

$$P = \frac{U^2 S}{\rho l}, \quad (2.8)$$

где  $S$  – площадь сечения, м<sup>2</sup>;  $l$  – длина проводника, м.

## 2.2. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Выбор материала и конструкции нагревательного элемента (НЭ) определяется особенностями технологического процесса и конструкции установки. Материалы НЭ должны обладать высоким удельным электрическим сопротивлением; малым температурным коэффициентом удельного сопротивления; постоянным электрическим сопротивлением нагревателя в процессе длительного срока его службы.

По температурным пределам работы нагревательные элементы подразделяют на три группы:

- низкотемпературные – нагрев до 500 – 700 К и преимущественно конвективный способ теплообмена;
- среднетемпературные – нагрев до 900 – 1300 К с теплообменом конвекцией, теплопроводностью и излучением;
- высокотемпературные – нагрев до 2500 – 3300 К с преимущественно радиационным способом теплопередачи.

Для изготовления НЭ с рабочей температурой до 1500 К распространенными материалами являются нихромы (сплавы никеля и хрома), фехрали (хромоалюминиевые сплавы), а также хромоникелевые жаропрочные стали.

Нихромы содержат 75 – 78 % никеля и около 25 % хрома. Увеличение процентного содержания никеля в сплаве повышает его рабочую температуру. Добавка титана улучшает механическую прочность сплава.

Хромоникелевые жаропрочные стали содержат 22 – 27 % хрома и 17 – 20 % никеля, из них изготавливают НЭ с рабочей температурой до 1100 К.

Фехрали являются сплавом железа, хрома (до 13 %) и алюминия (до 4 %). НЭ из них работают при температурах до 1100 К.

Сплавы с содержанием хрома 20 – 27 % и с микродобавками элементов (бора, титана и др.) способствует получению температур в диапазоне 1470 – 1620 К.

Открытые НЭ применяются в печах и бытовых нагревательных приборах, они могут быть проволочные зигзагообразные, проволочные спиральные и ленточные. В зависимости от конструкции НЭ выбирают способ его крепления на футеровке печи (рис. 2.2, а – ж).

Для нагрева жидкостей или газов при различных технологических процессах (получение сухого перегретого пара) служат НЭ, выполненные в виде цилиндра из пористого металлокерамического материала (пористость 40 – 80 мкм), что обеспечивает проникновение жидкости или газа сквозь его стенки и одновременно их нагрев. Рабочая температура 400 – 600 К, напряжение на элементе 1 – 12 В.

Для обогрева поверхностей, сосудов, труб, панелей существуют НЭ, изготавливаемые из полиэфирной смолы с обеспечивающим электропроводность наполнителем – гибкие ленточные электронагреватели (ГЛЭН). Рабочая температура материала 400 – 500 К.

Для низкотемпературного нагрева широко применяются трубчатые НЭ – ТЭНы, представляющие собой металлическую трубку 1, заполненную теплопроводным электроизоляционным материалом 2, (плавленый периклаз), в котором находится электронагревательная спираль 3

(рис. 2.3). По сравнению с открытыми НЭ ТЭНаы более электробезопасны, могут работать в воде, жидких углеводородах, жидком металле, расплавах солей, оксидов и других средах, стойки к вибрациям и механическим нагрузкам. Мощность ТЭНов составляет от 100 Вт до 15 кВт, рабочее напряжение 36 – 380 В, рабочая температура 400 – 1000 К.

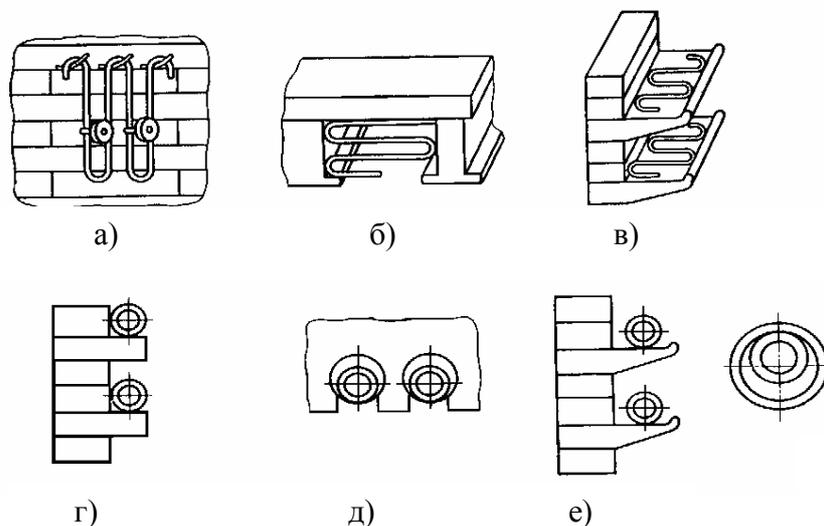


Рис. 2.2. Расположение нагревателей в электрических печах

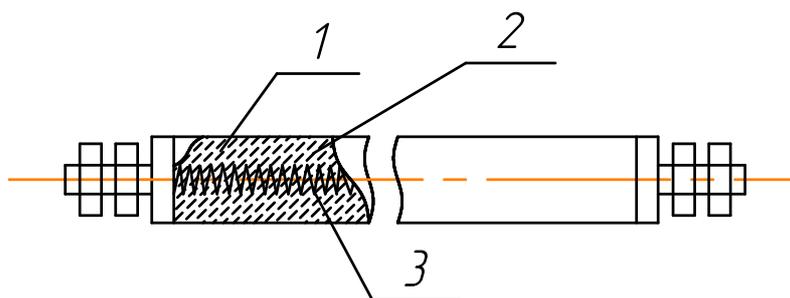


Рис. 2.3. Схема трубчатого электронагревателя (ТЭНа)

Для высокотемпературных печей с максимальной рабочей температурой до 1700 К применяются НЭ из карборунда (карбид кремния  $\text{SiC}$ ), известны под названием силитовых или глобаровых. Изготавливают в виде стержней диаметром 6 – 30 мм различной длины.

Для высокотемпературных установок (с максимальной температурой 2300 К и выше) нагреватели изготавливают из тугоплавких металлов, угля или графита.

При изготовлении НЭ из тугоплавких материалов применяют молибден, тантал, вольфрам в виде проволоки, ленты, стержней и листов различных сечений. Они могут работать лишь в атмосфере инертных газов: аргона, гелия, водорода, азота, а также в вакууме.

### 2.3. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРООБОГРЕВА

Электрические нагревательные установки (ЭНУ) применяют для: сушки изделий после окраски, пропитки; сушки помещений при строительных работах; подогрева газов для различных технологических целей; отопления помещений; разогрева емкостей с жидкостью, а также для нагрева твердых тел и устройств – прессов, штампов; прогрева технологических трубопроводов; прогрева бетона, грунтов и дорожных покрытий.

В электроотоплении и электрообогреве используются разнообразные ЭНУ, к ним относятся электрокалориферы, фены, различные устройства радиационного обогрева, электродкотлы, электрические теплоаккумулирующие устройства, устройства для оттаивания грунта, обогрева бетона, дорожных покрытий и т. д.

*Электрокалорифер.* Это ЭНУ, состоящая из нагревательного элемента и вентилятора. Электрокалорифер предназначен для нагрева воздуха и различных газов в технологических процессах. Такие электрокалориферы с вынужденной конвекцией, обеспечивающей интенсивный теплообмен, обладают в несколько раз меньшей поверхностью нагрева по сравнению с поверхностями ЭНУ со свободноконвективным способом теплообмена. При невысоких температурах НЭ (500 К) в калориферах применяется подвешенная на изоляторах открытая проволочная спираль. Калориферы этого типа обладают небольшим гидравлическим сопротивлением.

В калориферах могут применяться простые и ребренные трубчатые НЭ, обладающие развитой поверхностью нагрева.

Отопительный калорифер с трубчатыми ребренными нагревателями предназначен для нагрева воздуха до 400 К в системах воздушного отопления, вентиляции, искусственного климата и в сушильных установках. Он состоит из кожуха и трубчатых нагревательных элементов.

*Радиационные электронагреватели.* Проникновение излучения в глубь нагреваемого тела зависит от длины его волны и прозрачности тела. Для осуществления нагрева в различных диапазонах длин волн существуют соответствующие радиационные излучатели. Светлый (ламповый) излучатель представляет собой лампу накаливания с вольфрамовой нитью и стеклянной колбой. Температура вольфрамовой нити – около 2200 К, максимум излучения приходится на длину волны 1,3 мкм. Основная часть энергии излучается в диапазоне длин волн 0,8 – 3,5 мкм.

Светлый кварцевый излучатель представляет собой трубку из кварцевого стекла, внутри которой размещаются вольфрамовые, нихромовые или хромоалюминиевые спирали.

Темный излучатель представляет собой трубчатый НЭ, расположенный в фокусе полированного отражателя. Температура излучателя 700 – 1000 К, максимум излучения приходится на длины волн 2 – 5 мкм.

*Электрические сушила.* Установки для сушки изделий могут быть радиационного или смешанного действия, когда передача теплоты излучением сочетается с конвекцией. В качестве установок для сушки различного рода поверхностей могут применяться специальные излучательные панели. Нагреватели панелей выполняют в виде нихромовой спирали, намотанной на керамические трубки. Схема включения панели – излучателя позволяет осуществлять два режима: непрерывный и регулируемый, при котором по достижении воздухом заданной температуры нагреватели автоматически отключаются, а при понижении температуры включаются вновь.

*Установки для обогрева труб, прогрева бетона и грунта.* Наиболее рациональный способ электропрогрева бетона – пропускание через него тока. Для ввода энергии в массу прогреваемого бетона служат различные электроды. Их изготавливают из арматурной диаметром 6 – 10 мм или полосовой стали. Различают внутренние электроды, закладываемые в тело бетона, нашивные, прикрепляемые к поверхности опалубки или щитам со стороны, примыкающей к бетону, и плавающие, укладываемые на открытую поверхность бетона.

Электропрогрев прямым пропусканием тока применяют и для оттаивания грунтов. Оттаивание грунтов можно вести от дневной поверхности к слою талого грунта или в обратном направлении. В первом случае для электропрогрева применяют горизонтальные и сравнительно короткие вертикальные электроды. Мерзлый грунт – плохой проводник, поэтому в начале прогрева на дневной поверхности укладывают смоченный слабым электролитом слой опилок, в котором и выделяется тепловая энергия.

В городском электроснабжении применяется электрический обогрев дорожных покрытий на перекрестках, пешеходных тротуаров, взлетно-посадочных полос в аэропортах с целью предотвращения образования гололеда, а также очистки их от льда и снега. В качестве НЭ используется кабель, который располагается в дорожном покрытии на глубине нескольких сантиметров.

## 2.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Электрические печи сопротивления (ЭПС) применяются для технологических операций в машиностроении, металлургии, легкой и химической промышленности, строительстве, коммунальном и сельском хозяйстве. Разнообразие материалов, обрабатываемых в ЭПС, и видов технологических процессов привело к большому разнообразию конструкций ЭПС, выпуску их малыми сериями и даже в индивидуальном порядке.

Электropечи сопротивления выпускают в двух исполнениях: ЭПС косвенного и прямого действия. В ЭПС косвенного действия электрическая энергия превращается в тепловую в специальных нагревателях, а затем передается в рабочее пространство посредством теплопроводности, конвекции и излучения. В ЭПС прямого действия нагреваемое тело включается непосредственно в электрическую цепь. Нагревательные элементы в печах косвенного действия и нагреваемые тела, включаемые в цепь ЭПС прямого действия, могут быть проводниками первого и второго родов.

По уровню достигаемых температур ЭПС делятся на: низкотемпературные (900 – 1000 К), среднетемпературные (1000 – 1600 К) и высокотемпературные (выше 1600 К). Для данных групп ЭПС применяются различные материалы для изготовления нагревательных элементов, огнеупорные и теплоизоляционные материалы. По группам технологических процессов, выполняемых в печах, ЭПС можно разделить на нагревательные и плавильные, по режиму работы - на периодические и непрерывно действующие. В свою очередь, печи периодического действия, обслуживающие различные технологические процессы, могут быть камерные, шахтные, колпаковые, камерные с выдвигным подом, элеваторные. Среди ЭПС непрерывного действия различают конвейерные, толкательные, рольганговые, карусельные, с шагающим подом, пульсирующим подом, барабанные, протяжные.

В печах с контролируемой атмосферой применяются инертные газы, а также специальные газовые смеси, назначение которых термохимическая обработка поверхности изделий – азотирование, цементация и нитроцементация, проводимые с целью повышения поверхностной прочности и износостойчивости деталей. Выпускают также печи с водородной средой для различных технологических процессов, в т. ч. для восстановления металлов из оксидов и спекания изделий из порошков тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, ниобий, тантал и др.).

В печах периодического действия нагреваемые тела помещаются в рабочую камеру и постепенно нагреваются до заданной температуры, ос-

таваясь неподвижными. В методических печах нагреваемые детали загружаются с одного конца печи, перемещаются по ее длине, при этом прогреваются до заданной температуры и выдаются с другого конца печи. В таких печах температура в различных точках неодинакова. Температура повышается от загрузочного конца печи к выгрузочному. Печи непрерывного действия сложнее печей периодического действия, так как в них необходимо обеспечить перемещение деталей вдоль камеры печи, однако они являются более производительными при тех же габаритных размерах и обеспечивают интенсивность режима термообработки. Поэтому печи непрерывного действия обычно применяются в массовых и крупносерийных производствах.

*Электropечи сопротивления периодического действия.*

*Колпаковая печь* – печь периодического действия с открытым снизу подъемным нагревательным колпаком и неподвижным стендом (рис. 2.4, а). Нагреваемые детали (садка) 5 с помощью подъемно-транспортных устройств помещаются на стенд 1. Поверх них сначала устанавливается жаропрочный колпак-муфель 3, а затем основной колпак 2 камеры печи, выполненной из металлического каркаса с огнеупорной футеровкой. Нагревательные элементы 4 расположены по боковым стенкам колпака и в кладке стенда. Питание нагревательных элементов осуществляется с помощью гибких кабелей и штепсельных разъемов. По окончании нагрева электропитание колпака отключается, и он переносится на соседний стенд, где уже установлена очередная загрузка для нагрева. Остывание садки происходит на стенде под жароупорным муфелем, что обеспечивает необходимую скорость остывания.

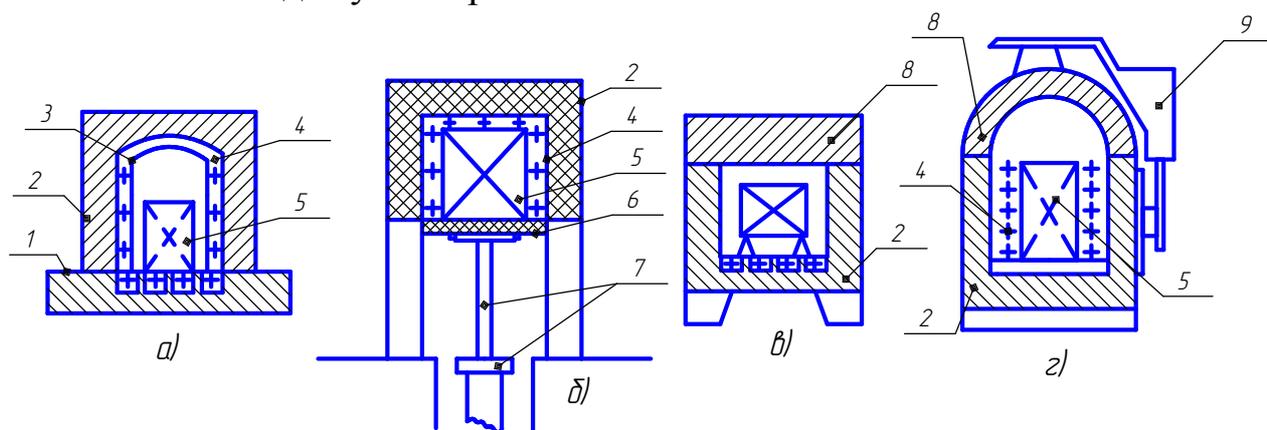


Рис. 2.4. Печи сопротивления периодического действия: а – колпаковая; б – элеваторная; в – камерная; г – шахтная; 1 – стенд; 2 – камера печи; 3 – жаропрочный муфель; 4 – нагревательные элементы; 5 – нагреваемое изделие (садка); 6 – опускающийся под; 7 – подъемное устройство; 8 – свод; 9 – механизм подъема свода

В колпаковых печах при каждом цикле теряется лишь теплота, запасенная в муфеле и кладке стенда, что составляет 10 – 15 % от теплоты, запасенной в кладке колпака.

Мощность колпаковых печей достигает нескольких сотен киловатт. Благодаря тому что колпак и муфель могут быть герметизированы, нагрев и остывание садки можно проводить в защитной атмосфере.

*Элеваторная ЭПС* – печь периодического действия с открытой снизу неподвижной камерой нагрева 2 и с опускающимся подом 6. Она представляет собой камеру, установленную на колоннах над уровнем пола цеха (рис. 2.4, б). Под печи поднимается и опускается подъемником, который установлен под камерой нагрева. Нагреваемые изделия – садку 5 нагружают на тележку, продвигают под печь и поднимают подъемником 7, вдвигая в камеру. По окончании технологического процесса под опускается, и изделие снимается.

Элеваторные печи служат для отжига, эмалирования, цементации, обжига керамических изделий, спекания и металлизации деталей и рассчитаны на емкости в десятки тонн, на мощности до 600 кВт и температуру до 1500 К.

*Камерная ЭПС* (рис. 2.4, в) – печь периодического действия с камерой нагрева, загрузка и разгрузка садки которой производятся в горизонтальном направлении. Она состоит из прямоугольной камеры 2 с огнеупорной футеровкой и теплоизоляцией, сводом 8 и помещенной в металлический кожух. Печь загружается и выгружается через отверстие в передней части. В поду камерной печи имеется жароупорная плита, на которой расположены нагреватели 4. В печах до 1000 К теплообмен обеспечивается за счет излучения или конвекции, обеспечиваемой замкнутой циркуляцией печной атмосферы. Печи с температурой до 1800 К работают как с воздушной, так и контролируемой атмосферой.

*Шахтную печь* (рис. 2.4, г) выполняют в виде круглой, квадратной или прямоугольной шахты, перекрываемой сверху крышкой. Нагревательные элементы в ней установлены по боковым стенкам.

*Электropечи сопротивления непрерывного действия* (методические печи). При установившемся технологическом процессе термообработки для увеличения производительности предпочтительно применять непрерывно действующие печи. В таких печах кроме нагрева изделий до заданных температур можно производить выдержку при этой температуре, а также их охлаждение. В таком случае печи выполняют состоящими из нескольких зон, протяженность которых зависит от конкретных условий проведения технологического процесса.

Часто печи непрерывного действия объединяют в один полностью механизированный и автоматизированный агрегат, состоящий из нескольких печей. В частности, такая линия может включать в себя закалочную и отпускную печи, закалочный бак, моечную машину и сушилку. Конструкции печей непрерывного действия различаются в основном механизмами перемещения нагреваемых изделий в рабочем пространстве печи.

Конвейерная печь – печь непрерывного действия с перемещением садки на горизонтальном конвейере (рис. 2.5).

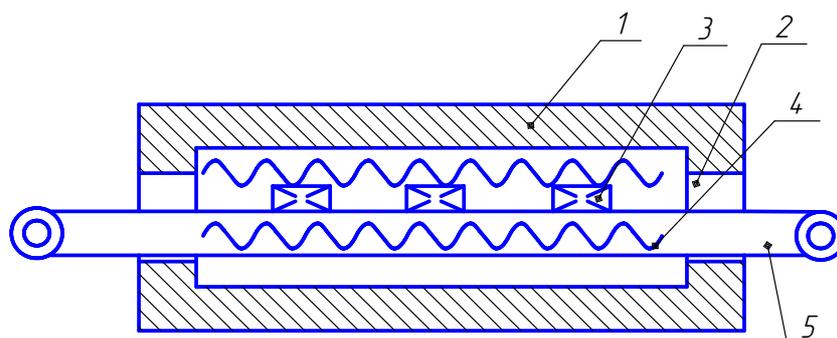


Рис. 2.5. Схема конвейерной электропечи: 1 – теплоизолированный корпус; 2 – загрузочное окно; 3 – нагреваемое изделие; 4 – нагревательные элементы; 5 – конвейер

Под печи представляет собой конвейер – полотно, натянутое между двумя валами, которые приводятся в движение специальными двигателями. Нагреваемые изделия укладываются на конвейер и передвигаются на нем через рабочее пространство печи. Конвейерная лента может быть выполнена плетеной из нихромовой сетки, штампованных пластин и соединяющих их прутков, а также для тяжелых нагреваемых изделий – из штампованных или литых цепных звеньев.

*Установки прямого (контактного) нагрева.* В таких установках преобразование электрической энергии в тепловую происходит в нагреваемом материале или изделии при непосредственном подключении их к источнику питания электроэнергией за счет прохождения через них электрического тока по закону Джоуля-Ленца.

Прямой нагрев эффективен для термообработки изделий, обладающих равномерным сечением по длине и большим сопротивлением. Прямой нагрев не имеет пределов по достижимым температурам, обладает высокой скоростью, пропорциональной вводимой мощности, и высоким КПД. Принципиальная схема показана на рис. 2.6.

Установки контактного нагрева предназначены для нагрева заготовок под ковку, отжига труб, проволоки, пружинной проволоки под навивку. Существуют печи прямого нагрева периодического действия для спекания прутков и штабиков из порошков редких и тугоплавких металлов при температуре до 3000 К в защитной атмосфере.

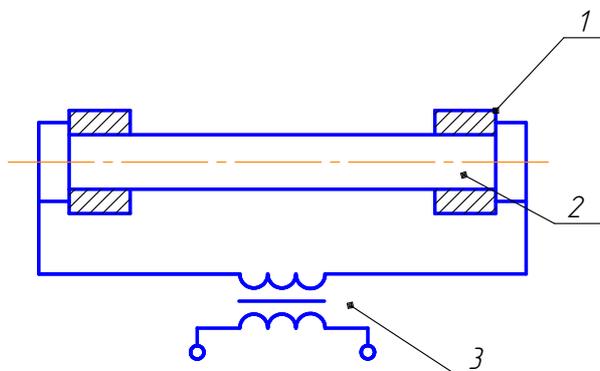


Рис. 2.6. Схема прямого нагрева: 1 – водохлаждаемые зажимы; 2 – нагреваемое изделие; 3 – печной трансформатор

## 2.5. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Применяемое в ЭПС электрическое оборудование подразделяется на силовое, аппаратуру управления, измерительную и пирометрическую.

К силовому оборудованию относятся трансформаторы, понижающие и регулировочные автотрансформаторы, блоки питания, приводящие в действие механизмы электроприводов, силовая коммутационная и защитная аппаратура, рубильники, контакторы, магнитные пускатели, автоматические выключатели и плавкие предохранители.

Большинство печей выполняют на напряжение питающей сети; они не нуждаются в трансформаторах и автотрансформаторах. Применение понижающих печных трансформаторов позволяет увеличить рабочие токи и применять для изготовления нагревателей проводники большего сечения, что повышает их прочность и надежность.

Регулировочные трансформаторы и автотрансформаторы целесообразно применять, когда печь оснащается нагревателями, меняющими свое сопротивление в зависимости от температуры (вольфрамовые, графито-

вые, молибденовые), а также для питания соляных ванн и установок прямого нагрева.

Все промышленные ЭПС работают в режиме автоматического регулирования температуры, что позволяет приводить в соответствие мощность печи с требуемым температурным режимом, а это, в свою очередь, ведет к снижению удельного расхода электроэнергии по сравнению с ручным регулированием.

Регулирование рабочей температуры в ЭПС производится изменением поступающей в печь мощности и может быть произведено следующими способами: периодическое подключение и отключение печи к питающей сети (двухпозиционное регулирование); переключение нагревателей печи со звезды на треугольник, либо с последовательного соединения на параллельное (трехпозиционное регулирование).

При двухпозиционном регулировании температура в рабочем пространстве ЭПС контролируется термодатчиками. Функциональная схема печи и график изменения температуры и мощности при таком способе регулирования показаны на рис. 2.7.

Включение печи производится регулятором температуры (РТ) посредством подачи команды на катушку выключателя КВ. Температура в печи растет до значения  $t_{зд} + \Delta t$ , в этот момент терморегулятор отключает печь. За счет поглощения теплоты нагреваемым телом и потерь в окружающее пространство температура снижается до  $t_{зд} - \Delta t$ , после чего РТ вновь дает команду на подключение печи к сети. Глубина пульсаций температуры зависит от чувствительности регулятора температуры, инерционности печи и чувствительности датчика температуры.

Рис. 2.7. Функциональная схема включения печи, изменение температуры и мощности при двухпозиционном регулировании

При трехпозиционном регулировании подводимая к печи мощность изменяется при переключении нагревателей со звезды на треугольник. Регулирование температуры этим методом позволяет снизить мощность, потребляемую из сети. С энергетической точки зрения такой метод регулирования достаточно эффективен, поскольку при нем не оказывается вредного влияния на питающую сеть.

Регулирование мощности печи изменением подводимого напряжения может быть осуществлено несколькими способами:

- применение регулировочных трансформаторов и автотрансформаторов с плавным бесконтактным регулированием под нагрузкой;
- включение в цепь нагревателей дополнительных сопротивлений в виде дросселей и реостатов;
- импульсное регулирование с использованием тиристорных регуляторов.

Наиболее эффективным является последний способ. Можно выделить три основных способа импульсного регулирования мощности, потребляемой от сети переменного тока (рис. 2.8).

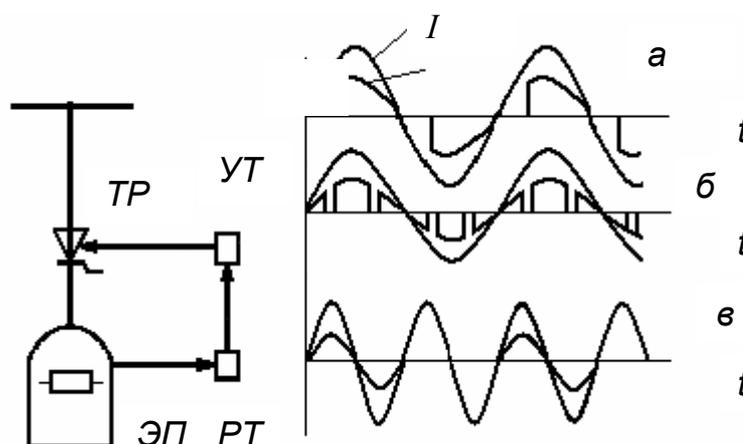


Рис. 2.8. Схема импульсного регулирования мощности печи:  
 ЭП – электропечь; РТ – теплорегулятор; УТ – блок управления тиристорным регулятором; ТР – тиристорный регулятор

1. Импульсное регулирование при частоте коммутации  $f_k = 2f_c$  ( $f_c$  – частота тока питающей сети) с изменением момента отпирания тиристора называется фазоимпульсным или фазовым (кривые а) на рис. 2.8).
2. Импульсное регулирование с повышенной частотой коммутации (кривые б) на рис. 2.8).
3. Импульсное регулирование с пониженной частотой коммутации  $f_k < f_c$  (кривые в) на рис. 2.8).

Путем импульсного регулирования можно получить плавное регулирование мощности в широких пределах почти без дополнительных потерь, обеспечивая соответствие мощности, потребляемой печью, и мощности, подводимой из сети.

## 2.6. НАГРЕВ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ЖИДКИХ СРЕД

*Электрические котлы.* Они применяются в различных отраслях народного хозяйства для подогрева воды (электроводонагреватели) и получения насыщенного технологического пара низкого давления (электропарогенераторы).

Жидкость – это вода, расплавы солей, щелочей, оксидов, которые могут быть нагреты прямым пропусканием тока через их объем. Установки такого типа служат для кипячения воды, варки стекла, термообработки металлов.

Электроводонагреватель прямого действия представляет собой цилиндрический стальной сосуд, на верхней крышке которого расположены стержневые электроды и охватывающие их трубчатые антиэлектроды. Между ними находятся стеклотекстолитовые цилиндры. Мощность, развиваемую котлом, регулируют, изменяя положение изоляционных цилиндров относительно системы электродов и антиэлектродов.

Температура выходящей воды автоматически поддерживается в нужных пределах датчиком регулирующего термометра. Электродные котлы могут иметь трехфазную и однофазную системы электродов, работающие на низком и высоком напряжении. Котлы низкого напряжения (30 В) мощностью 25 – 400 кВт с КПД 95 – 98 % имеют малые габаритные размеры, низкую тепловую инерционность.

*Высоковольтные котлы,* рассчитанные на напряжение 3 – 35 кВ, применяют в бытовых и производственных целях для систем централизованного отопления и горячего водоснабжения.

*Стекловаренные печи.* Их выполняют в виде ванны, выложенной изнутри огнеупорным материалом. В стекломассе находятся электроды из стали, молибдена, графита, обеспечивающие протекание тока через стекломассу и нагрев ее по закону Джоуля-Ленца.

*Жидкостные ЭПС для нагрева металла.* Для быстрого и равномерного нагрева металлических изделий и заготовок применяются электродные ванны, представляющие собой металлический или керамический ти-

гель, наполненный солью или стекломассой, в который опущены металлические или металлокерамические электроды. В холодном состоянии соль почти не электропроводна, но если ее нагреть и расплавить, то между электродами начинает протекать электрический ток и в расплаве, как в активном сопротивлении, выделяется тепловая энергия.

ЭПС с жидким нагревателем применяют для нагрева до 1100 – 1600 К изделий из легированных сталей перед закалкой, ковкой или штамповкой, а также для отжига деталей из стали и чугуна. Электродные ванны подключаются к сети переменного тока через понижающие трансформаторы с вторичным напряжением на электродах 10 – 35 В.

## 2.7. ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЕ УСТАНОВКИ

Использование явления разогрева расплава соединений шлака до 2000 – 2300 К проходящим по нему током легло в основу высокоэффективных технологических процессов электрошлакового переплава (ЭШП) и электрошлаковой сварки (ЭШС).

Сущность ЭШП состоит в следующем (рис. 2.9): расходуемый электрод из переплавляемого металла 1 погружается в слой электропроводного шлака 2, находящегося в водоохлаждаемом кристаллизаторе 3, закрытом водоохлаждаемым поддоном 4. Ток протекает между электродом и поддоном через шлак, который имеет высокое электрическое сопротивление и интенсивно разогревается по закону Джоуля-Ленца. Находящийся в расплаве шлака торец электрода расплавляется, и капли металла, стекающие с электрода, проходят через шлак, где дополнительно разогреваются, очищаются от нежелательных примесей и собираются на дне кристаллизатора в виде слитка 5. По мере оплавления электрод 1 подается вниз. Между стенкой кристаллизатора и слитком образуется слой гарнисажа 7.

Существующие ЭШП имеют две модификации. По одной из них переплав осуществляется в неподвижном глухом кристаллизаторе. По другой схеме кристаллизатор перемещается в процессе переплава относительно переплавляемого слитка или слиток перемещается относительно неподвижного кристаллизатора (вытягивается).

Электрошлаковая сварка ЭШС широко используется в промышленности для соединения металлов большой толщины: стали, чугуна, меди, алюминия, титана и их сплавов. В качестве тепловыделяющего элемента здесь используются расплавленные шлаки, нагревающиеся до заданной

температуры при протекании по ним переменного тока. Принципиальная схема ЭШС показана на рис. 2.10.

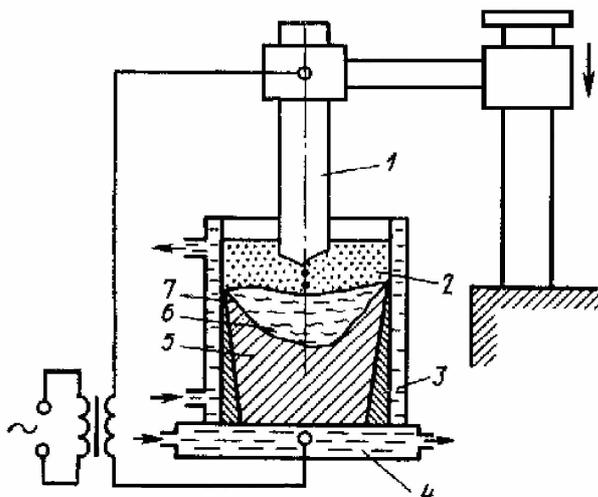


Рис. 2.9 Схема установки электрошлакового переплава

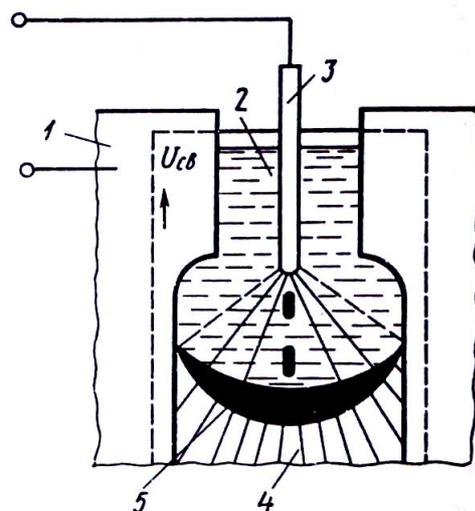


Рис. 2.10.Схема электрошлаковой сварки

Электрод 3 и части свариваемого металла 1 включаются в электрическую цепь через шлак 2, нагреваемый проходящим током выше температуры плавления свариваемого и электродного металла. В результате электродный и свариваемый металлы расплавляются и стекают на дно сварочной ванны 5, заполняя шов 4. Боковые стороны шва закрываются охлаждаемыми ползунами.

ЭШС осуществляется автоматами и полуавтоматами, подающими электродную проволоку, дозирующими флюс. У источников питания ЭШС бывают разные внешние характеристики от крутопадающей до жесткой, мощность их 60 – 550 кВА, вторичное напряжение 8 – 63 В.

## ГЛАВА 3. УСТАНОВКИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

### 3.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Электрическая контактная сварка представляет собой процесс образования неразъемного соединения в результате нагрева металлических деталей протекающим по ним электрическим током, расплавления и сдавли-

вания деталей с последующим охлаждением зоны сварки за счет теплопроводности в тело свариваемых деталей.

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.

По способу получения соединений различают стыковую, точечную и шовную контактную сварки (рис. 3.1). 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 джоулевой теплоты с последующим сжатием.

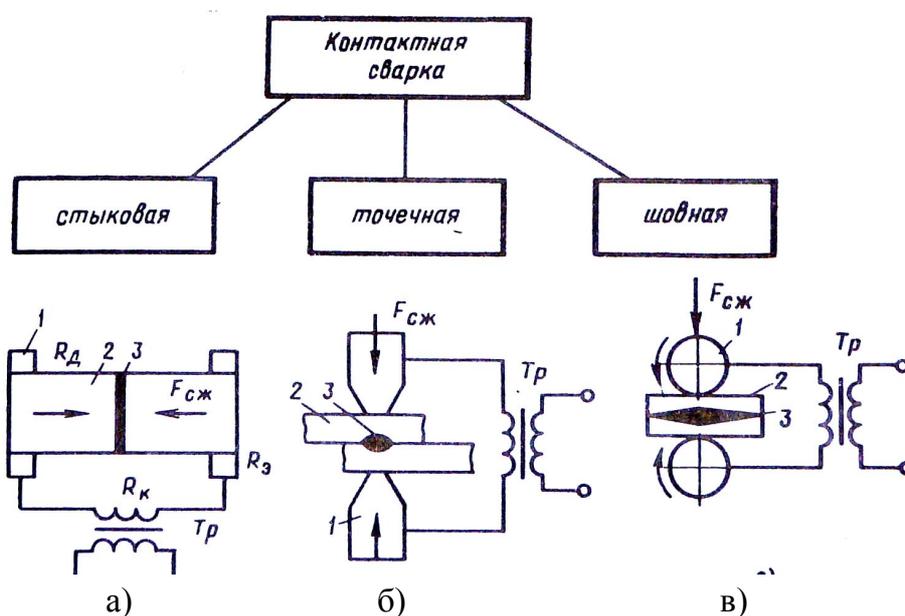


Рис. 3.1. Виды контактной сварки: а – стыковая; б – точечная; в – шовная

Общее количество энергии  $Q$  (Дж), выделяющейся между электродами:

$$Q = \int_0^{\tau} [R_K(\tau) + R_d(\tau)] I^2(\tau) d\tau, \quad (3.1)$$

где  $R_K$  – контактное сопротивление между деталями, Ом;  $R_d$  – сопротивление детали от электрода до места сварки, Ом;  $I$  – сварочный ток, А;  $\tau$  – время прохождения тока, с.

Из формулы следует, что необходимая для сварки энергия при весьма малых значениях сопротивления в точке контакта свариваемых деталей и во избежание потерь теплоты на ненужный нагрев всей массы деталей может быть получена только при больших значениях токов (сотни и тыся-

чи ампер), протекающих через сопротивление контакта  $R_K$  в течение короткого промежутка времени (единицы секунд). Для повышения КПД контактной сварки необходимо, чтобы сопротивление цепей сварочного тока и электродов  $R_d$  было как можно меньше. Поэтому при компоновке сварочных установок источники питания максимально приближают к месту сварки и выполняют с использованием материалов, дающих минимальные потери энергии. Напряжение на электродах сварочных машин составляет 1 – 16 В.

Нагревание металла происходит в месте контакта свариваемых деталей по плоскости их соприкосновения. Это объясняется тем, что в данном месте сопротивление  $R_K$  будет наибольшим. Так как поверхность металла не является идеально гладкой, то свариваемые детали при их сжатии соприкасаются лишь в отдельных точках, через которые проходит электрический ток. Так как площадь точек очень мала, то в них возникает большое сопротивление прохождению тока, что вызывает сильный локальный нагрев металла. С повышением температуры в месте сварки его сопротивление возрастает, что ускоряет выделение теплоты и нагрев металла до температуры сваривания. Когда металл нагреется до пластического или оплавленного состояния, при сжатии деталей произойдет их сваривание. Застывание металла в точке сварки после отключения тока происходит за счет теплопроводности свариваемых деталей.

Как следует из формулы (3.1), при контактной сварке нагрев зависит от времени прохождения тока. Можно нагревать детали очень быстро, применяя токи большой силы, или нагревать детали медленно и постепенно, используя меньшие токи. Режимы сварки с применением токов большой силы 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  $j = 160 \dots 400 \text{ А/мм}^2$ ;  $p = 0,4 \dots 1,12 \text{ ГПа}$ ;  $t_{CB} = 0,1 \dots 1,0 \text{ с}$ .

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

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.

### 3.2. СТЫКОВАЯ СВАРКА

Стыковая сварка – это способ контактной сварки, при котором детали соединяются по всей площади их касания. Различают два способа стыковой сварки – сопротивлением и оплавлением.

При сварке сопротивлением (рис. 3.1, а) свариваемые детали 2 укрепляют в токоподводах 1 и сжимают с усилием  $F_{СЖ}$ . При пропускании по ним тока происходит нагрев деталей в стыке 3 до температуры, близкой к температуре плавления металла ( $0,8 - 0,9 T_{пл}$ ). Затем резко увеличивают усилие сжатия (осадка деталей), в результате чего в твердой фазе образуется сварное соединение.

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

При сварке непрерывным оплавлением детали сближаются при включенном сварочном трансформаторе, и путем сжатия осуществляется их контакт. При этом стык разогревается за счет протекания тока. Затем силу сжатия уменьшают, вследствие чего увеличивается контактное сопротивление и снижается сварочный ток. При снижении давления соприкосновение деталей по плоскости заменяется соприкосновением в отдельных точках. В этих точках эффективность нагрева повышается, и отдельные выступающие участки оплавляются. После разрушения одних выступов металла начинается соприкосновение очередных выступающих участков, что создает новые пути прохождения сварочного тока. Оплавление концов свариваемых деталей продолжается до тех пор, пока между их торцами не образуется прослойка жидкого металла. После этого создается сплошное металлическое соединение свариваемого стыка за счет приложения небольшого усилия осадки.

При сварке оплавлением с подогревом детали предварительно подогревают методом кратковременных замыканий их торцов, а затем оплавляются.

### 3.3. ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА

При осуществлении точечной сварки свариваемые детали помещают между двумя электродами, закрепленными в электрододержателях (рис. 3.1, б). Посредством нажимного механизма электроды плотно сжимают свариваемые детали. После сжатия на электроды подается напряжение и проходящий через детали ток нагревает место сварки до необходимой температуры, при достаточном сжатии в этом месте образуется неразъемное сварное соединение. В центре сварочной точки температура несколько выше температуры плавления свариваемого металла, ее диаметр близок к диаметру электродов.

Необходимое для сварки одной точки время определяется толщиной свариваемых деталей, физическими свойствами свариваемого материала, мощностью сварочного устройства, степенью сжатия деталей и колеблется в пределах от тысячных долей секунды (при сварке тонких листов цветных металлов) до нескольких секунд (толстые стальные детали). Цикл точечной сварки показан на рис. 3.2.

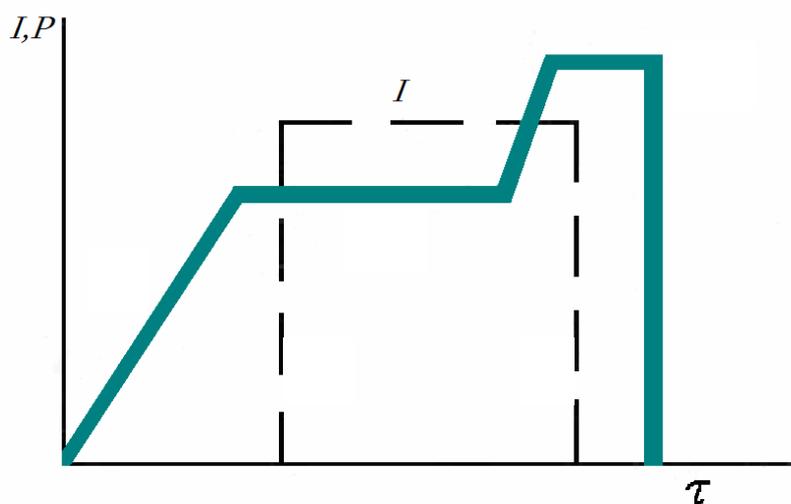


Рис. 3.2. Цикл точечной сварки: 1 – сжатие деталей электродами ( $P$ ); 2 – удержание электродов в сжатом состоянии и повышение давления в конце импульсного тока; 3 – снятие давления; 4 – включение тока; 5 – выключение тока

Машины точечной сварки различаются по способу *подвода* тока. Наиболее широко распространена односторонняя двусторонняя (нормальная) сварка (рис. 3.1, б). Верхний и нижний электроды имеют рабочую поверхность, обеспечивающую необходимую плотность тока для концентрированного разогрева места сварки. При необходимости уменьшить вмятины от электродов с одной стороны свариваемого изделия применяют один из способов «бесследной» сварки (рис. 3.3, а – в). Это достигается

увеличением рабочей поверхности одного из электродов (рис. 3.4, а), сваркой на плоском электроде (рис. 3.3, б) либо введением промежуточной плоской пластины между одним из электродов и деталью (рис. 3.3, в). Необходимая плотность тока для обеспечения концентрированного нагрева создается вторым электродом с нормальной рабочей поверхностью.

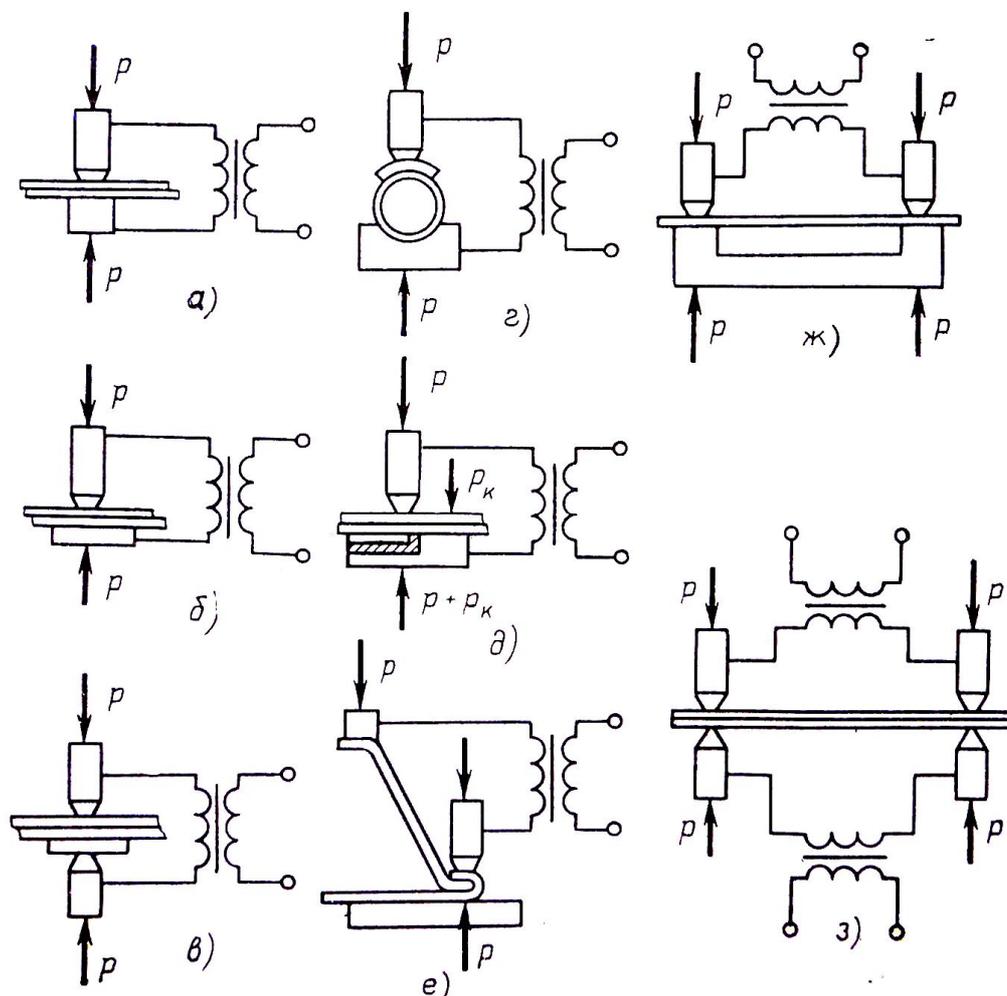


Рис. 3.3. Принципиальные схемы основных способов точечной сварки

В случае невозможности осуществления нормальной одноточечной сварки применяется точечная сварка с косвенным токоподводом. При этом, с одной стороны, ток подводится электродом с нормальной контактной поверхностью, а с другой – электродом с большей контактной поверхностью (рис. 3.3, г). Для уменьшения местных остаточных деформаций от сварки применяются способы, показанные на рис. 3.3, д, е.

При сварке тонколистовых изделий применяется односторонняя многоточечная сварка (рис. 3.3, ж). Одновременная сварка двух точек при двустороннем токопроводе от спаренного трансформатора (рис. 3.3, з) позволяет сваривать металлические изделия большой толщины.

Регулирование силы сварочного тока и напряжения во вторичной цепи осуществляется переключением витков первичной обмотки с помощью переключателя. Время прохождения тока регулируется и выдерживается также автоматически, для чего машина снабжена регулятором времени сварки.

### 3.4. ШОВНАЯ СВАРКА

В процессе шовной сварки соединение двух свариваемых деталей (обычно двух листов) осуществляется с помощью вращающихся роликов за счет пропускания через место сварки электрического тока, как показано на рис. 3.4. Машины для шовной сварки имеют два токопроводящих ролика, из которых один приводной, а другой вращается за счет силы трения при передвижении свариваемых листов. По своему принципу шовная сварка аналогична точечной сварке.

При осуществлении процесса шовной сварки могут иметь место следующие режимы: непрерывное движение роликов с непрерывной подачей тока; непрерывное движение роликов при прерывистой подаче тока; прерывистое движение роликов с прерывистой подачей тока (шаговая сварка).

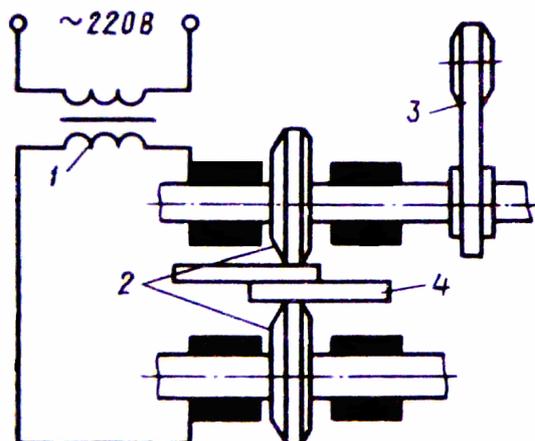


Рис. 3.4. Схема шовной сварки: 1 – сварочный трансформатор;  
2 – контактные ролики; 3 – прижимное устройство;  
4 – свариваемые детали

Первый из указанных режимов применяется при сварке листов суммарной толщиной до 1,5 мм, так как при большей толщине сваренные

листы могут расслоиться вследствие медленного остывания нагретого стыка и произойти значительное коробление свариваемых листов.

Наиболее распространен второй из указанных режимов. При сварке этим способом швы получаются с незначительным короблением листов, а расход электроэнергии – наименьшим.

### 3.5. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ УСТАНОВОК КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Контактная сварка обладает высокой производительностью, а во многих случаях является единственно возможным и экономически целесообразным способом соединения.

Выпускаемые машины контактной сварки подразделяют на машины общего назначения и высокопроизводительные специализированные машины, предназначенные для сварки конкретных изделий.

В машинах контактной сварки общего назначения применяются сварочные трансформаторы, аппаратура управления на интегральных схемах, прерыватели тока с применением тиристоров, пневматическая и гидравлическая аппаратура.

По роду питания, преобразования или накопления энергии различаются следующие машины контактной сварки: а) однофазного переменного тока промышленной или пониженной частоты; б) постоянного тока; в) с выпрямлением тока во вторичном контуре; г) трехфазного тока, низкочастотные с тиристорным преобразователем; д) с накоплением энергии (в конденсаторах, электромагнитных системах, вращающихся массах).

Машины контактной сварки с выпрямлением тока на стороне низкого напряжения сварочного трансформатора обладают рядом технологических и энергетических преимуществ, применительно к сварке крупногабаритных листовых конструкций из алюминиевых сплавов, титана, жаропрочных и нержавеющей сталей. Применение постоянного тока в шовных машинах позволяет повысить скорость сварки, а в многоэлектродных машинах поочередное или групповое питание электродов можно осуществлять от одного источника тока.

К преимуществам конденсаторных машин, применяемых для точечной сварки изделий из легких сплавов малой толщины, относится повышенная стабильность сварочного тока при практически любых колебаниях напряжения сети, а также низкое по сравнению с другими машинами контактной сварки потребление мощности из сети.

Электрическая силовая часть машин контактной сварки обеспечивает получение необходимого сварочного тока (2 – 10 кА) от питающей сети 380 или 220 В при мощности источников питания 75 – 750 кВА. Схема электрической части машин контактной сварки показана на рис. 3.5. Для подвода сварочного тока к детали 1 служит состоящий из различных элементов токопровода вторичный контур 2.

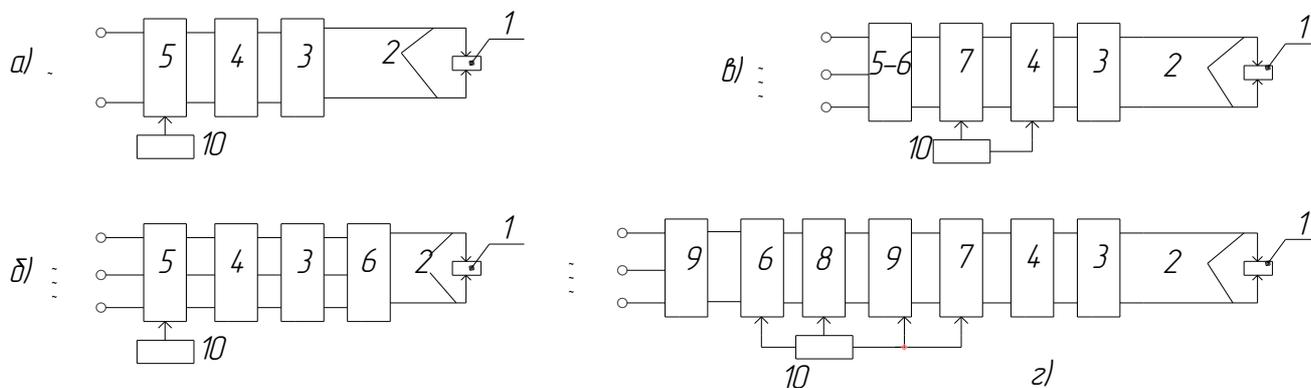


Рис. 3.5. Структурная схема электрической части основных типов машин контактной сварки

Форма кривой и значение силы сварочного тока получаются путем преобразования или накопления электрической энергии сети промышленной частоты с помощью трансформаторов 3, 9, выпрямителей 6 или накопителей энергии 8 (например, батареи конденсаторов).

Преобразователи (трансформаторы, выпрямители) включают в сеть или подсоединяют к накопителю энергии 8 с помощью контакта 5, а необходимое чередование полярности тока в сварочном трансформаторе обеспечивается коммутатором 7. Сварочный трансформатор 3 обеспечивает получение больших значений тока при пониженном напряжении. Регулировка сварочного тока осуществляется ступенчатым изменением вторичного напряжения трансформатора 3 путем переключения числа ступеней его первичной обмотки переключателем 4. Регулирование сварочного тока осуществляется аппаратурой управления 10 путем изменения момента включения вентилях контактора 5 (выпрямители 6) относительно фазы напряжения сети в каждой полуволне. Аппаратура управления обеспечивает заданную последовательность и продолжительность всех или части операций сварочного цикла.

В однофазных машинах переменного тока (рис. 3.6) сварочный трансформатор ТС включается в электрическую сеть рубильником 1 через предохранители 2 и переключателем ступеней ПС посредством контакто-

ра-прерывателя Пр. Момент включения переключателя – прерывателя определяется аппаратурой управления АУ, причем ток во вторичной обмотке сварочного трансформатора имеет синусоидальную или близкую к ней форму (рис. 3.6, б, в). При наличии специальных модуляторов тока можно получить импульс тока с плавным изменением амплитуды (рис. 3.6, г).

Рис. 3.6. Электрическая схема силовой части машины переменного тока (а) и форма импульсов сварочного тока (б – г)

Рис. 3.7. Схемы выпрямителей сварочных машин постоянного тока

Применение однофазных машин контактной сварки ограничивается возможностями включения в заводские трехфазные сети однофазных нагрузок большой мощности вследствие возможного перекоса фаз. Коэффи-

циент мощности машин контактной сварки составляет 0,5 – 0,6. Повышение энергетических показателей однофазных машин (снижение потребляемой из сети мощности, повышение коэффициента мощности) при тех же значениях тока и размерах сварочного контура возможно за счет понижений частоты вторичного напряжения сварочного трансформатора.

В сварочных машинах постоянного тока (рис. 3.7) первичную обмотку включают по схеме «треугольник», а к соединенной по схеме «звезда» вторичной обмотке через вентили 1 – 3 (рис. 3.7, а) подключают вторичный контур. Общая электрическая схема сварочной машины представляет собой трехфазный выпрямитель. В таких машинах проблемой является выпрямление очень больших сварочных токов.

Управление машиной – включение и отключение трехфазного понижающего трансформатора  $T_r$  и регулирование тока – осуществляется тиристорами, включенными последовательно с первичными обмотками. При мгновенной коммутации ток через тиристор  $VT_1$  и связанную с ним первичную обмотку трансформатора проходит в течение одной трети периода ( $2\pi/3$ ), когда напряжение в данной фазе больше, чем в двух других (в точке  $p$ , рис. 3.7, б). В эту треть периода ток через два других тиристора проходить не может, поскольку потенциал их анодов ниже общего потенциала катода. В следующую треть периода ток будет пропускать второй вентиль  $I_2$  и т. д. Переход тока от одного вентиля к другому (рис. 3.7, в) происходит в момент пересечения положительных полусинусоид напряжения (точки  $p, q, r$  на диаграмме рис. 3.6, б). Аналогично, коммутация тока проходит и в сварочной цепи (рис. 3.7, г, д). Несмотря на униполярное протекание тока в первичной обмотке (рис. 3.7, в), магнитные потоки в стержнях трехфазной магнитной системы (рис. 3.7, е) не имеют постоянной составляющей (потока вынужденного намагничивания, который возникает при отсутствии вентиля в первичной обмотке), поскольку алгебраическая сумма магнитных потоков в трехстержневой магнитной системе равна нулю. Размагничивание того или иного стержня происходит намагничивающими силами обмоток, расположенных на двух других стержнях. Вследствие соединения первичных обмоток по схеме «треугольник» и наличия вентиля не только в первичной, но и во вторичной цепи сумма ампер-витков, расположенных на одном стержне обмоток, в любой момент времени практически равна нулю.

Значение возникающего при включении выпрямителя мгновенного сварочного тока в переходном процессе определяем по формуле

$$i_2 = (U_2 / R_2)(1 - e^{-\tau/T}), \quad (3.2)$$

где  $U_2$  – выпрямленное вторичное напряжение, В,  $R_2$  – активное сопротивление вторичного контура машины, Ом,  $\tau = \frac{L_2}{R_2}$  – эквивалентная постоянная времени;  $L_2$  – индуктивность, Гн.

При включении выпрямителя происходит спад тока до нуля по экспоненте, крутизна которой определяется значением  $\tau$  (рис. 3.7, ж). После выключения выпрямителя через некоторую паузу возможно его повторное включение. В зависимости от длительности паузы и угла поджигания тиристоров  $\alpha$  импульс тока имеет различную форму (рис. 3.7, з).

## ГЛАВА 4. УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

### 4.1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Индукционный нагрев проводящих тел – проводников первого и второго рода основан на поглощении ими электромагнитной энергии, возникновении наведенных вихревых токов, нагревающих тело по закону Джоуля-Ленца. Переменное магнитное поле создается индуктором, который по отношению к нагреваемому телу является первичной обмоткой трансформатора. Нагреваемое тело выполняет роль вторичной обмотки трансформатора, содержащей один короткозамкнутый виток (рис. 4.1).

Переменный магнитный поток  $\Phi$  (2), создаваемый первичной обмоткой – индуктором 1, пропорционален его МДС и обратно пропорционален сопротивлению магнитной цепи. Возникающая в нагреваемом теле ЭДС  $E = 4,44\Phi\omega f \cdot 10^{-8}$  (В) при известном значении сопротивления нагреваемого тела обеспечивает возникновение в нем вихревого тока  $I$  (4) и выделение соответствующей мощности:  $P = I^2 r = E^2 r / z^2$

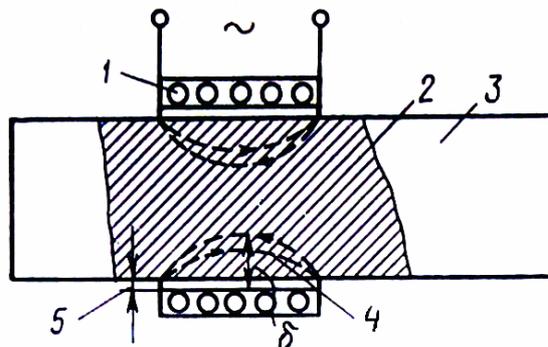


Рис. 4.1. Принципиальная схема индукционного нагрева:  
 1 – индуктор, 2 – магнитный поток в нагреваемом теле,  
 3 – нагреваемое тело, 4 – наведённый ток, 5 – воздушный зазор

Таким образом, индукционный нагрев является прямым нагревом сопротивлением, а включение нагреваемого тела в цепь тока производится за счет магнитной связи. Индукционный нагрев обладает достоинствами прямого нагрева сопротивлением – высокая скорость нагрева, пропорциональная вводимой мощности, неограниченный уровень достигаемых температур, достаточных для нагрева металлов, плавления металлов и неметаллов, перегрева расплава, испарения материалов и получения плазмы.

Принципиальная схема индукционного нагрева включает в себя индуктор, зазор и нагреваемое тело. Эти элементы определяют эффективность преобразования электрической энергии, получаемой от источника питания, в тепловую. *Индуктор* создает переменный во времени магнитный поток, т. е. электромагнитную волну, падающую на нагреваемое тело. Сам индуктор, находящийся в созданном им электромагнитном поле, тоже поглощает энергию, которая выделяется в нем в виде потерь.

Формы индукторов весьма разнообразны – цилиндрическая, плоская, фасонная. Как правило, индукторы изготавливают из меди – немагнитного металла и охлаждаются водой.

При выполнении нагревательных операций индуктор может находиться снаружи нагреваемого тела, либо внутри его. В последнем случае внутри индуктора помещают сердечник из листовой трансформаторной стали. Наиболее распространённым является внешнее расположение индуктора на цилиндрическом нагреваемом теле.

При нахождении индуктора в полости нагреваемого цилиндра потери энергии в зазоре равны:

$$P_{3q1,0} = 6,2 \cdot 10^{-9} (I\omega_{1,0})^2 f d^2 B \left[ 1 - \left( \frac{D_H}{d_B} \right)^2 \right], \quad (4.1)$$

где  $d_0, d_B, D_B, D_H$  – характерные размеры нагреваемого тела и индуктора.

Энергия, вводимая в нагреваемое тело, определяется в инженерных расчетах через значение мощности, выделяющейся в металлическом цилиндре на 1 м его длины. Для активной мощности:

$$P_{1,0} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega_{1,0})^2 d_0 \sqrt{\rho \mu f} F_{0Ц}, \quad (4.2)$$

и реактивной мощности:

$$P_{1,0} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega_{1,0})^2 d_0 \sqrt{\rho \mu f} G_{0Ц}, \quad (4.3)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление нагреваемого материала;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $f$  – частота поля;  $(I\omega_{0,1})$  – ампер-витки индуктора;  $F_{0Ц}, G_{0Ц}$  – сложные комплексы, образованные из функции Бесселя, определяются по таблицам и графикам.

При нагреве металлической плиты активная и реактивная составляющие мощности соответственно равны:

$$P_{01,0} = 2 \cdot 10^{-6} (I\omega_{1,0})^2 \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f} F_{0пл}, \quad (4.4)$$

$$P_{0q1,0} = 2 \cdot 10^{-6} (I\omega_{1,0})^2 \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f} G_{0пл}. \quad (4.5)$$

Эти зависимости показывают, что регулирование мощности при индукционном нагреве может осуществляться за счет изменения числа витков индуктора тока намагничивания и его частоты. При прочих равных условиях выделяющаяся мощность больше для тел, имеющих высокие удельное сопротивление и магнитную проницаемость. При нагреве до высоких температур, когда заметным становится изменение удельного сопротивления  $\rho$ , необходимо регулирование напряженности магнитного поля или частоты.

Электрический КПД системы индуктор – металлический цилиндр определяется из соотношения полезной активной мощности  $P_{01,0}$ , выделяющейся в металле, и активных потерь в индукторе  $P_{И1,0}$ :

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{1}{1 + \frac{P_{И1,0}}{P_{1,0}}}, \quad (4.6)$$

Максимальное значение КПД составляет 0,70 – 0,881.

При определении коэффициента мощности системы необходимо учитывать активные и реактивные мощности, выделяющиеся не только в нагреваемом теле, но и в индукторе и особенно в зазоре:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(P_{q1,0} + P_{зq1,0} + P_{Иq1,0})^2}{P_{1,0} + P_{И1,0}}}}, \quad (4.7)$$

Чем больше зазор между индуктором и нагреваемым цилиндром, тем больше реактивная мощность  $P_{зq1,0}$ , и тем ниже  $\cos \varphi$ . Магнитное поле, выходя из индуктора, встречает поверхность нагреваемого тела, в которой сразу начинается выделение тепловой энергии. По мере продвижения в глубину тела в механизм проведения тока включаются более глубокие слои, а ток проводимости в это же время создает встречное магнитное поле, препятствующее продвижению внешнего поля. Поэтому индукционный нагрев по своей природе является поверхностным и поток энергии на глубине  $\Delta_{\text{Э}}$  меньше потока на поверхности в  $e^2$  раз и составляет  $0,136P_0$ , где  $P_0$  – поток энергии на поверхности.

В слое металла толщиной  $\Delta_{\text{Э}}$  поглощается 86,4 % энергии, прошедшей через поверхность тела.

Глубина проникновения определяется:

$$\Delta_{\text{Э}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}. \quad (4.8)$$

Отсюда следует, что глубина нагрева тела увеличивается с ростом его удельного сопротивления и понижается с ростом частоты тока. Формула (4.8) позволяет определить необходимую частоту тока для нагрева тела на заданную глубину. Для ферромагнитных материалов, когда с ростом температуры увеличивается  $\rho$ , а при достижении точки Кюри значение  $\mu$  падает от 50 – 100 до 1, глубина проникновения тока резко увеличивается, однако поглощаемая мощность при этом уменьшается.

Индуктор с точки зрения электротехники представляет собой в большинстве случаев соленоид, имеющий один или несколько добавочных отводов от внутренних витков. Витковое напряжение (напряжение между смежными витками) изменяется в широких пределах от 20 – 175 В до 400 – 600 и даже 1000 В. Ток индукторов составляет от сотен до нескольких тысяч ампер при средней плотности тока порядка 20 А/мм<sup>2</sup>. Поте-

ри энергии в индукторах могут достигать 20 – 30 % полезной мощности установки.

Индукционный способ нагрева применяется при следующих технологических процессах: плавка металлов и неметаллов; поверхностная закалка; нагрев заготовок под пластическую деформацию или термохимическую обработку; сварка и пайка; зонная очистка металлов и полупроводников, плавка во взвешенном состоянии; получение монокристаллов из тугоплавких оксидов; получение плазмы.

## 4.2. ИНДУКЦИОННЫЕ ПЛАВИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

По конструктивным особенностям индукционные плавильные печи подразделяют на *канальные* и *тигельные*.

*Индукционные канальные печи (ИКП)*. В этих печах канал с расплавленным металлом является короткозамкнутым витком вторичной обмотки трансформатора, в нем поглощается 90 – 95 % подведенной к печи электрической энергии. По электротехническим характеристикам канальные печи подобны силовым трансформаторам с распределенной по длине вторичной обмотки нагрузкой. Принципиальная схема ИКП приведена на рис. 4.2.

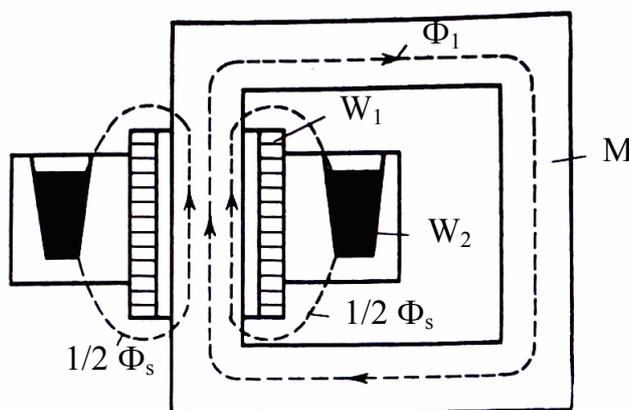


Рис. 4.2. Схема индукционной канальной печи

С целью уменьшения потока рассеяния  $\Phi_s$  первичную  $\omega_1$  и вторичную  $\omega_2$  обмотки располагают на одном стержне магнитопровода  $M$ , по которому протекает основной магнитный поток  $\Phi_1$ . Магнитный поток первичной обмотки  $\Phi_1$ , пересекая канал с металлом, наводит в нём электродвижущую силу  $E_2$ , ток  $I_2$ , проходя по металлу, выделяет теплоту согласно закону Джоуля-Ленца. Поток рассеяния  $\Phi_s$  составляет приблизи-

тельно 25 – 30 % от основного потока  $\Phi_1$ , поэтому  $E_2 < E_1 k_{TP}$  ( $k_{TP}$  – коэффициент трансформации:  $k_{TP} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ ; для канальных печей  $k_{TP} = \omega_1$ ).

В соответствии с векторной диаграммой

$$E_2 = \sqrt{(I_2 R'_2)^2 + (I_2 x'_2)^2} = I_2 z_2, \quad (4.9)$$

где  $E_2$  – ЭДС вторичной обмотки, В;  $I_2$  – ток в канале печи, А;  $R'_2, x'_2$  – приведенные активное и реактивное сопротивления канала соответственно, Ом;  $z_2$  – полное сопротивление, Ом.

При условии синусоидального напряжения коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = R'_2 / z'_2 = R'_2 / \sqrt{R'_2{}^2 + x'_2{}^2}, \quad (4.10)$$

Как видно,  $\cos \varphi$  уменьшается с увеличением потока рассеяния и уменьшением активного сопротивления металла, естественный  $\cos \varphi = 0,3 \dots 0,7$ . Меньшие значения коэффициента мощности соответствуют канальным печам для плавки металлов с низким удельным электрическим сопротивлением (медь, алюминий), а большие значения – с высоким (сталь, чугун).

Однородный химический состав и одинаковая температура жидкого металла обеспечиваются интенсивным перемешиванием металла, вызываемым взаимодействием магнитного поля индуктора с током в канале.

*Индукционные тигельные печи (ИТП).* Характерным электротехническим признаком ИТП является то, что нагреваемые в них электропроводящие тела образуют с индуктором, создающим переменное электромагнитное поле, систему двух индуктивно связанных контуров с током.

Индукционная тигельная печь (рис. 4.3) состоит из следующих основных частей: индуктора 1, подключаемого к источнику переменного тока, расплавляемого металла 2, огнеупорного тигля 3, и внешнего магнитопровода 4.

Для обеспечения достаточно высокого КПД нагрева частоту питающего тока определяем по формуле:

$$f \approx 25 \cdot 10^6 \frac{P_{ГОР}}{d_0^2}, \quad (4.11)$$

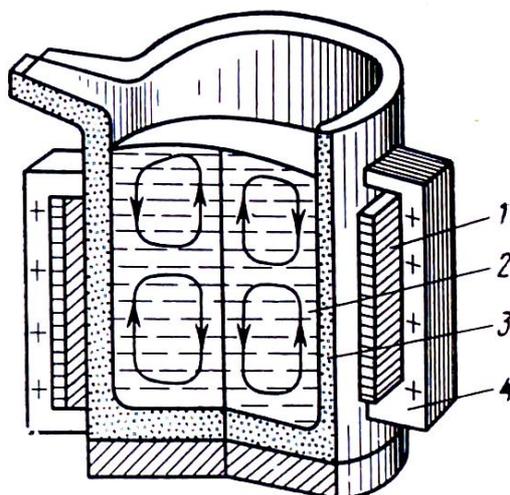


Рис. 4.3. Схема индукционной тигельной печи

Формула (4.11) справедлива при условии:

$$\frac{r_0 \sqrt{2}}{\Delta_{\text{Э.ГОР}}} \geq 7. \quad (4.12)$$

где  $r_0 = \frac{d_0}{2}$  и  $\Delta_{\text{Э.ГОР.}} = 503 \sqrt{\rho_{\text{ГОР.}} \mu f}$ , м ( $d_0$  – диаметр тигля, м);  $\rho_{\text{ГОР.}}$  – удельное электрическое сопротивление горячего металла, Ом·м.

Частота источника зависит от геометрических размеров (диаметра  $d_0$ ). В ИТП большой емкости применяются источники питания промышленной частоты, в печах средней и малой емкости – повышенной и высокой частот.

Коэффициент полезного действия печи  $\eta_{\text{п}}$  определяется зазором между индуктором и садкой. При уменьшении толщины стенки тигля электрический КПД  $\eta_{\text{Э}}$  увеличивается, а тепловой – уменьшается, поскольку при этом возрастают тепловые потери. ИТП имеют  $\eta_{\text{Э}} = 0,6 \dots 0,8$ . Тепловой КПД определяется видом футеровки и температурой расплава и составляет  $\eta_{\text{ТЭП}} = 0,8 \dots 0,85$ . Общий КПД  $\eta_{\text{п}} = \eta_{\text{Э}} \eta_{\text{ТЭП}} = 0,48 \dots 0,68$ .

Естественный коэффициент мощности ИТП  $\cos \varphi_{\text{п}} = 0,8 \dots 0,3$ , требуется установка батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности.

ИТП выпускаются различных емкостей, мощностей и частот питающего тока. Так, для плавки стали созданы печи емкостью 0,06 – 6 т, мощностью 90 – 2230 кВт, частотой тока 2400 – 500 Гц и производительностью 0,132 – 3,5 т/ч.

*Индукционная плавка без соприкосновения расплава с футеровкой.*  
*Гарнисажная плавка* – плавка, при которой расплавленный металл соприкасается только с твердой фазой такого же химического состава, что и расплав, отделяющий его от конструктивных элементов печи.

*Индукционная струйная плавка* заключается в том, что переплавляемый материал в виде заготовки-стержня перемещается с определенной скоростью через индуктор. Жидкий металл каплями или при достаточной мощности индуктора непрерывной струей стекает в изложницу и образует слиток нужного размера.

*Индукционную плавку во взвешенном состоянии* иногда называют плавкой в электромагнитном тигле. Физические основы метода заключаются в следующем: в индуктор или систему индукторов создающих переменное электромагнитное поле определенной конфигурации, помещают переплавляемый металл. Результатом взаимодействия индуцированных в металле токов с электромагнитным полем индуктора является состояние парения металла в магнитном поле. Металл стремится расположиться в зоне с минимальной напряженностью магнитного поля. Высококачественные монокристаллы выращивают и с помощью *бестигельной зонной плавки* с индуктивным способом передачи энергии в расплав. При медленном перемещении узкой расплавленной зоны через сравнительно длинный твердый образец достигается перераспределение примесей и изменение кристаллической структуры исходного материала (рис. 4.5.)

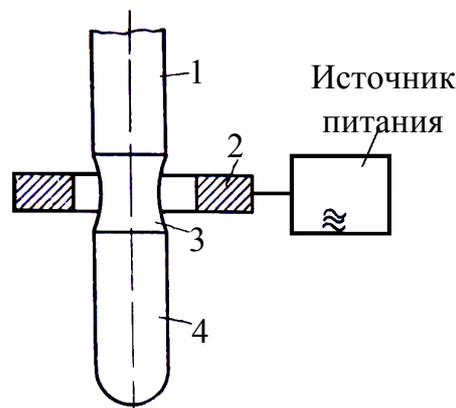


Рис. 4.5. Схема зонной плавки: 1 – поликристалл;  
 2 – индуктор; 3 – расплавленная зона; 4 – монокристалл

### 4.3. ИНДУКЦИОННЫЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Индукционные нагревательные установки (ИНУ) применяются в различных технологических процессах, и подразделяются на два основных типа: установки *сквозного* и *поверхностного* нагрева. ИНУ сквозного нагрева применяются для нагрева заготовок под последующую пластическую деформацию: ковку, штамповку, прессовку, прокатку и т. д.

В зависимости от геометрических параметров деталей и их материала источники питания ИНУ выполняют на частоту 50 – 10000 Гц. Выбор рабочей частоты производят таким образом, чтобы выделение теплоты происходило в слое достаточной толщины по сечению детали, нагрев считают глубинным при условии:

$$\frac{r_0 \sqrt{2}}{\Delta_{\text{Э.ГОР}}} = 3 \dots 5, \quad (4.13)$$

где  $r_0$  – радиус нагреваемой заготовки;  $\Delta_{\text{Э.ГОР}}$  – глубина проникновения тока в металл горячей заготовки.

Для цилиндрических стальных заготовок:

$$f = \frac{3 \cdot 10^4}{d_0^2}, \quad (4.14)$$

где  $d_0$  – диаметр нагреваемой заготовки, см.

Индукционный поверхностный нагрев сопровождается проявлением *поверхностного эффекта* и *эффекта близости*. Вследствие поверхностного эффекта ток в нагреваемом изделии распределяется неравномерно, наибольшая плотность тока имеет место в поверхностных слоях. Рост плотности тока от центра к поверхности проводника происходит по экспоненциальному закону, поэтому при использовании высокой частоты в поверхностных слоях можно получить большие плотности тока, обеспечивающие быстрый нагрев металла.

*Поверхностный нагрев* применяют для нагрева деталей под последующую термохимическую обработку (закалка, цементация, азотирование и т. п.). Схемы некоторых индукторов для поверхностного нагрева показаны на рис. 4.6, а – в.

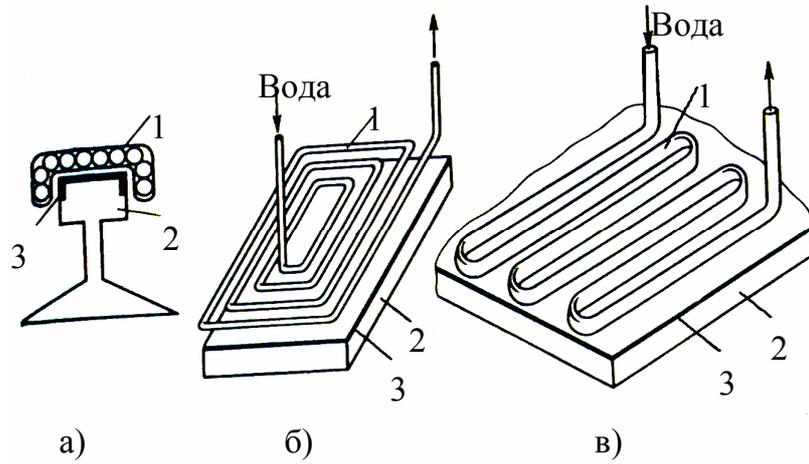


Рис. 4.6. Технологические схемы поверхностного индукционного нагрева:  
1 – индуктор; 2 – нагреваемое тело; 3 – нагретый слой изделия

Индукторы характеризуются удельной поверхностной мощностью ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), которая зависит от частоты тока, глубины прогрева, размеров нагреваемых изделий.

Потребляемую индукционной установкой из сети активную мощность  $P_C$  определяют через полезную мощность  $P_{\text{пол}}$ , идущую на нагрев деталей, и общий КПД системы:

$$P_C = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_C} = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_{\text{И}} \eta_{\text{КБ}} \eta_{\text{Л}} \eta_{\text{ИП}}}, \quad (4.15)$$

где  $\eta_C, \eta_{\text{И}}, \eta_{\text{КБ}}, \eta_{\text{Л}}, \eta_{\text{ИП}}$  – соответственно КПД системы, индуктора, конденсаторной батареи, линии и источника питания.

Полезная мощность:

$$P_{\text{пол}} = C_P (t_k - t_0) \frac{gn}{\tau}, \quad (4.16)$$

где  $C_P$  – средняя интегральная удельная теплоемкость в интервале температур  $(t_k - t_0)$  Дж/(кг·К);  $t_k$  и  $t_0$  – конечная и начальная температуры детали, К;  $g$  – масса одной заготовки, кг;  $n$  – число заготовок, одновременно нагреваемых в индукторе;  $\tau$  – время нагрева, с.

Для обеспечения равномерного нагрева заготовок в индукторе его длину  $l_1$  необходимо выбирать несколько большей длины садки  $l_2$ .

Оптимальная частота  $f_{\text{опт}}$  для нагрева на заданную глубину  $\Delta_{\text{опт}}$ :

$$f_{\text{опт}} = \frac{\rho}{\pi \mu \Delta_{\text{опт}}^2}, \quad (4.17)$$

Электрический КПД индуктора зависит от соотношения диаметров детали  $d_2$ , индуктора  $d_1$ , удельного сопротивления металла индуктора  $\rho_1$  и заготовки  $\rho_2$ , магнитной проницаемости  $\mu_2$  металла заготовки:

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{1}{1 + (d_1 + d_2) \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2}}}. \quad (4.18)$$

Тепловой КПД индуктора при неизменной удельной мощности падает с повышением частоты и с увеличением диаметра нагреваемой заготовки.

*Коэффициент мощности системы индуктор – садка  
и реактивная мощность конденсаторной батареи*

Коэффициент мощности системы индуктор – садка:

$$\cos \varphi_{\text{И}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ \frac{Q_{\text{С}} + Q_{\text{И}} + Q_{\text{З}}}{P_{\text{С}} + P_{\text{И}}} \right]}}, \quad (4.19)$$

где  $P_{\text{С}}$ ,  $Q_{\text{С}}$  – активная и реактивная мощности садки;  $P_{\text{И}}$ ,  $Q_{\text{И}}$  – активная и реактивная мощности индуктора;  $Q_{\text{З}}$  – реактивная мощность в зазоре между индуктором и садкой.

Реактивная мощность конденсаторной батареи (КБ)  $Q_{\text{КБ}}$  для компенсации естественного  $\cos \varphi_{\text{И}}$  индукционного устройства:

$$Q_{\text{КБ}} = P_{\text{К}} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{И}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{К}}), \quad (4.20)$$

где  $P_{\text{К}}$  – его активная мощность;  $\varphi_{\text{К}}$  – сдвиг фаз между током и напряжением в скомпенсированном контуре.

Активные потери в КБ  $\Delta P_{\text{КБ}} = Q_{\text{КБ}} \operatorname{tg} \delta$ , где  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

Коэффициент полезного действия КБ при компенсации реактивной мощности индукционного устройства:

$$\eta_{\text{КБ}} = \frac{P_{\text{К}}}{P_{\text{К}} + \Delta P_{\text{КБ}}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{\text{КБ}}}{P_{\text{К}}}}. \quad (4.21)$$

Следует отметить, что при высоких частотах и низком  $\cos \varphi_{\text{И}}$  потери в конденсаторах могут достигать 10 – 12 % мощности индуктора.

#### 4.4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Использование электрического тока, проходящего через диэлектрики и полупроводники в переменном электрическом поле, является основой диэлектрического нагрева (ДН). С энергетической точки зрения такой нагрев является наиболее эффективным, поскольку при его осуществлении вся энергия вносится в массу нагреваемого материала.

По технологическим признакам установки ДН подразделяют на три вида:

– установки, используемые в процессах промышленной обработки крупных изделий, требующих быстрого нагрева в однородном электрическом поле: сушка волокон шерсти или хлопка, целлюлозы и лесоматериалов, обжиг крупных электроизоляторов и фарфоровых изделий, производство звуко- и теплоизоляционных материалов, сварка пластмасс и полимерных пленок;

– установки, используемые для нагрева протяженных плоских изделий: сушки текстильного волокна, бумаги, фотопленки, фармацевтических препаратов, полимеризации клеев, пастеризации и т. д.;

– установки, не требующие быстрого и однородного нагрева: размораживание продуктов, разогрев и быстрое приготовление блюд, обжиг керамических изделий и т. п.

Частицы диэлектрика в электрическом поле испытывают механическое воздействие, смещающее положительно заряженные частицы в одну сторону, а отрицательно заряженные – в другую. В результате такая молекула воспринимается как диполь, т. е. как система двух равных, но противоположных зарядов  $+q$  и  $-q$ , смещенных друг относительно друга на расстояние (рис. 4.7, а). Такой диэлектрик называют *поляризованным*.

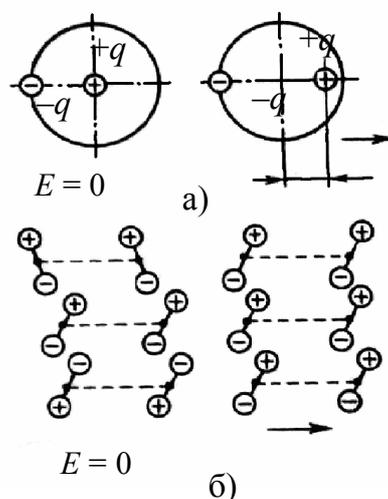


Рис. 4.7. Виды поляризации диэлектрика в электрическом поле:  
а – поляризация атомов; б – ориентационная поляризация

Различают несколько видов поляризации:

- *электронная поляризация* атомов, вызванная смещением электронного облака относительно ядра атома;
- *ионная поляризация* молекул, вызванная упругим смещением ионов в твердых диэлектриках с ионной кристаллической решеткой (ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в поваренной соли);
- *ориентационная поляризация*, имеющая место в диэлектриках с молекулами, представляющими собой жесткие диполи, независимо от наличия внешнего электрического поля. Поляризация проявляется в частичном повороте и упорядочении диполей под влиянием внешнего электрического поля (рис. 4.7, б).

Поляризация диэлектрика происходит не только в постоянном, но и в переменном электрическом поле. В этом случае направление поляризации меняется с частотой поля, упругие диполи вибрируют, жесткие поворачиваются в прямом и обратном направлениях, происходит перемещение зарядов, т. е. через диэлектрик проходит электрический ток.

Поляризация сопровождается потерями энергии, вызванными трением между молекулами (потери трения) и перемещением диполей (дипольные потери), которые выражаются в нагреве диэлектрика или полупроводника, скорость которого определяется, в частности, частотой изменения поля.

Происходящие в диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, процессы определяются диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ . Вещественная часть комплекса  $\varepsilon'$  характеризует отношение емкостей конденсатора до и после введения в него диэлектрика – *относительная диэлектрическая проницаемость вещества*. Мнимая часть  $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \text{tg}\delta$  характеризует поглощение энергии поля диэлектриком и называется коэффициентом потерь диэлектрика.

Проходящий через конденсатор с диэлектриком ток имеет две составляющие: ток смещения  $I_{см} = j\omega CU$  и ток проводимости  $I_{\Pi} = gU$ . Полный ток, проходящий через диэлектрик,

$$I = I_{\Pi} + I_{см} = (g + j\omega C)U. \quad (4.22)$$

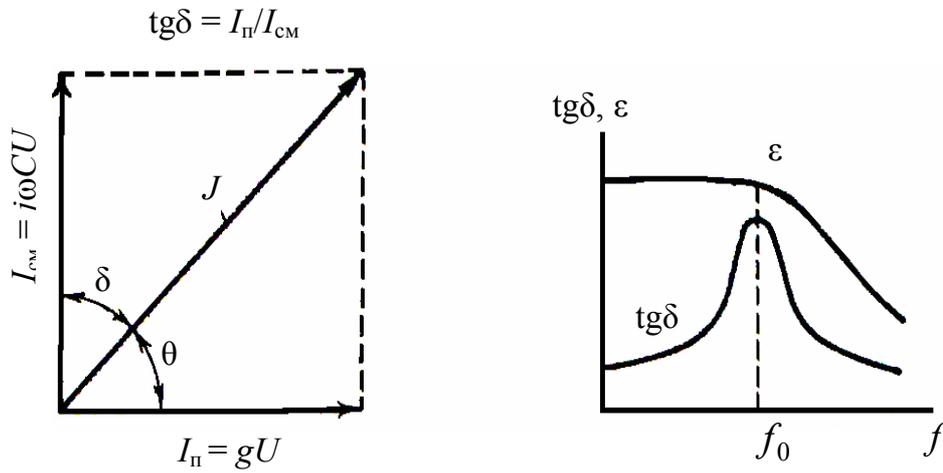


Рис. 4.8. Векторная диаграмма токов в диэлектрике в переменном электрическом поле

Отношение тока проводимости к току смещения  $I_{\Pi}/I_{cm} = \text{tg}\delta$  определяет коэффициент потерь в диэлектрике.

Показатели  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  зависят от рода и физического состояния вещества (влажности, температуры), частоты поля (рис. 4.8). Величина  $\text{tg}\delta$  имеет максимум при так называемой *релаксационной частоте*  $f_0$ , характерной для каждого материала.

Выделяющаяся в диэлектрике мощность определяется по формуле:

$$P = UI \cos\varphi \approx UI \cdot \text{tg}\delta = \omega CU^2 \cdot \text{tg}\delta, \quad (4.23)$$

где  $\omega = 2\pi \cdot f$  – угловая скорость, рад/с;  $C$  – емкость плоского конденсатора, Ф;  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$  ( $S$  – площадь пластин конденсатора,  $\text{м}^2$ ;  $d$  – расстояние между ними, м;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума).

Имея в виду, что объем диэлектрика равен  $S_d$  и напряженность электрического поля  $E = \frac{U}{d}$  (В/м), удельная мощность  $P_0$  (Вт/м<sup>3</sup>), выделяющаяся в единице объема диэлектрика, определяют по формуле:

$$P_0 = 5,56 \cdot 10^{-11} f E^2 \epsilon \cdot \text{tg}\delta. \quad (4.24)$$

При затратах теплоты только на нагрев удельная мощность, поступающая в материал, должна соответствовать

$$P_{\text{нагр}} = C_p \gamma (\Delta T / \Delta \tau) / \eta_t, \quad (4.25)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(г·К);  $\gamma$  – плотность материала, г/см<sup>3</sup>;  $\frac{\Delta T}{\Delta \tau}$  – скорость нагрева материала, К/с;  $\eta_t$  – термический КПД процесса.

При затратах теплоты только на испарение

$$P_{\text{исп}} = \left( \frac{L}{\eta_t} \right) \cdot \left( \frac{\Delta M}{\Delta \tau} \right), \quad (4.26)$$

где  $L$  – скрытая теплота парообразования при данной температуре нагрева, Дж/г;  $\frac{\Delta M}{\Delta \tau}$  – скорость испарения, г/(см<sup>3</sup>·с).

#### 4.5. УСТАНОВКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Установки диэлектрического нагрева (ДН) подразделяют на два вида: собственно установки ДН, работающие на высокой частоте (ВЧ-установки – частота 66 кГц – 100 МГц), и установки сверхвысокочастотного нагрева (СВЧ-нагрев – частота 1000 МГц и выше).

Одним из условий равномерного нагрева по всему объему однородного материала является превышение глубины проникновения электромагнитной волны в материал под его толщиной. Глубина проникновения (см) определяет расстояние, на котором напряженность электрического поля ослабевает в  $e$  раз относительно ее значения на поверхности:

$$\Delta = 9,55 \cdot 10^{11} f \sqrt{\varepsilon} \cdot \text{tg} \delta, \quad (4.27)$$

В комплект установок ДН входят высокочастотный генератор; система защиты и сигнализации; технологический узел.

Принципиальная схема высокочастотного генератора на триоде и его эквивалентная схема нагрузки показаны на рис. 4.9. Технологический узел-конденсатор с нагреваемым материалом включен в колебательный контур. Полное активное сопротивление контура:  $R_K = R_H + R_1$ . Если оно незначительно  $\left( R_K \ll 2 \sqrt{\frac{L_K}{C_H}} \right)$ , то частоту генератора с достаточной точ-

ностью определяют по условию резонанса контура без потерь:

$$\frac{1}{\omega \cdot C_H} = \omega L_K \quad \text{или} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K C_H}}.$$

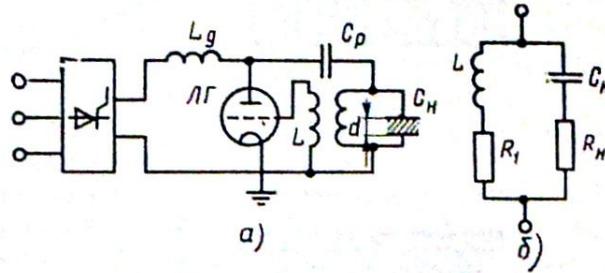


Рис. 4.9. Схема высокочастотного генератора для диэлектрического нагрева (а) и эквивалентная схема нагрузки (б):

$L_D$  – индуктивность дросселя, защищающего выпрямитель от высокой частоты; ЛГ – ламповый генератор;  $C_p$  – разделительный конденсатор;  $C_H$  – емкость нагревательного конденсатора;

$L_K$  – индуктивность колебательного контура;

$R_H$  – активное сопротивление индуктивной катушки и соединительных проводов

Эквивалентное сопротивление контура с учетом потерь:

$$R_{\text{Э}} = \frac{1}{\omega C_H} \cdot \omega L_K R_K = \frac{L_K}{C_H L_K}, \quad (4.28)$$

где  $\frac{\omega L_K}{R_K}$  – отношение реактивного и активного сопротивлений, т. е. добротность контура.

Выходная мощность генератора (Вт)

$$P_{\Gamma} = \frac{P_0 v_K}{\eta_K}, \quad (4.29)$$

где  $v_K$  – объем конденсатора, м<sup>3</sup>;  $\eta_K$  – КПД колебательного контура.

Конструкция технологического узла определяется в основном родом и видом нагреваемого материала. Различные схемы осуществления технологических узлов установок ДН показаны на рис. 4.10.

Схемы технологических узлов для нагрева и сушки крупногабаритных изделий и порошкообразных материалов показаны на рис. 4.10, а, б. При ДН температура внутри нагреваемого материала выше, чем в поверхностных слоях, с которых происходит удаление влаги. Совместное влияние градиентов давления, влагосодержания и температуры способствует

высокой производительности сушки с использованием высокочастотного нагрева.

На рис. 4.10, в показана схема технологического узла для изготовления изделий из пенопласта. При формировании различных видов изделий исходное сырье помещается в формы, рабочие полости которых повторяют конфигурацию изделия.

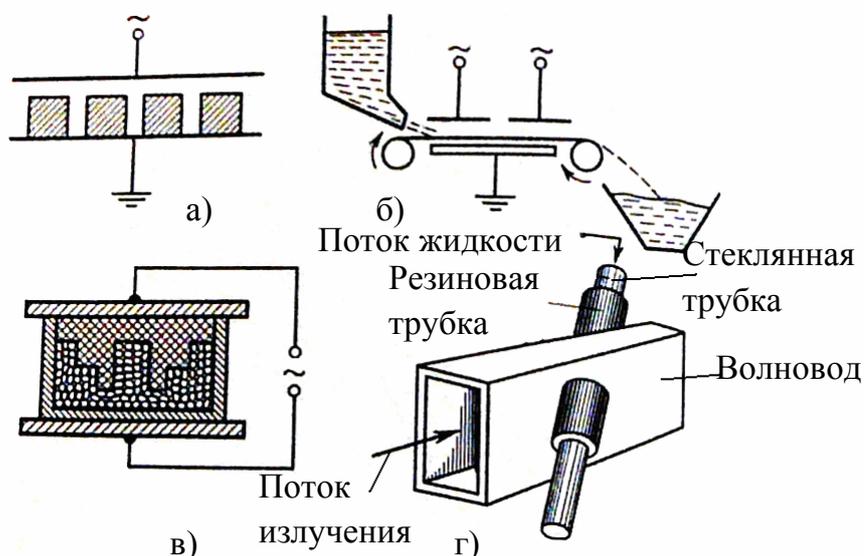


Рис. 4.10. Схемы технологических узлов установок диэлектрического нагрева

Установки ДН по рабочим частотам условно подразделяют на установки *средневолнового* ( $f = 0,3 \dots 3,0$  МГц), *коротковолнового* ( $f = 3 \dots 30$  МГц) и *метрового* ( $f = 30 \dots 300$  МГц) диапазонов.

Особенностью установок *сверхвысокой частоты* является соизмеримость геометрических размеров колебательных систем с длиной волны используемых колебаний. Нагрев в волноводе осуществляется бегущей волной и применяется при термообработке листовых материалов, жгутов, лент, жидкостей (рис. 4.10, г).

#### 4.6. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Индукционная установка состоит из: источника питания, согласующего трансформатора или автотрансформатора, конденсаторной батареи для компенсации реактивной мощности установки; индуктора нагрева-

тельной или плавильной установки; аппаратуры защиты, регулирования и автоматического управления, соответствующих механизмов.

По частоте потребляемого тока индукционные установки подразделяют на установки промышленной, повышенной и высокой частоты.

Подключение однофазных индукционных нагревательных установок промышленной частоты большой мощности к трехфазной сети вызывает неравномерную загрузку фаз по току, несимметрию напряжений, что неблагоприятно сказывается на работе потребителей, подключенных к сети.

На рис. 4.11 показаны схема подключения индукционной печи в трехфазную сеть с помощью симметрирующего устройства и векторная диаграмма токов и напряжений. Предполагается, что колебательный контур индукционной установки полностью скомпенсирован и представляет собой чисто активную нагрузку.

Как следует из векторной диаграммы,  $I_A = I_{AB} - I_{CA}$ ;  $I_B = I_{BC} - I_{AB}$ ;  $I_C = I_{CA} - I_{BC}$ . Чтобы обеспечить симметрию токов, необходимо соблюсти условие  $I_A = I_B = I_C = \frac{I_{CA}}{\sqrt{3}} = \frac{I_{BC}}{\sqrt{3}} = \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}}$ .

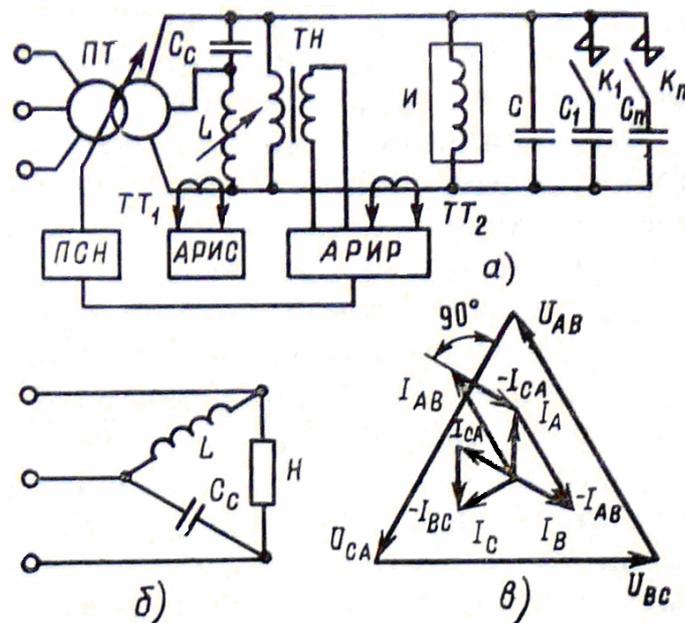


Рис. 4.11. Схема включения индукционной печи через симметрирующее устройство (а), схема включения однофазной нагрузки в трехфазную сеть (б) и векторная диаграмма токов и напряжений (в): ПСН – переключатель ступеней напряжений;  $C_c$  – симметрирующая емкость;  $L$  – реактор симметрирующего устройства;  $C - C_n$  – компенсирующая конденсаторная батарея;  $I$  – индуктор печи; АРИС – регулятор симметрирующего устройства; АРИР – регулятор режима;  $K - K_n$  – контакторы управления конденсаторной батареи  $C - C_n$ ; ТТ(1), ТТ(2) – трансформаторы тока

При напряжении сети  $U_C$  и токе нагрузки  $I_{AB} = \frac{P}{U_C}$ , где  $P$  – активная мощность нагрузки,  $X_L = X_C = U_C^2 \sqrt{3} / P$ .

Токи индуктивной и емкостной ветвей балансирующего устройства соответственно  $I_{CA} = I_{BC} = \frac{U_C}{X_L} = \frac{U_C}{X_C}$ .

Индукционные установки повышенной частоты питаются от специальных агрегатов, предназначенных для преобразования трехфазного тока промышленной частоты в однофазный ток повышенной частоты. Такими устройствами являются машинные генераторы, статические умножители и тиристорные преобразователи частоты.

В промышленности применяются машинные преобразователи с рабочей частотой 0,5 – 10 кГц.

Принципиальная схема силовой цепи тиристорного преобразователя частоты показана на рис. 4.12. Выпрямительный блок II представляет собой трехфазный мостовой управляемый выпрямитель, преобразующий переменный ток промышленной частоты в постоянный ток, блок дросселей (реакторов) III осуществляет сглаживание выпрямленного тока, инвертор IV преобразует постоянный ток в однофазный переменный повышенной частоты. Принцип действия примененного двухтактного инвертора основан на поочередном отпирании вентилей моста, в результате чего в нагрузке V будет проходить переменный ток, частота которого равна частоте коммутации управляемых вентилей инвертора. При открывании пары вентилей  $VS_1 - VS_2$  ток через нагрузку протекает в направлении 1, а при открывании вентилей  $VS_3 - VS_4$  – в направлении 2. Блок пуска БП обеспечивает запуск преобразователя. Тиристорные преобразователи частоты выпускаются на частоты 0,5 – 10 кГц.

### *Магнетроны*

В установках СВЧ-нагрева источниками концентрированного электромагнитного излучения служат магнетроны (рис. 4.13). Анодный блок магнетрона 1 представляет собой медный цилиндр с центральным круглым сквозным отверстием и сквозными полостями 2 (8-40), являющимися объемными резонаторами. Резонаторы соединены щелью с центральным отверстием. Они образуют кольцевую колебательную систему. Для стабильной работы магнетрона необходимо, чтобы ближайшая резонансная частота колебаний системы значительно отличалась от рабочей частоты.

Часть электрического СВЧ-поля (300 МГц – 300 ГГц) проникает через щели резонаторов в пространство анод – катод.

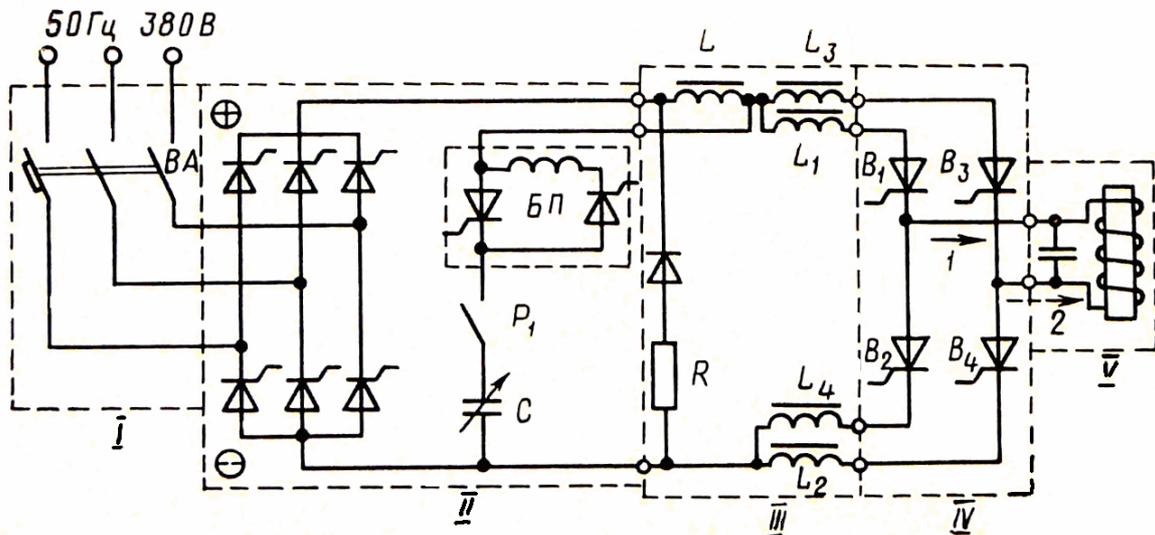


Рис. 4.12. Схема силовой цепи тиристорного преобразователя частоты:  
 I – шкаф ввода питания; II – выпрямитель; III – блок реакторов; IV – инвертор;  
 V – нагрузка;  $L$  – сглаживаемый реактор; БП – блок пуска; ВА – выключатель автоматический;  $C$  – емкость;  $R$  – резистор;  $P$  – контактор

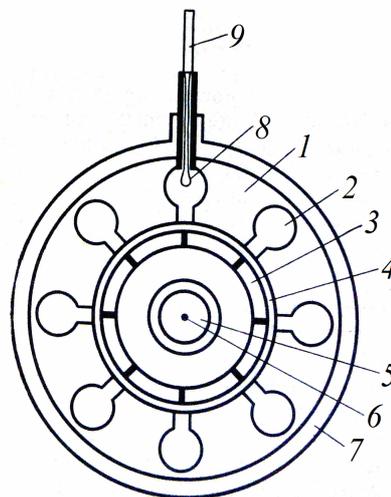


Рис. 4.13. Принципиальная схема многорезонаторного магнетрона:  
 1 – анодный блок с восемью резонаторами типа «щель – отверстие»; 2 – резонатор;  
 3 – ламель анода; 4 – связка в виде кольца (второе такое же кольцо расположено на другом конце анодного блока); 5 – катод; 6 – вывод подогрева катода; 7 – радиатор;  
 8 – петля связи для вывода СВЧ-энергии; 9 – стержень вывода СВЧ-энергии для присоединения к коаксиальной линии

## РАЗДЕЛ II. УСТАНОВКИ ДУГОВОГО НАГРЕВА

### ГЛАВА 5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И СВОЙСТВА ДУГОВОГО РАЗРЯДА

#### 5.1. ИОНИЗАЦИЯ ГАЗОВ. ПОНЯТИЕ ПЛАЗМЫ

Плазмой принято называть вещество, находящееся в четвертом состоянии, характеризующееся наличием нейтральных молекул и атомов, а также заряженных частиц – электронов и ионов, проводящее электрический ток и подчиняющееся законам магнитной газодинамики. В обычных условиях различные газы и их смеси (воздух, аргон, водород, гелий, углекислый газ и др.) не проводят электрический ток. Проводимость возникает тогда, когда в газовой среде помимо молекул и атомов появляются свободные заряженные частицы – электроны, положительные и отрицательные ионы – и газ превращается в плазму. Для молекулярных газов первым процессом является диссоциация – образование атомов. Возникновение в газе заряженных частиц – ионизация газа – может происходить в результате его нагрева, поглощения энергии рентгеновского или ультрафиолетового излучения, космических лучей, лучей оптического квантового генератора (лазера), действия электрического поля и др.

Образование ионов требует затраты энергии извне на преодоление кулоновских сил притяжения между электроном и положительным ионом, называемой энергией (работой) ионизации  $A_{и}$ , которую определяют как произведение заряда электрона на потенциал ионизации  $U_{и}$ :  $A_{и} = e_0 U_{и}$ . Потенциал ионизации атома равен разности потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы приобрести кинетическую энергию, достаточную для ионизации атома при соударении с ними. Численно величины  $A_{и}$  и  $U_{и}$  равны, если  $A_{и}$  выразить в электрон-вольтах.

Работа ионизации определяет химическую активность элемента, поскольку при ионизации отрываются валентные электроны ( $A_{и} = 3,9...26$  эВ) и составляет: для цезия – 3,9, калия – 4,3, циркония – 6,8, железа – 7,9, водорода – 13,6, азота – 12,4, гелия – 24,6 эВ. После отрыва наиболее слабо связанного электрона от атома могут отрываться электроны, связанные сильнее. При этом образуются многократно ионизованные ионы.

Уравнение сил, действующих на частицу с массой  $m$  и единичным зарядом  $e_0$ , имеет вид:

$$e_0 E = \frac{mdv}{d\tau} = ma, \quad (5.1)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $m$  – масса частицы, г;  $v$  – скорость частицы, м/с;  $a$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>.

При начальной скорости, равной нулю, скорость в момент  $\tau$   $v_\tau = \left(\frac{e_0}{m}\right)E\tau$ . Пройденный путь за время  $\tau$ :

$$l_\tau = 0,5v_\tau = \left(\frac{0,5e_0}{m}\right)E\tau. \quad (5.2)$$

Подставляя в уравнение (5.2) значение  $E = \frac{U}{l}$ , где  $U$  – разность потенциалов на пути  $l$ , получим скорость электрона

$$v_e = \sqrt{\frac{e_0 U}{2m_e}} = 2,97 \cdot 10^5 \sqrt{U}, \quad (5.3)$$

где  $m_e$  – масса электрона.

*Фотоионизация* – ионизация атомов излучением возможна лишь в том случае, если энергия фотона  $h\nu$  превышает работу ионизации  $A_{и}$ :

$$h\nu = \frac{c}{\lambda} \geq A_{и},$$

где  $\nu$  – частота излучения,  $\frac{l}{c}$ ;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света, м/с;  $\lambda$  – длина световой волны, м.

Так как все виды ионизации: тепловое движение частиц, электрическое поле, световое излучение – повышают скорость взаимного перемещения частиц, то и наложение высокочастотного напряжения приводит к ионизации пространства.

Одновременно с процессом ионизации происходит деионизация – рекомбинация положительных и отрицательных частиц и диффузия их за пределы ионизированного объема газа.

Процесс деионизации зависит от давления и температуры и в некоторой степени определяется коэффициентом рекомбинации:

$$\alpha = g_{\text{const}} \frac{p}{T^{3,5}}.$$

Таким образом, при повышении давления и понижении температуры плазма быстро деионизируется и теряет электропроводность, превращаясь в нейтральный газ. Процесс деионизации ускоряется диффузией заряженных частиц из нагретых плазменных объемов. Коэффициент диффузии

$$D = \frac{\lambda v}{3},$$

где  $v$  – средняя скорость заряженных частиц, м/с;  $\lambda$  – длина свободного пробега, м.

Обычно количество существующих зарядов разного знака вследствие процессов ионизации и рекомбинации в объеме плазмы примерно одинаково, и суммарный заряд плазмы равен нулю. Такую плазму называют *квазинейтральной*, т. е. *почти нейтральной*.

Существуют понятия равновесной и неравновесной плазмы. Плазму называют равновесной в том случае, если температуры ее компонентов – молекул, атомов, ионов и электронов – одинаковы. Такую плазму называют также изотермической. *Неравновесной* или *неизотермической* называют плазму, у которой температуры компонентов различны.

## 5.2. СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА

По внешнему признаку и особенностям электрические разряды в газах подразделяют на самостоятельные и несамостоятельные.

В самостоятельных разрядах заряженные частицы в разрядном промежутке образуются за счет энергии источника тока. Для поддержания несамостоятельного разряда необходимо воздействие внешних факторов, обеспечивающих ионизацию газов. Дуговой разряд или электрическая дуга характеризуется высокой плотностью тока в канале разряда (порядка  $10^2 - 10^6$  А/см<sup>2</sup>), низким катодным падением потенциала (менее 20 В), высокой температурой газовой среды в межэлектродном пространстве, достигающей в зависимости от условий существования дуги значений порядка  $(3...5) 10^3$  К и выше.

Чтобы вывести электрон из металла, необходимо повысить его энергию. Это может быть достигнуто следующими способами: наложением мощного электрического поля (автоэлектронная эмиссия), повышением температуры электрода (термоэлектронная эмиссия).

Разогрев электродов в самостоятельном разряде осуществляется за счет бомбардирования поверхности электрода ионами. Эмиссию электронов катодом в результате его разогрева называют термоэлектронной эмиссией.

Плотность тока термоэлектронной эмиссии зависит от температуры и материала катода и определяется по формуле

$$j_{ТЭ} = A_1 T^2 e^{\frac{-B_1}{T}}, \quad (5.4)$$

где  $j_{ТЭ}$  – плотность тока термоэлектронной эмиссии, А/см<sup>2</sup>;  $A_1$ ,  $B_1$  – постоянные, зависящие от материала электродов;  $T$  – температура поверхности электрода, К.

На холодных электродах при напряженности электрического поля у электродов  $10^6 - 10^7$  В/см возникает автоэлектронная эмиссия (вырывание электронов электрическим полем), плотность тока которой определяется эмпирическим выражением

$$j_{АЭ} = A_2 E^2 e^{\frac{-B_2}{E}}, \quad (5.5)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля у поверхности электрода, В/см;  $A_2$ ,  $B_2$  – постоянные для данного материала.

Формула (5.5) аналогична (5.4) и свидетельствует о большой зависимости плотности тока автоэлектронной эмиссии от напряженности поля.

При расстоянии между электродами более 4 – 5 мм вдоль дугового промежутка существует определенное распределение потенциала. Для осесимметричного дугового столба распределение потенциала соответствует показанному на рис. 5.1. В межэлектродном промежутке четко выделяются три основные зоны: область катодного падения потенциала, простирающаяся от катода на расстояние примерно  $10^{-6}$  м и имеющая падение потенциала около 8 – 15 В; область положительного дугового столба с напряжением от нескольких вольт до нескольких киловольт в зависимости от длины и условий горения дуги; область анодного падения потенциала, имеющая протяженность порядка  $10^{-6}$  м и падение потенциала 2 – 20 В.

*Электроды дуговых установок.* Электроды дуговых установок, применяемых в технологических процессах, подразделяют на два типа: легкоплавкие и тугоплавкие.

*Тугоплавкие электроды* изготавливают из графита и материалов на его основе, металлов, имеющих высокую температуру плавления (вольфрам,

молибден, тантал и др.), используя их способность выдерживать большие тепловые потоки и обеспечивать высокий уровень плотности тока термоэлектронной эмиссии.

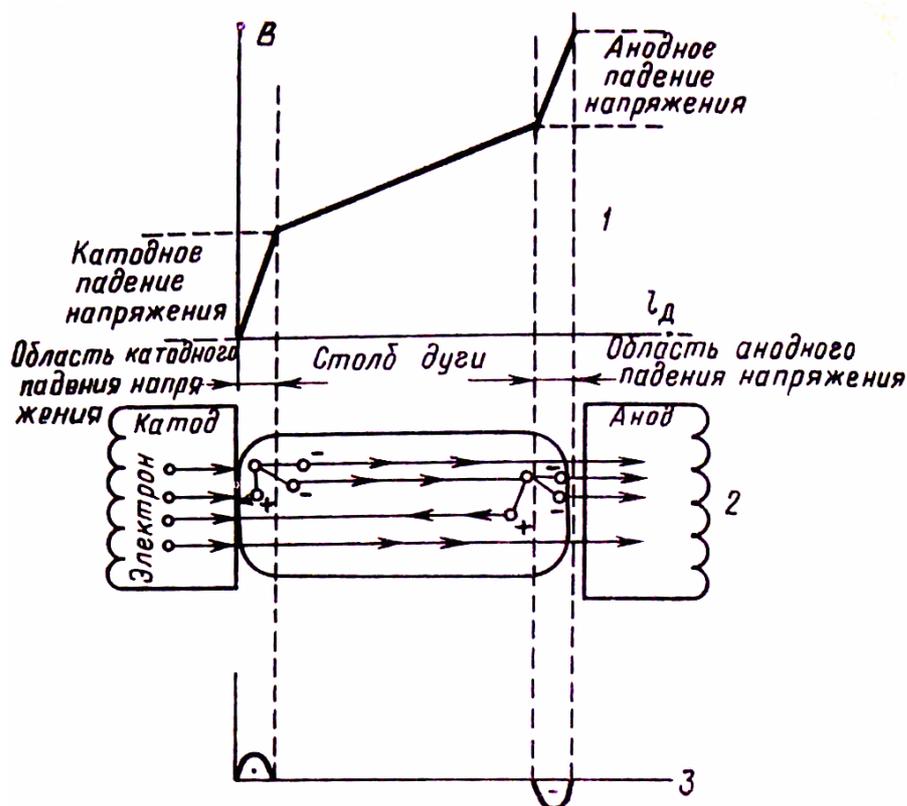


Рис. 5.1. Распределение потенциала и носителей электричества вдоль канала столба дуги

Полное падение напряжения между электродами:  $U_{\text{Д}} = U_{\text{а}} + U_{\text{к}} + El$ , где  $U_{\text{а}}$  и  $U_{\text{к}}$  – анодное и катодное падения потенциала, В;  $E$  – напряженность электрического поля (линейный градиент напряжения) дугового столба, В/м;  $l$  – длина дуги, м.

Можно выделить два вида технологического использования тугоплавких электродов:

1) в технологических процессах, проходящих в установках с использованием материала электрода (вакуумные дуговые печи). Такие технологические установки называют *установками с расходуемым электродом*;

2) в технологических процессах, происходящих в установках с *нерасходуемыми электродами* (электродуговой нагрев различных газов в плазмотронах, вакуумные дуговые печи, некоторые виды сварки и электрической резки металлов).

Рассмотрим электроды, применяемые в электродуговых нагревателях газа. На рис. 5.2 показан вольфрамовый катод, выполненный в виде вольфрамового стержня 1, выступающего на несколько миллиметров из охлаждаемого наконечника 2. Он предназначен для работы в электродуговых нагревателях газа при токах до 100 – 2000 А в среде аргона, водорода и азота, исключая присутствие кислорода.

Легкоплавкие электроды используются в технологических процессах с расходуемыми электродами (электродуговая сварка, переплав металлов и их сплавов в вакуумных дуговых печах и др.) и в процессах с нерасходуемыми электродами (нагрев газов в плазмотронах).

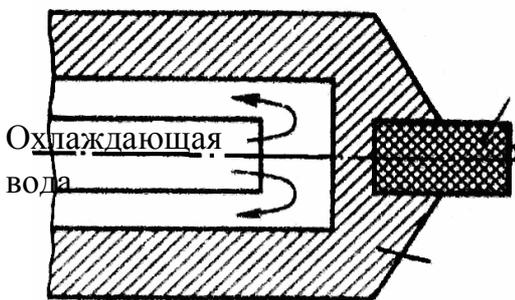


Рис. 5.2. Конструкция катодного узла плазмотрона

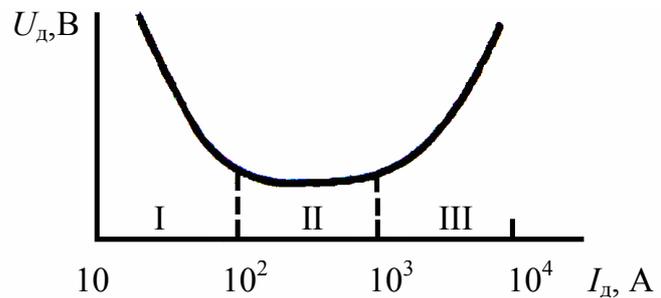


Рис. 5.3. Вольт-амперная характеристика электрической дуги

Ток дуги и основные характеристики плазмы дугового столба, определяющие его электропроводность, связаны соотношением

$$I = \pi \cdot r_{\text{д}}^2 n_e e_0 v_e,$$

где  $r_{\text{д}}$  – радиус столба дуги, м;  $n_e$  – концентрация электронов,  $1/\text{м}^3$ ;  $e_0$  – заряд электрона, Кл,  $v_e$  – средняя скорость движения электрона вдоль электрического поля, м/с.

Ни одна из входящих в уравнение величин не является постоянной при изменении любой другой из них. Это приводит к нелинейности вольт-амперной характеристики дуги (рис. 5.3)

Причиной падения характеристики на участке I является снижение сопротивления дуги при увеличении тока за счет роста температуры, концентрации заряженных частиц и скорости их движения. При этом с ростом тока увеличивается диаметр дугового столба и требуется меньше напряжения на проведение увеличивающегося тока. Проходящий через разряд электрический ток создает магнитное поле вокруг столба дуги. Взаи-

модействие тока и магнитного поля приводит к появлению сил магнитного сжатия дугового столба (пинч-эффект), которые стремятся ограничить диаметр дугового столба, что ведет к росту плотности тока и повышению линейной напряженности электрического поля.

Проводимость и в столбе электрической дуги является сложной функцией температуры, состава газа и других факторов. Для ее определения можно пользоваться формулой

$$\sigma = n_e e_0 \mu_e = \frac{0,81 n_e e_0^2}{\sqrt{3kTm_e}} \frac{1}{\Sigma n_s Q_{eS}}, \quad (5.6)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $m_e$  – масса электрона;  $Q_{eS}$  – сечение столкновения электрона с частицами компоненты  $S$ .

При температуре дуги  $T_d = (7,5 \dots 12,5) \cdot 10^3$  К проводимость  $\delta$  определяется в основном кулоновским взаимодействием частиц и является примерно постоянной величиной. Таким образом, если ограничить сечение дугового столба и увеличить силу тока, будут расти плотность тока и напряжение на дуге. На рис. 5.3 зоны II и III соответствуют этому случаю. Силы магнитного сжатия, излучение и диффузия электронов плазмы приводят к уменьшению диаметра столба дуги. Это определяет повышение напряженности на дуге при увеличении силы тока.

При температуре выше  $10^4$  К электрическая дуга излучает такую же энергию, как и абсолютно черное тело. При давлении около  $40 \cdot 10^5$  Па большая часть энергии столба дуги отводится излучением.

Температура по сечению столба дуги распределяется неравномерно. Она имеет максимум на оси столба и понижается к его периферии.

Интенсивное внешнее охлаждение дуги приводит к значительному повышению плотности тока и температуры в разрядном канале. Так, для свободно горящей сильноточной дуги плотность тока в столбе составляет около  $10^2$  А/см<sup>2</sup>.

Большое практическое значение имеет взаимодействие дугового столба с внешним магнитным полем. Так как дуга представляет собой проводник с током, то при наложении на него поперечного магнитного поля появляется сила Лоренца  $F$ , воздействующая на дугу:

$$F = e_0 \left[ E + \left( \frac{1}{c} \right) (V \cdot H) \right], \quad (5.9)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $c$  – скорость света, м/с;  $V$  – объем ионизированного столба, м<sup>3</sup>.

### 5.3. ОСОБЕННОСТИ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В отличие от дуги постоянного тока, дуга переменного тока имеет меняющиеся во времени ток и напряжение:  $i_D = f(\tau)$  и  $u_D = f(\tau)$ . При этом дважды за период ток и напряжение дугового разряда проходят через нуль и меняют направление, соответственно меняется и полярность электродов. При этом каждый раз происходит погасание и вновь зажигание электродугового разряда. После угасания дуги в межэлектродном промежутке происходят два процесса: деионизация промежутка (увеличение его диэлектрической прочности) и нарастание потенциала на электродах.

Осциллограммы тока и напряжения электрической дуги в цепи с активным сопротивлением показаны на рис. 5.4, а. При этом сила тока дуги  $i_D$  и напряжение источника питания  $u_{И}$  совпадают по фазе. Как следует из рисунка, дуга загорается при напряжении  $u_1$  и гаснет при напряжении  $u_2$ . Температура в межэлектродном промежутке резко снижается и происходит его деионизация.

После изменения полярности электродов напряжение между ними начинает увеличиваться: при напряжении  $u_1$  и при условии, что оно больше, чем необходимое для преодоления диэлектрической прочности остаточной плазмы, вновь возникает электрическая дуга, в которой ток течет в обратном направлении. Условие зажигания дуги можно выразить соотношением

$$\frac{dE}{d\tau} \ll \frac{dU}{d\tau},$$

где  $\frac{dE}{d\tau}$  – скорость нарастания диэлектрической прочности газа межэлектродного промежутка;  $\frac{dU}{d\tau}$  – скорость нарастания напряженности электрического поля между электродами.

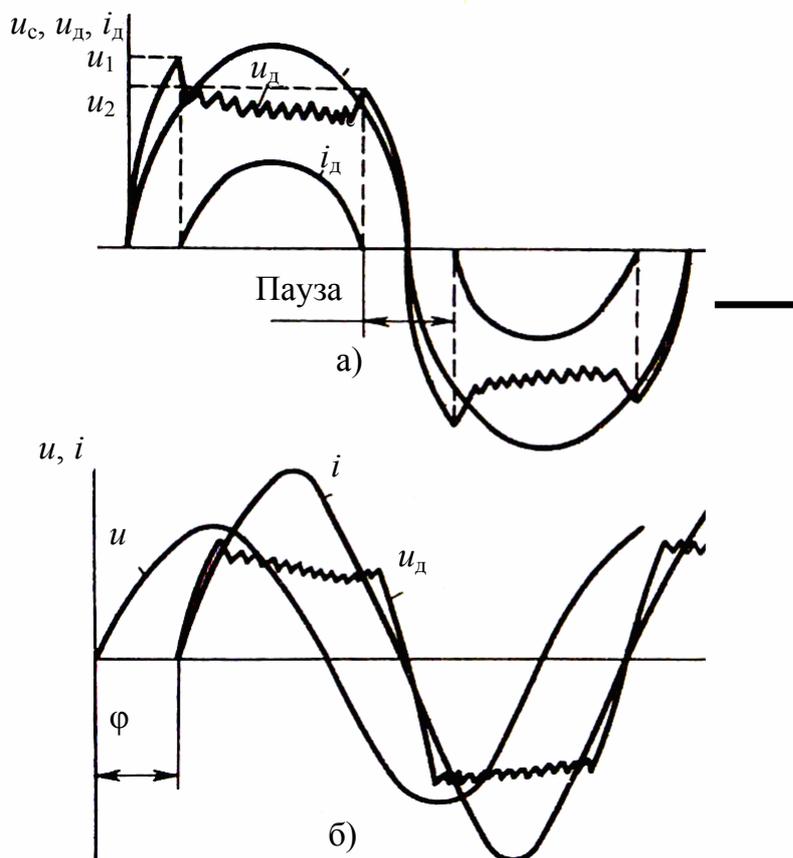


Рис. 5.4. Осциллограммы тока и напряжения дуги в цепи с чисто активным (а) и индуктивным (б) сопротивлением

Поскольку дуга дважды за период гаснет и загорается, кривая напряжения имеет пики зажигания и угасания. После зажигания дуги происходит снижение напряжения на ней, поскольку имеет место дальнейшее увеличение тока (по синусоиде) и, следовательно, повышение температуры (падающая вольт-амперная характеристика). После прохождения тока через максимум напряжение на дуге остается практически постоянным и повышается при снижении тока перед погасанием дуги.

Дуга может существовать с паузой тока и без паузы в момент перехода тока через нулевое значение. Продолжительность паузы определяется соотношением процессов нарастания диэлектрической прочности дугового промежутка и напряженности электрического поля между электродами, а также температуры электродов, обеспечивающих эмиссию электронов.

Для облегчения зажигания и непрерывного горения дуги в цепь последовательно с ней включают индуктивность (рис. 5.4, б).

Анализ кривых показывает, что после снижения напряжения источника питания ниже напряжения дуги ее горение поддерживается за счет электромагнитной энергии, накопленной в индуктивности. Изменяя ин-

дуктивность, можно получить такой угол  $\varphi$ , при котором дуга будет гореть непрерывно. Это произойдет при

$$u_{\text{Д}} = U_m \sin \varphi \quad \text{или} \quad \varphi = \arcsin u_{\text{Д}} / U_m, \quad (5.10)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения источника питания.

$$\text{Учитывая, что } \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}, \text{ а } \cos \varphi = \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \left(\frac{u_{\text{Д}}}{U_m}\right), \quad (5.11)$$

находим

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \left(\frac{u_{\text{Д}}}{U_m}\right)\right]^2}.$$

Подставив (5.10) в (5.11), получим:

$$\frac{u_{\text{Д}}}{U_m} \leq 0,54;$$

$$\cos \varphi = \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \left(\frac{u_{\text{Д}}}{U_m}\right) \leq \left(\frac{\pi}{2}\right) 0,54 = 0,85.$$

Таким образом, если отношение  $\frac{u_{\text{Д}}}{U_m}$  становится равным или меньшим 0,54, а  $\cos \varphi$  равным или меньшим 0,85, то дуга горит непрерывно.

Если мощность дуги на тугоплавких раскаленных электродах с их высокой тепловой инерцией достаточно велика, она может гореть устойчиво и при более низких значениях индуктивности.

Если дуга горит между разнотипными электродами, имеющими разную температуру и эмиссионные свойства, в токе дуги появляется выпрямительный эффект (например, когда дуга горит между угольным и медным водоохлаждаемыми электродами), что вызывает дополнительные потери в источниках питания дуговых установок переменного тока и влияет на их рабочие характеристики.

Дуга переменного тока в отличие от дуги постоянного тока имеет динамическую вольт-амперную характеристику, которая может быть построена по осциллограммам напряжения и тока (рис. 5.5).

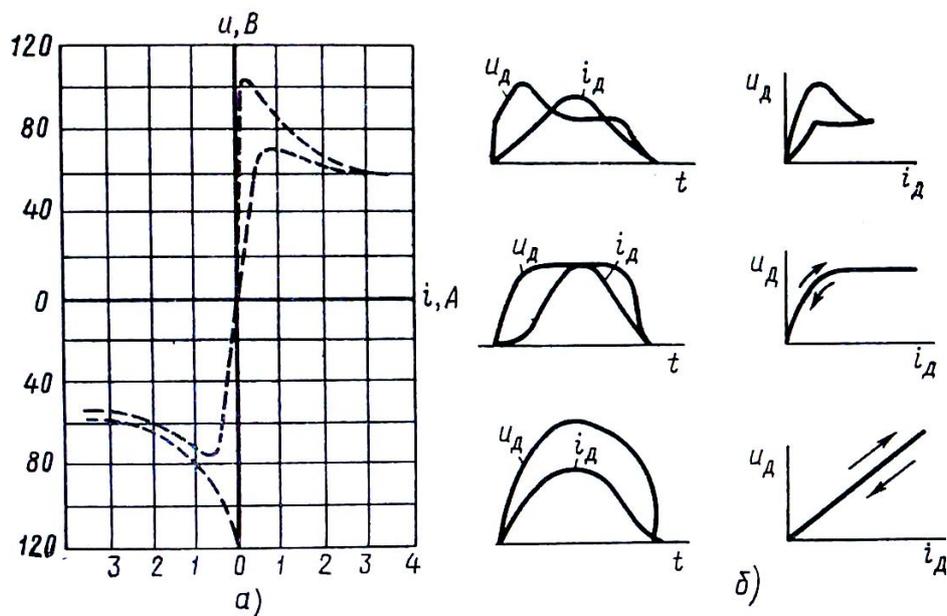


Рис. 5.5. Динамическая вольт-амперная характеристика дуги переменного тока

Она представляет собой изменение напряжения дуги в зависимости от силы тока в течение полного периода изменения тока.

Вольт-амперная динамическая характеристика в сильной мере зависит от значения  $\frac{di}{d\tau}$ , а также от частоты переменного тока. Если состояние дуги во время изменения силы тока не меняется, то дуга ведет себя как проводник с омическим сопротивлением, ей соответствует безгистерезисная характеристика (рис. 5.5, б).

Гистерезисный характер зависимости (рис. 5.5, а) объясняется термической инерционностью плазмы дуги. Верхняя ветвь петли соответствует началу полупериода, когда происходит рост тока и разогрев плазмы, нижняя – второй половине полупериода, когда уменьшающийся ток проходит в плазме, объем которой соответствует ранее протекавшему максимальному току.

#### 5.4. УСТОЙЧИВОСТЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Для обеспечения длительного устойчивого горения электрической дуги необходимо согласовать ее характеристику с характеристикой источника питания. Если дуга питается от источника бесконечной мощности,

ток дуги устанавливается в соответствии с условиями горения и может увеличиваться до тех пор, пока вольт-амперная характеристика дуги и внешняя характеристика источников питания не пересекутся, т. е. ток будет стремиться к бесконечности.

Для ограничения силы тока дуги в цепь последовательно с дугой включают сопротивление (рис. 5.6). В этом случае уравнение напряжения источника конечной мощности имеет вид

$$U_{\text{ист}} = U_{\text{д}} + I_{\text{д}}R + L \frac{di}{dt},$$

где  $U_{\text{д}}$  – напряжение на дуге, В;  $I_{\text{д}}$  – ток дуги, А;  $R$  – сопротивление, Ом;  $L$  – индуктивность, Гн.

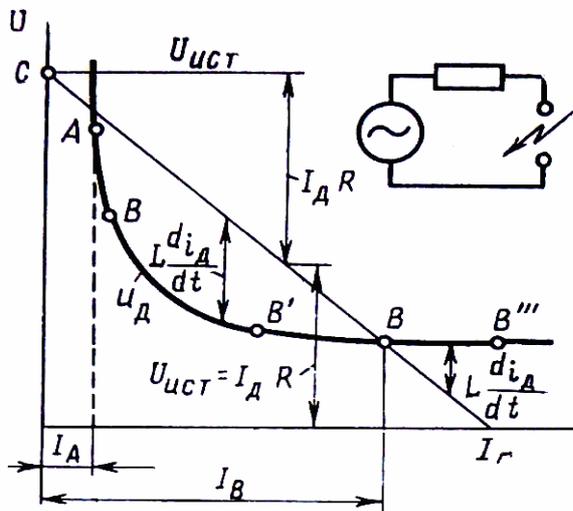


Рис. 5.6. Вольт-амперная характеристика системы дуга – балластное сопротивление

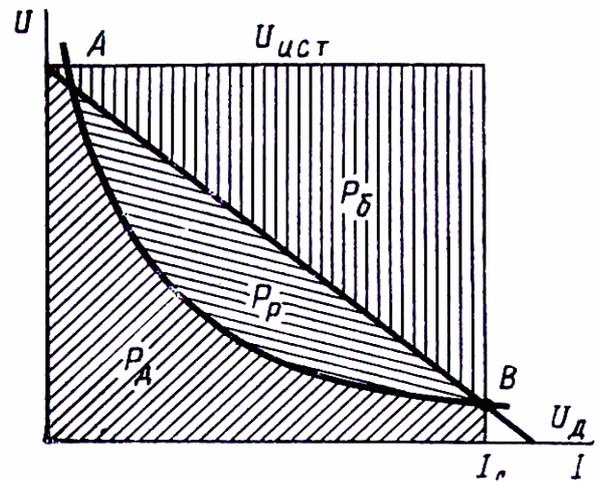


Рис. 5.7. Вольт-амперная характеристика дуги и источника питания

Прямая линия ( $U_{\text{ист}} - I_{\text{д}}R$ ) пересекает вольт-амперную характеристику дуги в точках А и В. Этим точкам соответствуют токи  $I_A$  и  $I_B$ . Рассматриваемую характеристику можно разбить на три зоны. Зона левее точки А – зона устойчивого гашения дуги, между точками А и В – зона горения, правее точки В – зона ограничения тока. Дуга может гореть устойчиво лишь при токе  $I_B$ , точка А соответствует неустойчивому горению дуги;  $I_K$  – точка короткого замыкания цепи.

Правее точки А, например в точке В', между вольт-амперной характеристикой дуги и внешней характеристикой питающей сети, существует подпитывающая ЭДС, которая способствует увеличению тока дуги. В точке В ЭДС равна нулю, поскольку напряжения источника и дуги оди-

наковы. Правее точки В" в точке В'" горение дуги невозможно, т.к. напряжение на ее электродах должно быть больше, чем может дать цепь при этом токе. В точке А случайному увеличению тока соответствует положительное значение ЭДС, которая и стремится увеличивать ток до предельного значения  $I_B$ .

Выделяющаяся в дуге мощность определяется силой тока и напряжением. Энергия, которая потребляется от источника питания, расходуется на покрытие энергии, выделяющейся в дуге, и энергии, рассеивающейся на балластном сопротивлении цепи дуги.

На рис. 5.7 показаны вольт-амперная характеристика дуги и внешняя характеристика источника питания с включенным последовательно между ним и дугой балластным сопротивлением. В точке В баланс энергии источника запишем в виде

$$U_{\text{ист}} I_{\text{д}} = U_{\text{д}} I_{\text{д}} + I^2 R_{\text{б}},$$

где  $R_{\text{б}}$  – сопротивление балластного сопротивления, Ом.

Из рис. 5.7. видно, что левее точки В это соотношение не выдерживается, поскольку появляется еще одна составляющая  $P_p$  – запас мощности регулирования, которая и обуславливает горение дуги в точке В.

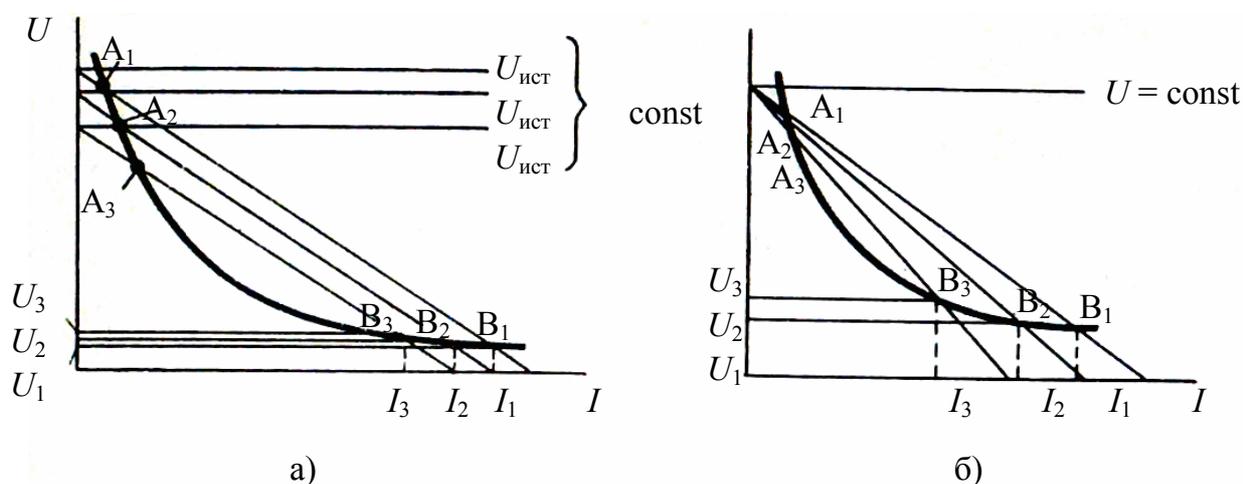


Рис. 5.8. Вольт-амперная характеристика дуги:  
а – при изменении напряжения источника питания;  
б – при изменении балластного сопротивления

Мощность электрической дуги можно регулировать несколькими способами:

1) изменением напряжения питающей сети при постоянном балластном сопротивлении (рис.5.8, а). Регулировка происходит за счет изменения токов  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  и соответственно напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$ ;

2) изменением балластного сопротивления при неизменном напряжении источника питания (рис. 5.8, б). Для осуществления этого способа регулирования необходимо иметь сопротивление с переключением ступеней;

3) воздействием на дугу различными факторами, в результате чего изменяются условия ее горения при постоянных напряжениях источника и сопротивления в цепи: наложение на дуговой разряд магнитного поля, поток газа, изменение давления среды и самой среды, в которой горит дуга, а также изменение длины дугового столба.

При питании дуги от индивидуальных источников энергии создание падающей характеристики цепи и регулирование мощности дуги необходимо производить на стороне переменного тока включением дросселей с регулируемым индуктивным сопротивлением или изменяемой индуктивностью трансформаторов, входящих в источник питания. Это позволяет повысить КПД системы источник питания – электрическая дуга и увеличить крутизну характеристики питающей цепи. Более крутые или вертикальные характеристики источников сварочного тока позволяют точнее поддерживать заданное значение тока дуги независимо от изменения условий горения дуги.

*Способы зажигания дуги.* В промышленных установках применяются следующие способы возбуждения дугового разряда: импульсное касание электродов; взрыв проводника малого сечения – проволочки; высокочастотный высоковольтный пробой дугового промежутка.

Зажигание дуги импульсным пробоем дугового промежутка, находящегося под напряжением источника питания дуги, производится с помощью осциллятора. Осциллятор – это преобразователь тока промышленной частоты низкого напряжения (60 – 220 В) в ток высокой частоты (150 – 500 кГц) высокого напряжения 2000 – 8000 В.

## ГЛАВА 6. ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ ПЕЧИ

### 6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

Электродуговые печи применяются в металлургической, химической, машиностроительной и ряде других отраслей промышленности. Они могут быть классифицированы следующим образом:

– *дуговые печи косвенного действия*, где электродуговой разряд горит между электродами, расположенными над нагреваемым материалом, и теплообмен между электрической дугой и материалом осуществляется в основном за счет излучения;

– *дуговые печи прямого действия*, в которых электрическая дуга горит между концами электродов и нагреваемым материалом. Нагрев материала осуществляется при выделении энергии в опорных пятнах дуги, протекании тока через расплав, а также за счет излучения плазмы дуги, конвекции и теплопроводности;

– *дуговые печи сопротивления*, в них дуга горит под слоем электропроводной шихты; теплота выделяется в дуговом разряде и преимущественно при прохождении тока через шихту в расплавленных материалах. Передача теплоты в объем печи осуществляется за счет теплопроводности, излучения и в меньшей мере конвекции.

Из числа дуговых печей можно выделить вакуумные дуговые печи. В них электрическая дуга горит в инертном газе или парах переплавляемого материала при низком давлении между расходуемым электродом, изготовленным из переплавляемого металла, и ванной жидкого металла, либо между нерасходуемым электродом и ванной жидкого металла.

Приведенную классификацию необходимо дополнить широко внедряемыми в настоящее время *плазменными печами* или *плазменно-дуговыми плавильными установками*. В этих установках нагрев металла осуществляется электрической дугой, совмещенной со струей плазмы инертного газа. Это позволяет исключить засорение переплавляемого металла материалом электрода, увеличить интенсивность передачи энергии на ванну печи.

*Дуговая печь косвенного действия* предназначена для переплава цветных металлов и их сплавов, а также для выплавки некоторых сортов чугуна и никеля. Ее основное преимущество – небольшой угар металла, так как электродуговой разряд не соприкасается непосредственно с переплавляемым материалом. Однофазная дуговая печь косвенного действия (рис. 6.1) представляет собой горизонтально расположенную ванну, футерованную

изнутри огнеупором 1. В противоположных боковых стенках ее установлены электроды 2, перемещаемые по мере обгорания механизмами подачи. Переплавляемый материал 3 загружают на дно ванны через отверстие в боковой поверхности корпуса 5. На электроды подается напряжение, затем они сводятся до соприкосновения и возникновения тока в цепи и затем разводятся, что приводит к возникновению электрической дуги 4. Вследствие поглощения выделяемой дугой энергии происходит нагрев и расплавление металла. После расплавления металла печь наклоняется механизмом наклона и из нее сливается расплав. Регулирование мощности печи производится с помощью источника питания за счет изменения тока дуги, а также ее длины при сближении и удалении электродов.

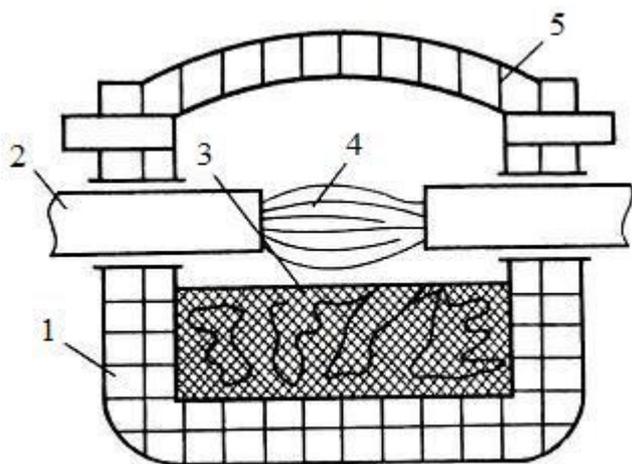


Рис. 6.1. Схема дуговой печи косвенного действия

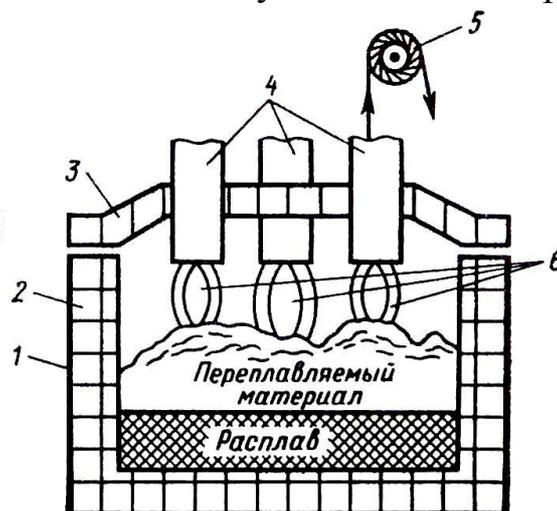


Рис. 6.2. Схема дуговой сталеплавильной печи

К электрооборудованию дуговых печей косвенного действия относятся печной трансформатор, регулировочный реактор и электропривод механизма подачи электродов.

Ток к электродам подводится по гибким кабелям от печной трансформаторной подстанции. Регулирование расстояния между электродами осуществляют с помощью электропривода, управляемого персоналом дистанционно, или автоматическим регулятором режима.

Дуговые печи косвенного действия производят емкостью 0,25 и 0,5 т. В них применяются графитизированные электроды. Они снабжены трансформаторами мощностью 175 – 250 и 250 – 400 кВ·А.

*Дуговые печи прямого действия.* Основное назначение дуговой печи прямого действия (рис. 6.2) – выплавка стали в слитки для последующего передела в прокатных цехах, а также для фасонного литья на машино-

строительных заводах; получение металлургического сырья, химических продуктов.

Дуговая сталеплавильная печь (ДСП) состоит из стального кожуха, имеющего цилиндрическую, расширяющуюся или ступенчатую форму 1. Внутри кожуха располагается огнеупорная футеровка 2. Поверх футерованного кожуха печи расположен свод печи 3, через который пропущены электроды 4. Для зажигания дуги электроды вначале опускаются до соприкосновения с расплавляемым материалом, а затем немного поднимаются до возбуждения дуги 6. В процессе плавки электроды перемещаются с помощью механизма подъема электродов 5.

Для выравнивания химического состава и температуры расплавляемого металла в печах большой емкости имеются электромагнитные устройства для перемешивания расплава.

## 6.2. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ДУГОВЫХ ПЕЧНЫХ УСТАНОВОК

Основное электрооборудование дуговых печных установок включает печь с электродами и ванной, в которой горят дуги и находится перерабатываемый материал, отдельный для каждой печи понизительный трансформатор, вместе с которым часто размещены дроссели, короткую сеть, соединяющую вторичные выводы трансформатора с электродами печи, коммутационную, измерительную и защитную аппаратуру.

Схема электрических соединений ДПС представлена на рис. 6.3.

Для поддержания наивыгоднейшего режима печи устанавливаются автоматические регуляторы мощности печи. Такие регуляторы воздействуют на механизм передвижения электродов, изменяют длину дуги и поддерживают заданное значение мощности дуговой печи. Для повышения точности регулирования в системы управления вводятся вычислительные машины.

*Печные трансформаторы* предназначены для питания электродуговых печей. Для печей небольшой и средней мощности трансформаторы выполняют трехфазными. Для печей большой мощности применяются группы однофазных трансформаторов, которые позволяют получить повышенный коэффициент мощности за счет более рациональной конструкции короткой сети и регулировать независимо мощности и напряжения каждой фазы.

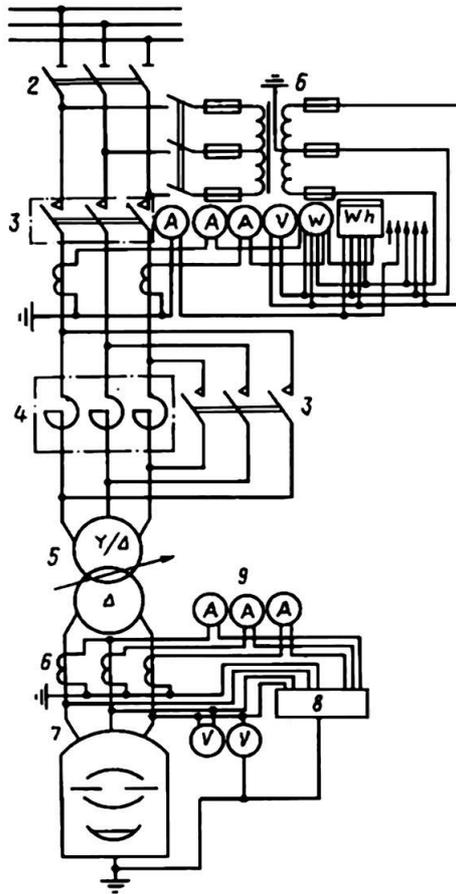


Рис. 6.3. Схема электрических соединений дуговой печной установки:

- 1 – высоковольтные шины; 2 – разъединитель;  
 3 – выключатели; 4 – реактор; 5 – печной трансформатор;  
 6 – измерительные трансформаторы;  
 7 – короткая сеть; 8 – автоматический регулятор  
 мощности; 9 – приборы контроля

*Дроссель*, или *реактор*, служит для ограничения бросков тока при эксплуатационных коротких замыканиях и стабилизации горения дуг за счет создания падающей характеристики цепи питания. У работающих непрерывно дуговых печей режим работы дросселя прерывистый, условия его работы тяжелые, поэтому он должен удовлетворять повышенным требованиям термической и механической прочности.

Дроссель включается между сетью и линейными зажимами обмотки высокого напряжения трансформатора или в «фазу» – последовательно с данной обмоткой. Чаще всего дроссель располагают в общем кожухе с печным трансформатором.

*Короткая сеть* дуговых печей служит для передачи электрической энергии от вторичной обмотки трансформатора в рабочее пространство печи. Несмотря на небольшую длину короткой сети, ее активное и осо-

бенно индуктивное сопротивление является одним из определяющих составных частей общего сопротивления участков печной установки.

Система автоматического управления (САУ) должна обеспечивать устойчивое горение дуги, поддерживать в заданных пределах непрерывно изменяющуюся длину дуги, режим ее горения. Поэтому в состав САУ входят следующие компоненты: управляемый источник тока, регулятор длины дугового промежутка (скорость перемещения электрода), регулятор тока соленоида.

В системах управления ВДП используются регуляторы типов АРД ВП-3, АРДВ-Р2, АРДВ-Р2М и БУДП-10-1, применяемые с электромашинными, параметрическими и тиристорными источниками питания.

В настоящее время разработан универсальный регулятор ЩЦД 970Х на базе управляющего микропроцессора. В состав регулятора дополнительно входят устройство визуального отображения информации, ручного ввода-вывода информации, тиристорные преобразователи для питания соленоида и электродвигателей перемещения электрода. В программируемом постоянном запоминающем устройстве микропроцессора хранится программа, реализующая алгоритм управления переплавом.

## ГЛАВА 7. ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

### 7.1. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Существующие способы получения плазмы можно классифицировать следующим образом: 1) взрыв проводника в электрической цепи; 2) электрическая искра; 3) высокочастотный факельный разряд; 4) коронирующий разряд; 5) дуговой разряд.

Для технологических целей наиболее приемлемыми оказались способы получения плазмы с помощью высокочастотного и дугового разрядов. В настоящее время последний способ имеет ряд преимуществ:

– возможность получения плазмы в течение длительного времени с высоким коэффициентом полезного действия из твердых, жидких и газообразных сред любого химического состава;

- возможность получения плазмы в вакууме и при высоких давлениях;
- возможность использования стандартных источников электрического питания.

Для получения плазмы в плазмотронах используют газы, т. е. плазмообразующую среду. Она может быть одно- и многокомпонентной. В качестве однокомпонентной плазмообразующей среды применяют аргон, гелий, азот и водород. Подбором состава многокомпонентной плазмообразующей среды в плазменно-технологическом реакторе можно получить любую атмосферу: окислительную, восстановительную или нейтральную.

При использовании сложных плазмообразующих смесей для обеспечения оптимальных параметров плазмы по энергетическим показателям, стабильности горения электрической дуги и устойчивости электродов подбирают соответствующие компоненты и их соотношения.

*Генератор низкотемпературной плазмы, или плазмотрон* – электротехнический аппарат, в котором происходит нагрев плазмообразующей среды электрическим разрядом. Основными компонентами дуговых плазмотронов являются: электроды; вмещающая их или совмещенная с электродом разрядная камера, формирующая поток плазмы; система впуска плазмообразующего газа; система управления дуговым разрядом. Различные варианты конструктивного выполнения эти компонентов и различные их комбинации обусловили большое количество принципиальных схем плазмотронов.

Для обеспечения длительного ресурса работы электродных систем дуговых плазмотронов применяют электроды из тугоплавких материалов (С, Мо, W, Zr, Hf) либо перемещают опорные пятна дуги для распределения теплового потока на большую площадь электрода, выполненного из меди и охлаждаемого водой. Поэтому тугоплавкие электроды изготавливают в виде стержней или цилиндров малых размеров, запрессованных или вваренных в медный электрододержатель. Легкоплавкие электроды из меди (стали) выполняются в виде цилиндров или торов, по внутренней (или боковой для тора) поверхности которых перемещается опорный конец электрической дуги.

В этом классе плазмотронов можно выделить два типа, отличающиеся друг от друга методами стабилизации электрической дуги: водоохлаждаемой стенкой и вихревым потоком газа или жидкости.

В плазмотроне (рис. 7.1) дуговой разряд горит между электродами (–) и (+), разделенными водоохлаждаемой стенкой, состоящей из ряда медных секций, разделенных изолятором. Из-за охлаждения около стенки

образуется слой холодного газа с относительно низкой электропроводностью, поэтому дуга занимает лишь часть сечения канала, чем достигается принудительное увеличение плотности тока в столбе дуги и значительный рост температуры плазмы.

Если длинный канал не имеет секций, то проходящий через него газ нагревается и теряет диэлектрическую прочность. При этом происходит пробой слоя нагретого газа между столбом дуги и водоохлаждаемой стенкой.

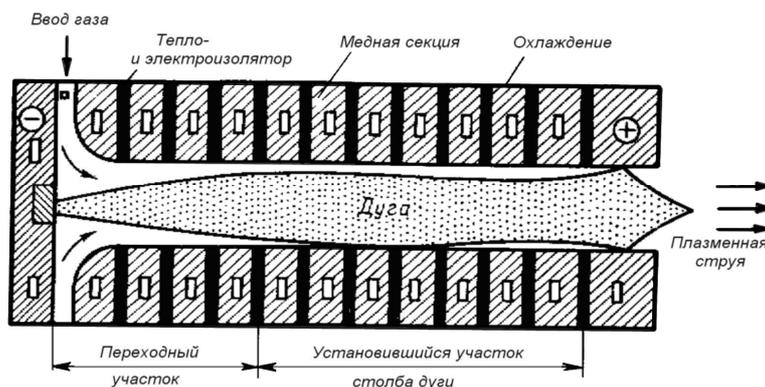


Рис. 7.1. Схема плазмотрона со стабилизирующей дугой стенкой

На рис. 7.2 показана принципиальная схема плазмотрона со стабилизацией дуги вихревым потоком газа. Газ, подаваемый через тангенциальные отверстия 6 в вихревую камеру 1, создает в канале плазмотрона вихревой поток, по оси которого между электродами 2 и 4 горит электрическая дуга 3. Вследствие интенсивных процессов теплообмена газ нагревается, и плазма в виде струи истекает из сопла через электрод 4. В вихревой камере и канале электрода 4 существует градиент плотности газа, поскольку основная часть его движется в пристеночной области. В результате этого столб дуги «выталкивается» на ось электрода. Более совершенным является плазмотрон с секционированным электродом и распределенной между секциями подачей плазмообразующего газа, что позволяет значительно поднять напряжение на дуге.

Кроме рассмотренных, в практике нашли применение плазмотроны, для питания которых одновременно используют постоянный и переменный токи, а также переменный ток промышленной и высокой частоты.

Мощность сопровождающей дуги в этом случае составляет 5-8 % от мощности силовой дуги.

Регулирование мощности в плазмотронах осуществляется изменением сопротивления в цепи питания (регулируемые дроссели), напряжением источника питания, мощностью дуги сопровождения.

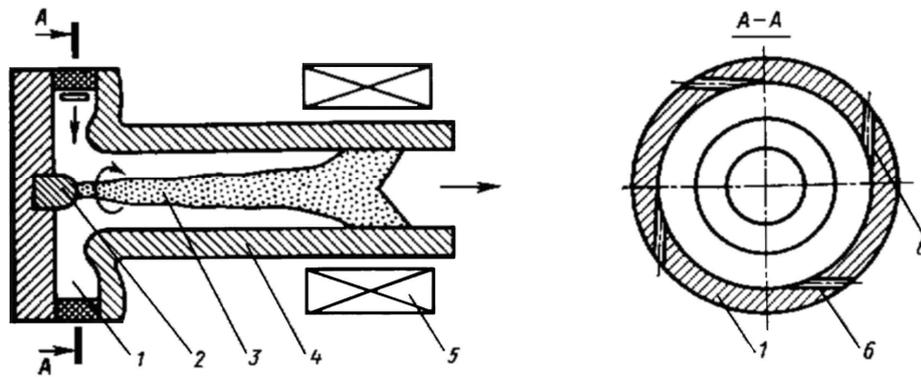


Рис. 7.2. Плазмотрон с газовихревой стабилизацией дуги:  
1 – вихревая камера; 2 – внутренний стержневой электрод;  
3 – столб дуги; 4 – выходной трубчатый электрод;  
5 – соленоид; 6 – тангенциальные каналы

Энергетические и вольтамперные характеристики плазмотронов зависят от многих взаимосвязанных параметров. Кроме того, они являются нелинейными, поэтому теоретическое их исследование затруднено, а порой и невозможно. Поэтому плазмотроны обычно разрабатываются по целевому назначению.

Высокочастотные плазмотроны (рис. 7.3) подразделяют на индукционные, емкостные, факельные, сверхвысокочастотные (СВЧ).

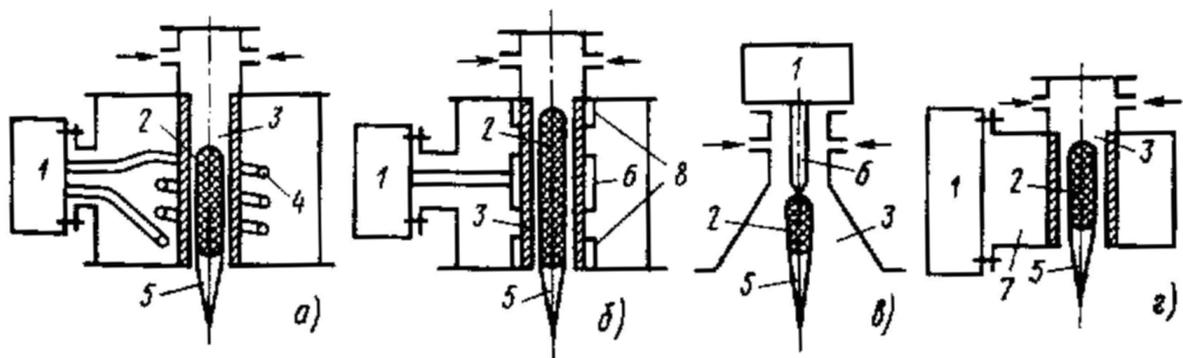


Рис. 7.3. Схемы высокочастотных плазмотронов

Высокочастотные плазмотроны включают в себя электромагнитную катушку-индуктор 4 или электроды 6, 8, подключенные к источнику высокочастотной энергии 1, разрядную камеру 3, узел ввода нагреваемого газа.

В *высокочастотном индукционном плазмотроне* (рис. 7.3, а) газ нагревается вихревыми токами, как при индукционном нагреве проводящей среды в переменном электромагнитном поле индуктора при частоте от 6,3 кГц до 20 МГц. В начале процесса для образования проводящей среды в зоне индуктора создается область высокотемпературного проводящего газа с помощью постороннего источника (например дуговой разряд). Этот процесс называют зажиганием. После зажигания в камере возникает самоподдерживающийся стационарный безэлектродный разряд 2. Глубина проникновения ( $\delta$ , см) вихревых токов в плазму определяется по формуле

$$\delta = \left( 1/2 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \right),$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление плазмы;  $f$  – частота, Гц;  $\mu$  – магнитная проницаемость, для плазмы  $\mu = 1$ .

Удельное сопротивление аргона, азота и водорода при 15000 К равно соответственно 0,01, 0,025 и 0,1 Ом·см.

Продувая газ через разрядную камеру, на выходе из нее получают струю плазмы 5 с температурой  $(7,5 \dots 15,0) \cdot 10^3$  К со скоростью 10 – 60 м/с.

*Высокочастотный емкостный плазмотрон* (рис. 7.3, б) имеет высоковольтный 6 и заземленный 8 электроды, между которыми возникает высокочастотное электрическое поле. Электроны, находящиеся в газе, получают энергию от высокочастотного электрического поля и при столкновениях обмениваются ею с нейтральными частицами, повышая тем самым температуру газа.

В *высокочастотном факельном плазмотроне* (рис. 7.3, в) при давлении, близком к атмосферному, факельный разряд имеет форму пламени свечи. Наиболее легко факельный разряд возникает на электродах с большой кривизной поверхности (на остриях и т. д.) при частотах электрического поля порядка 10 МГц и выше.

В *сверхвысокочастотном плазмотроне* (рис. 7.3, г) энергия от источника питания в зону разряда подается по волноводу 7.

## 7.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОТРОНОВ И ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

К энергетическим характеристикам плазмотрона относятся зависимости параметров дуги от условий работы – рода плазмообразующего газа, давления, геометрических размеров электродов, напряженности управляющего магнитного поля, материала электродов, их температуры и эмиссионной способности, скорости разрушения, (одновременный учет всех этих факторов в настоящее время не представляется возможным), поэтому для расчета ВАХ разряда и определения некоторых размеров электродов пользуются эмпирическими формулами, получаемыми в результате критериального обобщения многочисленных экспериментальных данных.

Для однокамерного плазмотрона постоянного тока с вихревой стабилизацией дуги воздухом в цилиндрическом полем аноде уравнение ВАХ имеет вид

$$U^* = 1290 \cdot \left[ \frac{I^2}{Gd} \right]^{-0,15} \left( \frac{G}{d} \right)^{0,3} (pd)^{0,25}.$$

При работе на водороде оно имеет вид:

$$U^* = 9650 \cdot \left[ \frac{I^2}{Gd} \right]^{-0,2} \left( \frac{G}{d} \right)^{0,5} (pd)^{0,36}.$$

где  $I$  – ток дуги;  $G$  – расход плазмообразующего газа;  $d$  – внутренний диаметр выходного электрода;  $p$  – давление в разрядной камере. Для определения КПД плазмотронов этих же схем получены следующие зависимости:

– для работы на воздухе

$$\eta = \left[ \frac{1-\eta}{\eta} \right] = 0,585 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{I^2}{Gd} \right]^{0,27} \cdot \left( \frac{G}{d} \right)^{-0,27} \cdot (pd)^{0,3} \cdot (l)^{0,50};$$

– для работы на водороде:

$$\eta = 6,54 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{I^2}{Gd} \right]^{0,2} \cdot \left( \frac{G}{d} \right)^{-0,2} \cdot (pd)^{0,98} \cdot (l)^{1,38},$$

где  $l$  – характерная длина электрода.

Мощность плазмотронов определяется соотношением тока дуги и напряжением, которое, в свою очередь, определяется длиной дуги  $l$  и напряженностью электрического поля  $E$ :

$$P = IU = IEI$$

Выбор схемы источников питания плазмотронов основан на анализе устойчивости дуги, находящейся в интенсивном потоке газа при наличии внешних магнитных полей. Из теории «малого возмущения» условие устойчивости дуги имеет вид

$$\frac{dU_{\text{ист}}}{dI} < \frac{dU_{\text{д}}}{dI}, \quad (7.1)$$

где  $U_{\text{ист}}$  – статическое напряжение источника питания;  $U_{\text{д}}$  – статическое напряжение дуги.

Для устойчивой работы плазмотрона с падающей ВАХ необходимо иметь крутопадающую внешнюю характеристику источника питания. Это требование усиливается необходимостью строгого поддержания заданной мощности в технологическом процессе, что также требует жесткой стабилизации тока.

Поэтому для питания плазмотронов используют следующие типы источников питания с крутопадающей внешней характеристикой: 1) источники на базе управляемого выпрямителя с автоматической стабилизацией тока; 2) установки с дросселями насыщения и магнитоуправляемыми трансформаторами; 3) параметрические источники тока, работающие на принципе резонанса напряжения в трехфазных электрических цепях.

Источник первого типа изготавливают индивидуально к каждой плазменной технологической установке, содержащей мощные высоковольтные плазмотроны; они включаются в общую схему автоматического управления технологическим процессом.

Источники второго и третьего типов стандартные и применяются для питания низковольтных плазмотронов, используемых в технологических процессах плазменного напыления, наплавки, резки, сварки, переплава металла и другие. Нелинейный характер ВАХ дуги приводит к возникновению высокочастотных колебаний, которые могут проникать в питающую сеть и отрицательно влиять на работу других потребителей. Поэтому для создания источников питания первого типа применяется схема со сглаживающим дросселем в цепи дуги (рис. 7.4). Сглаживающий дроссель в цепи дуги в значительной степени сужает частотный спектр возму-

щений, влияющих на электрическую систему в целом. Для этой системы характерными являются следующие параметры:

- постоянная времени автоматического стабилизатора тока  $\tau_{\text{рег}} \leq 3 \cdot 10^{-3}$  с;
- постоянная времени цепи дуга-нагрузка  $\tau_{\text{нагр}} = 25 \cdot 10^{-3}$  с;
- запас напряжения источника  $\alpha = U_{\text{д ном}}/U_0 = 1,1$ ;
- статическое отклонение тока от номинального не более 3 %;
- длительность отклонения не более 15 мс.

Зажигание дуги в плазмотронах производится путем пробоя межэлектродного промежутка осциллятором.

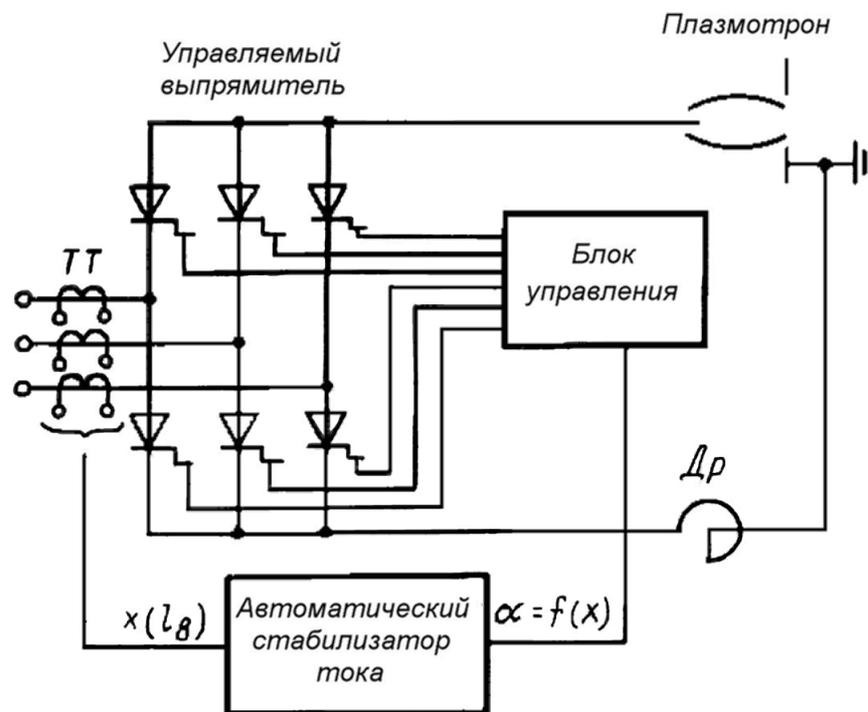


Рис. 7.4. Схема источника с автоматической стабилизацией тока

### 7.3. ПЛАЗМЕННЫЕ ПЛАВИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Существует несколько типов установок для обработки и получения металлов с помощью плазмотронов.

Наиболее перспективны те из них, в которых применяются плазмотроны прямого действия (анодом является ванна расплавленного металла). На этой схеме основаны плазменно-дуговые печи (ПДП) для выплавки и переплавки высококачественных металлов.

В отличие от вакуумной индукционной, дуговой и электронной плавки, при плавке в ПДП наблюдается меньшее испарение ценных компонентов расплава, а применение плазмотронов позволяет получить высокие, легко регулируемые температуры и решить проблему стабильности и регулирования параметров процесса.

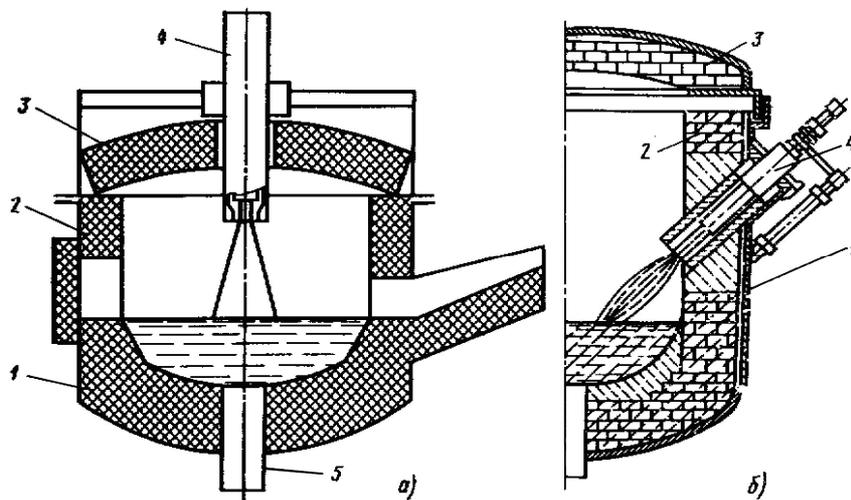


Рис. 7.5. Схема плазменной печи с керамическим тиглем:

а – с одним плазмотроном в своде; б – с плазмотронами, установленными в стенках;  
1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – свод; 4 – плазмотрон; 5 – подовый электрод

Плазменные и дуговые печи могут быть двух типов: плавильная печь с огнеупорной футеровкой и печь для переплава с водоохлаждаемым кристаллизатором (глухим или с вытягиванием слитка).

При выплавке металла в ПДП с огнеупорной футеровкой (рис. 7.5) форма печи и материал огнеупорной футеровки идентичны форме и материалу обычной дуговой печи. Водоохлаждаемый медный анод – подовый электрод 5 монтируется заподлицо с подиной и контактирует с переплавляемым металлом.

Камера печи, из которой откачан воздух, заполняется вытекающим из плазмотрона 4 газом, и после достижения определенного давления начинается процесс плавки.

Для повышения экономичности плазменных печей разрабатываются плазмотроны с полыми катодами и схемы установок с комбинированным питанием постоянным и переменным током.

#### 7.4. УСТАНОВКИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ И СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

Плазменная резка осуществляется путем выплавления и испарения металла в полости реза за счет энергии, выделяющейся в опорном пятне дуги и вносимой струей плазмы. Режущая способность дуговой плазмы определяется соотношением

$$v\delta = 0,24 \frac{IU\eta}{\gamma bS}, \quad (7.2)$$

где  $v$  – скорость резки;  $\delta$  – толщина металла;  $I, U$  – ток и напряжение дуги;  $\eta$  – тепловой КПД;  $\gamma$  – плотность;  $b$  – ширина реза;  $S$  – энтальпия расплавленного металла.

Энергетический баланс резки складывается из энергии дуги, химических реакций плазмы с металлом (если они возможны) и расхода энергии на расплавление, перегрев, испарение металла в полости реза, теплопередачу в твердый металл и унос с отработавшим потоком плазмы.

Отсюда следует, что процесс плазменной резки необходимо вести с максимальной мощностью и максимальной скоростью, обеспечиваемой вспомогательными операциями и применением ЭВМ. Это условие выполняется при выборе тока, напряжения, плазмообразующего газа и конструкции режущего плазмотрона.

Ширина реза, определяющая экономичность процесса, связана с диаметром сопла плазмотрона, током дуги и скоростью перемещения плазмотрона.

Чрезмерное увеличение мощности и снижение скорости движения плазмотрона приводит к увеличению ширины реза, особенно в нижней его части, и перегреву всего разрезаемого металла. Коэффициент полезного действия плазменной резки возрастает с повышением мощности дуги и скорости движения плазмотрона, достигая 80 – 90 %, тепловой КПД принимают равным 40 %.

Режущий плазмотрон (рис. 7.6) с газовой стабилизацией дуги имеет стержневой вольфрамовый (или циркониевый) электрод 3, соосно расположенный в полости сопла 2. Стабилизирующий газ подается между ними и обеспечивает проникновение плазмы в глубину металла. При включении установки существует такая последовательность операций: включается подача воды, охлаждающей сопло и электрод, устанавливается необходимый расход газа; поджигается дежурная дуга, ток которой ограничивается сопротивлением 6, и возникает факел плазмы. При касании дежурным факелом кромки металла возникает цепь силовой плазменной дуги и начина-

ется интенсивный процесс резки. При случайных погасаниях режущей дуги дежурная дуга восстанавливает процесс. При резке металла малых толщин применяется плазменная струя без включения металла в цепь тока (рис. 7.6, б).

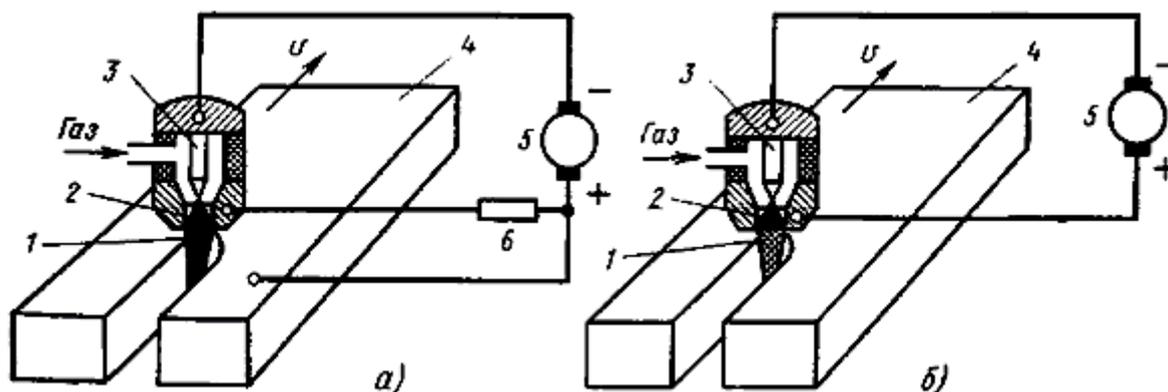


Рис. 7.6. Схема резки металла плазменной дугой (а) и плазменной струей (б):  
1 – струя плазмы; 2 – дуга; 3 – катод; 4 –резаемый материал;  
5 – источник питания; 6 – сопротивление, ограничивающее ток дежурной дуги

Промышленные установки разных типов работают на токах до 1000 А при напряжении холостого хода до 350 В, обеспечивая скорость резки от 3 – 4 до 10 м/мин.

Плазмотроны, выполняемые по схеме (рис. 7.6, а), являющейся основной при плазменной резке, рассчитывают на рабочий ток, а напряжение дуги формируется в полости реза. Вследствие этого вольт-амперные характеристики дуги здесь падающие, а источники питания имеют вертикальные или крутопадающие внешние ВАХ.

Высокая мощность плазмотрона и динамическое воздействие плазмы позволяют сваривать металлы разных толщин без подачи присадочной проволоки в сварочный шов, заваривать отогнутые кромки состыкованных деталей, сваривать детали без разделки кромок, осуществлять сварку металла большой толщины за один проход.

В зависимости от рода свариваемого металла применяют аргон, смеси аргона с гелием или водородом.

В состав установки входит источник питания, представляющий собой трехфазный двухполупериодный выпрямитель с регулируемым значением сварочного тока и крутопадающей ВАХ; высокочастотный генератор-осциллятор, служащий для возбуждения дежурной дуги между внутренним соплом и электродом в потоке аргона. Ток дежурной дуги ограничивается сопротивлением  $R$ , а емкость  $C$  служит для облегчения пробоя

напряжением высокой частоты межэлектродного промежутка. Для начала процесса сварки необходимо коснуться свариваемого изделия светящейся частью струи плазмы. Тогда по цепи потечет сварочный ток, разогревающий металл в точке воздействия плазмы и образующий сварочную ванну.

Источники питания обеспечивают сварочный ток до 450 – 600 А при напряжении дуги 60 – 80 В и скорость сварки, например, алюминиевого сплава толщиной 4 мм при токе 250 А и расходе плазмообразующего газа 5 л/мин, равную 70 м/ч.

## 7.5. УСТАНОВКИ ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

При напылении плазмой частицы наносимого материала расплавляются и разгоняются до высоких скоростей, а деталь, на которую наносится покрытие, – подложка – разогревается до высоких температур. При доведении подложки до состояния плавления процесс напыления переходит в наплавку.

Наносимый на подложку материал может представлять собой электропроводную проволоку или стержни, а также неэлектропроводный в холодном состоянии порошок.

При использовании проволоки или прутков процесс образования двухфазного напыляющего потока (плазма + наносимый материал в жидком состоянии) проходит по схемам, показанным на рис. 7.7.

На пути к подложке мелкие капли расплавленного материала несколько остывают, но предварительный перегрев позволяет донести их до подложки в жидком состоянии.

Напыление неэлектропроводных материалов производится путем ввода порошков в разрядный канал плазмотрона двумя способами: в дугу и в участок плазменной струи за дугой (рис. 7.8).

Различие в способах введения порошка определяется его теплофизическими свойствами. Тугоплавкие порошки вводятся в зону дуги, легко расплавляемые – в струю плазмы.

Совмещенные схемы плазменного напыления и наплавки позволяют получить прочно сплавленный с подложкой слой наплавленного материала. Размеры его можно регулировать в широких пределах (по ширине – от 8 до 45 мм, по глубине – от 0,5 до 6 мм), изменяя количество подаваемого присадочного материала и амплитуду движения плазмотрона перпендикулярно направлению его основного движения.

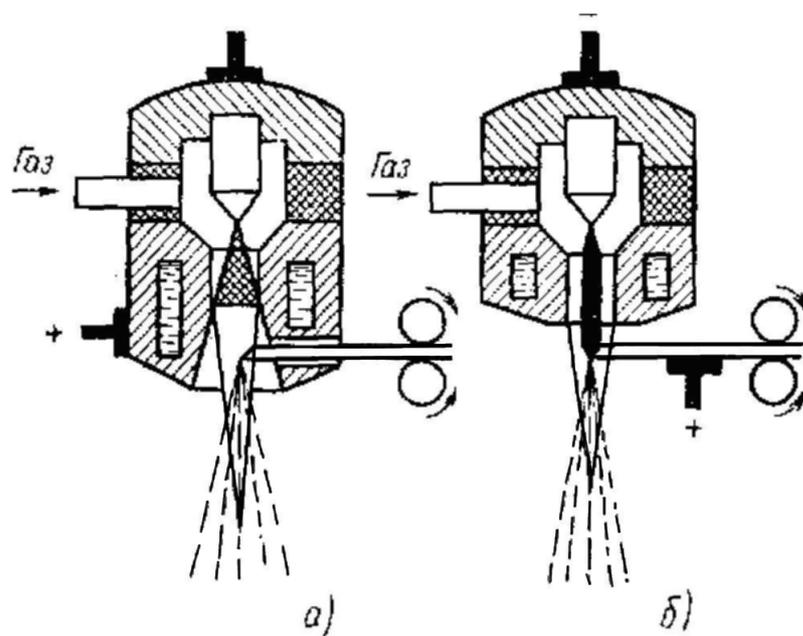


Рис. 7.7. Схемы распыления нейтральной (а) и токоведущей (б) проволоки дуговой плазмой

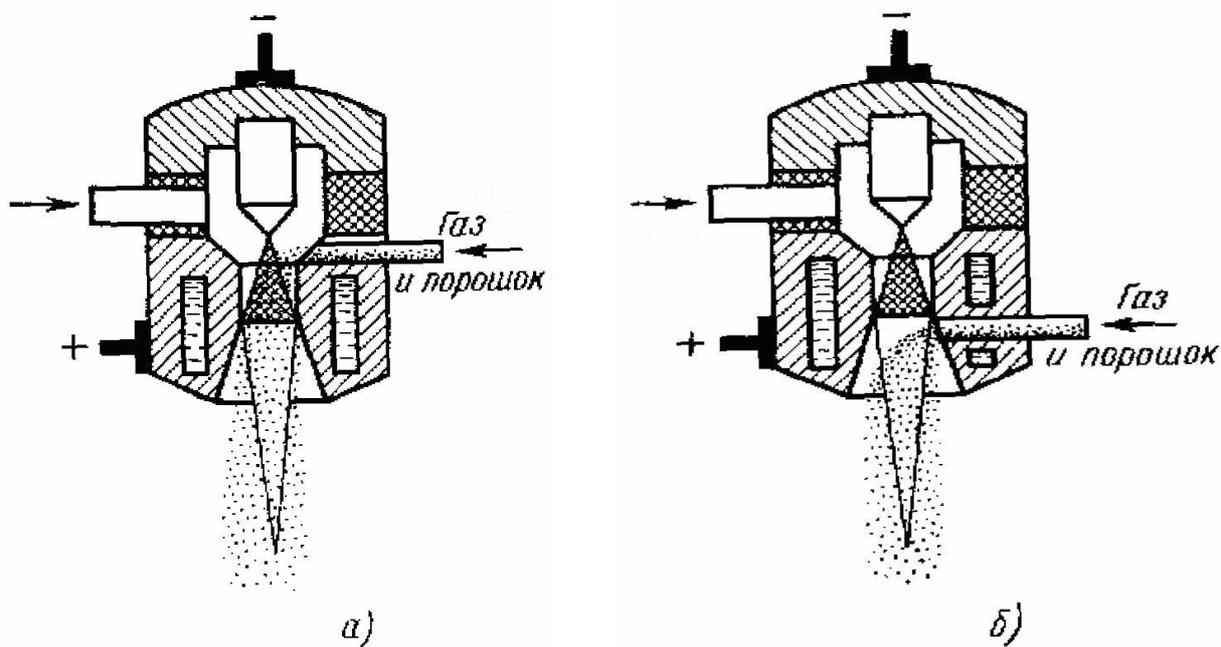


Рис. 7.8. Схема ввода напыляемого порошка в столб плазменной дуги (а) и плазменную струю (б)

## ГЛАВА 8. УСТАНОВКИ ДУГОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ

### 8.1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДУГОВОЙ СВАРКИ

*Электрической дуговой сваркой* называют процесс получения неразъемных соединений деталей из различных материалов за счет их сплавления с помощью электрической дуги. Это один из ведущих технологических процессов в машиностроении и строительной индустрии.

При дуговой сварке тепловая энергия, необходимая для плавления металла, получается в результате дугового разряда, возникающего между свариваемым металлом и электродом. Расплавляясь под действием опорных пятен дуги, кромки свариваемых деталей и торец плавящегося электрода образуют сварочную ванну, которая некоторое время находится в расплавленном состоянии. При затвердевании металла образуется сварное соединение. Сварка плавлением представляет собой комплекс металлургических и физико-химических процессов, протекающих в металле при высоких температурах и значительной концентрации тепловой энергии.

Вместе с металлом плавится электродное покрытие при ручной сварке или флюс при дуговой сварке под флюсом.

Расплавленный металл электрода переходит в сварочную ванну в виде капель. Размер капель и их количество зависят от силы тока, химического состава электрода и покрытия (флюса), электромагнитных явлений в дуге и т. п. При совместном переходе капель расплавленного электродного металла и шлака через дуговой промежуток между металлом, шлаком и газами, окружающими дугу, протекают химические реакции. В процессе сварки сварочная ванна перемещается вдоль шва с определенной скоростью, равной скорости сварки.

Шлак, окружающий капли металла при переходе их через дуговой промежуток, и шлаковый покров на сварочной ванне улучшают свойства наплавленного металла. Присутствующие в шлаке легко ионизирующиеся элементы повышают устойчивость горения дуги, что особенно важно при сварке на переменном токе.

Входящие в состава покрытия газообразующие элементы (крахмал, декстрин, целлюлоза, древесная мука, мел, мрамор, соединения, богатые кислородом, например  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ , плавиковый шпат) при попадании в дугу разлагаются, образуя газ, защищающий сварочную ванну от воздействия воздуха.

При сварке в газовой среде защитное действие обеспечивается применением аргона, аргон-гелия, азота, углекислого газа, паров воды.

Капельный перенос обеспечивает поступление в сварочную ванну до 80 – 95 % всего металла плавящегося электрода. Остальные 5 – 20 % теряют в виде брызг и пара. Механизм переноса капли металла включает в себя следующие стадии: оплавление торца электрода, отекание металла, образование капли грушевидной формы. У основания капли образуется тонкая шейка, имеющая высокое электрическое сопротивление. В области шейки плотность тока резко возрастает, перегревая шейку и удлиняя каплю, которая, касаясь (или не касаясь) сварочной ванны, обрывается, на мгновение замыкая накоротко цепь тока. Одновременно шейка взрывается с образованием большого количества паров и газов, отбрасывающих каплю в направлении сварочной ванны. Затем процесс повторяется. При ручной сварке электрод длиной 450 мм расплавляется за 1,5 – 2 мин. Давлением дуги  $p = kI^2$ , где  $k$  – эмпирический коэффициент, жидкий металл выдавливается со дна кратера дуги на боковую поверхность, создавая определенную глубину сварочной ванны. Количество расплавляемого за единицу времени металла

$$G = \alpha_{\text{п}} I \cdot \tau,$$

где  $\alpha_{\text{п}}$  – коэффициент плавления, г/ч;  $I$  – ток дуги, А;  $\tau$  – время горения дуги, ч.

Вследствие потерь расплавленного металла количество фактически наплавленного металла оценивается коэффициентом наплавки  $\alpha_{\text{н}}$ , который на 5 – 20 % меньше коэффициента плавления.

Значение  $\alpha_{\text{н}}$  для электродов с различными покрытиями составляет 7 – 13 г/(А·ч). Знание коэффициента наплавки важно при нормировании сварочных работ. Скорость сварки (см/ч)

$$v = \frac{\alpha_{\text{н}} I}{\gamma \cdot F},$$

где  $\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент наплавки г/(А·ч);  $\gamma$  – удельная масса наплавленного металла ( $\gamma_{\text{стали}} = 7,85$  г/см<sup>3</sup>);  $F$  – площадь поперечного сечения сварочного шва, см<sup>2</sup>.

Длина дугового промежутка при сварке должна быть больше длины капли, отрывающейся от электрода, и на практике составляет 4 – 7 мм.

По сравнению с плазмой сварочной дуги при температуре  $(4,5 - 8) \cdot 10^3$  К капля металла является холодной, однако вследствие высокой концентрации электронов имеет более высокую электропроводность и шунтирует часть столба электрической дуги. Это определяет низкое зна-

чение линейного градиента потенциала столба дуги. Вследствие малой протяженности столба дуги (4 – 7 мм) и низкого значения линейного градиента потенциала между приэлектродными пятнами дуги реализуется напряжение 8 – 12 В. Если учесть, что в структуру напряжения дуги входят компоненты анодного и катодного падения напряжения, значения которых зависят от тока дуги, материала электродов и изменяются в узких пределах ( $U_a = 2 \dots 12$  В,  $U_k = 8 \dots 14$  В), то напряжение на сварочной дуге составляет 18 – 45 В. При некотором увеличении тока напряжение, необходимое для горения дуги, снижается и ВАХ дуги приобретает падающий характер.

В области больших токов ВАХ становится жесткой и слабовозрастающей. Так как интенсивность плавления электрода и свариваемого металла определяется преимущественно мощностью, выделяющейся в опорных пятнах дуги на электродах, а столб дуги выполняет в основном технологические, а не энергетические функции, то главным энергетическим показателем установок дуговой сварки является значение сварочного тока, а напряжение холостого хода источника питания является производным от напряжения на дуге, обеспечивающим ее устойчивое горение. Для падающего и жесткого участков ВАХ дуги напряжение холостого хода источника питания должно быть  $U_x = (1,4 \dots 2,2)U_d$  при крутопадающей внешней характеристике. Это дает напряжение 55 – 80 В, что и обеспечивается источниками сварочного тока.

Отметим, что напряжение зажигания при переходе тока через нуль зависит от ряда факторов, в первую очередь от силы тока. С увеличением тока напряжение зажигания дуги снижается. Зависимость между напряжением зажигания и напряжением горения дуги для сварки открытой дугой имеет вид  $U_z = (1,3 \dots 2,5) U_d$ . При сварке на больших токах под флюсом напряжения зажигания дуги почти равно напряжению горения.

По степени механизации различают сварку ручную, полуавтоматическую и автоматическую. Отнесение процесса к тому или иному виду зависит от того, каким образом выполняются: зажигание и поддержание определенной длины дуги, манипуляции электродом для придания шву нужной формы, перемещение электрода по линии наложения шва и прекращение процесса сварки.

При *ручной сварке* операции, необходимые для образования шва, выполняются рабочим-сварщиком вручную. Ручная сварка производится плавящимся электродом с покрытием (рис. 8.1) или неплавящимся электродом с газовой защитой.

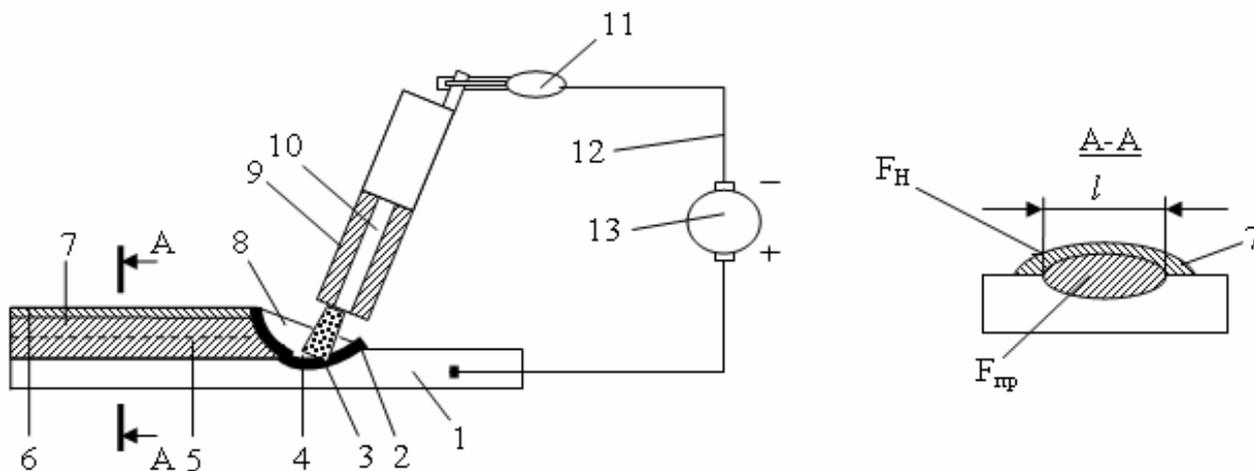


Рис. 8.1. Схема ручной дуговой сварки: 1 – основной металл; 2 – сварочная ванна; 3 – кратер; 4 – сварочная дуга; 5 – проплавленный металл  $F_{пр}$ ; 6 – наплавленный металл  $F_H$ ; 7 – шлаковая корка; 8 – жидкий шлак; 9 – покрытие электрода; 10 – стержень электрода; 11 – электродержатель; 12 – сварочная цепь; 13 – источник питания

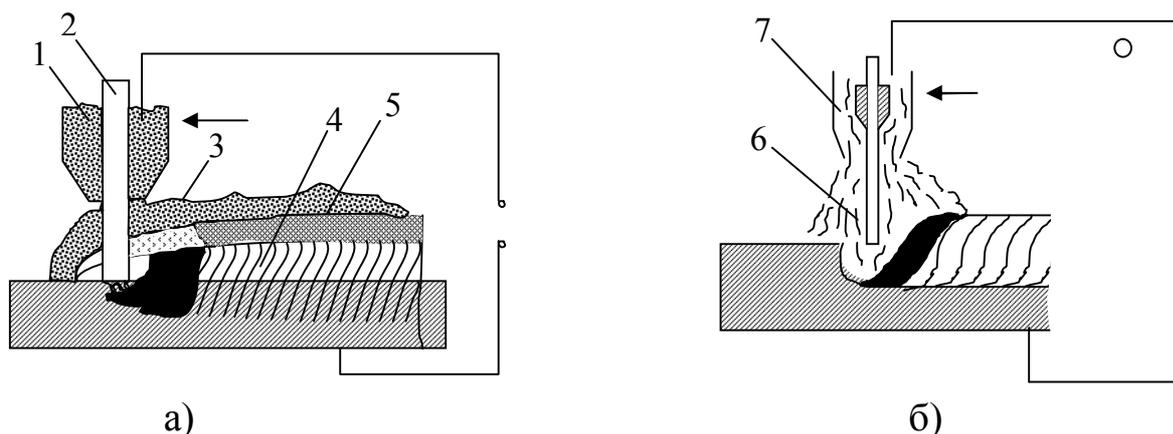


Рис. 8.2. Схема сварки под флюсом (а) и в среде защитных газов (б)

При *полуавтоматической сварке* плавящимся электродом механизирована часть операций, например операция по подаче электродной проволоки или флюса в сварочную зону, перемещение горелки по свариваемой детали и др. Остальные операции процесса сварки осуществляются сварщиком вручную.

При *автоматической сварке под флюсом* (рис. 8.2, а) автоматизировано большинство технологических операций. Сварочная проволока 2 и гранулированный флюс 1 подаются в зону дуги, горящей в полости 3, заполненной парами металла и материалов флюса. По мере перемещения дуги расплавленный флюс всплывает на поверхность сварочной ванны, образуя легко отделяющуюся от шва шлаковую корку 5, а металл свароч-

ной ванны кристаллизуется в виде сварного шва 4. Шлак защищает металл от воздействия кислорода и азота воздуха, легирует и замедляет охлаждение металла шва, что способствует получению качественного наплавленного металла при высокой производительности.

При сварке в защитном газе (рис. 8.2, б) возникающая между электродом и основным металлом (или двумя электродами) дуга окружена газом 6, подаваемым под небольшим давлением из сопла 7. Газовая защита применяется при сварке плавящимися и неплавящимися электродами. Роль газа сводится в основном к физической защите сварочной ванны от воздействия воздуха.

Рассмотрим наиболее распространенные способы сварки.

*Сварка в камерах с контролируемой атмосферой* применяется для соединения легкоокисляющихся металлов и их сплавов. В камере можно создать атмосферу из инертных газов, что обеспечит высокое качество сварного соединения.

*Сварка трехфазной дугой* применяется при ручном и механизированном способах сварки. Сущность этого способа состоит в том, что к двум электродам, закрепленным в специальном устройстве, и к свариваемому изделию подводится переменный ток от трехфазного источника питания. После возбуждения горит не одна дуга, как обычно, а одновременно три дуги: между каждым из электродов и изделием и между обоими электродами. Эта дуга по отношению к свариваемому изделию является независимой и обеспечивает расплавление электродов.

Сварка трехфазной дугой характеризуется высокой стабильностью процесса, т. к. дуговой промежуток всегда поддерживается в ионизированном состоянии.

При *сварке неплавящимся электродом* дуга горит между вольфрамовым электродом и изделием. Электрод проходит через насадок, по которому в зону сварки подается аргон. Поэтому такая сварка называется аргоновой. Диаметр вольфрамового электрода составляет 1 – 4 мм. Аргоновая сварка металлов толщиной 3 мм и больше успешно выполняется плавящимся электродом на автоматах и полуавтоматах.

## 8.2. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

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 плавящегося электрода не согласуется со скоростью его плавления. Кроме того, вследствие нелинейности ВАХ дуги, имеющей падающий, жесткий и восходящий участки, ВАХ источника питания должна иметь соответствующий вид.

При ручной и автоматической сварках под слоем флюса с автоматическим регулированием напряжения на дуге, когда ВАХ дуги слабопадающая или жесткая (рис. 8.3, а, кривая 1), внешняя ВАХ источника питания должна быть крутопадающей (рис. 8.3, а, кривая 2). Чем больше крутизна падения ВАХ источника питания (ИП) 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  $1,25 < \frac{I_K}{I_D} < 2$ .

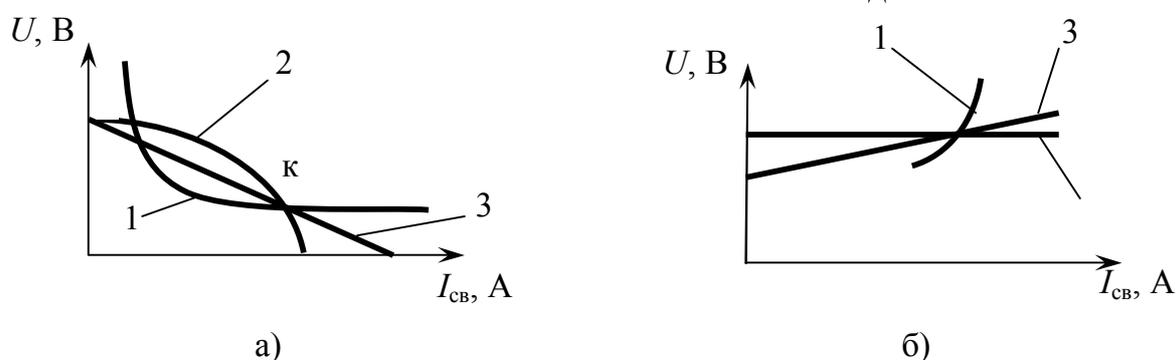


Рис. 8.3. Падающие (2 и 3) внешние характеристики источника питания при жесткой (1) статической характеристике дуги (а); жесткая (2) и возрастающая (3) внешние характеристики источника питания при возрастающей (1) статической характеристике дуги (б)

При автоматической сварке под флюсом с саморегулированием дуги, имеющей жесткую характеристику, ВАХ ИП должна быть пологопадающей (рис. 8.3, 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. 8.3. б, кривая 1). В этом случае внешняя характеристика ИП для еще большей интенсивности саморегулирования должна быть жесткой или возрастающей

(рис. 8.3, б, кривые 2, 3). Источники питания должны обеспечивать возможность настройки различных режимов сварки – установление заданных значений тока и напряжения, обеспечивающего этот ток.

Наиболее распространенным способом настройки режима сварки является *комбинированное регулирование*. Оно заключается в том, что весь диапазон регулирования по току разбивают на ряд ступеней (грубое регулирование), а в пределах каждой ступени осуществляют плавное регулирование.

В зависимости от особенностей технологического процесса сварочные работы выполняются на постоянном либо переменном токе. Основными технологическими показателями источников питания сварочной дуги являются, кроме внешней характеристики и напряжения холостого хода, относительная продолжительность работы (ПР) и относительная продолжительность включения (ПВ) в прерывистом режиме.

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

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

а) иметь напряжение холостого хода в момент зажигания дуги, достаточное для ее возбуждения, но не превышающее пределов, безопасных для жизни сварщика;

б) надежно работать в режимах частых технологических коротких замыканий;

в) иметь внешнюю характеристику, соответствующую ВАХ дуги, и иметь достаточную мощность;

г) снабжаться специальными устройствами для плавного изменения тока;

д) соответствовать требованиям удобства эксплуатации и экономичности.

Тепловой режим источника питания оценивается относительными ПР и ПВ, обусловленными прерывистым рабочим процессом сварки. Продолжительность работы определяют как отношение продолжительности рабочего периода источника питания к длительности полного цикла работы. Она выражается в процентах:

$$PP = \left( \frac{\tau_p}{\tau_{\text{ц}}} \right) \cdot 100 \%,$$

где  $\tau_p$  – 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 источник питания во время паузы не отключается от сети, а работает в режиме холостого хода, во втором случае источник питания полностью отключается от сети.

Источники питания сварочной дуги переменного тока – это сварочные трансформаторы, которые подразделяют на одно- и трехфазные, а по количеству питаемых сварочных постов – на одно- и многопостовые.

По способу получения падающих внешних характеристик и регулирования тока различают источники питания двух типов: трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием, выполненные в виде двух отдельных аппаратов (трансформатор и дроссель), и трансформаторы с развитым магнитным рассеянием (с подвижными катушками, с магнитными шунтами, с витковым ступенчатым регулятором).

*Трансформаторы с отдельным дроссельным регулятором* (рис. 8.4), сопротивление которого может изменяться в широких пределах, состоит из сердечника А с двумя обмотками: первичной I и вторичной II, создающей напряжение холостого хода 60 – 65 В. Первичную обмотку подключают к сети переменного тока напряжением 220 или 380 В.

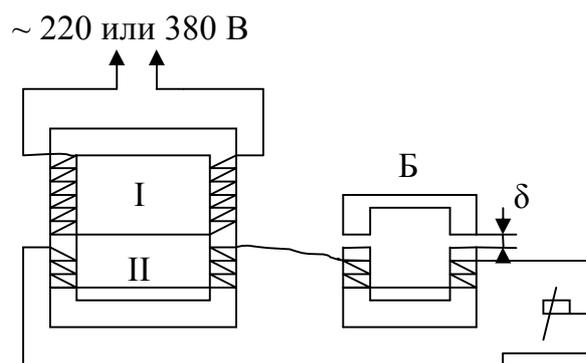


Рис. 8.4. Схема сварочного аппарата с отдельным регулятором

Регулятор тока (дроссель Б) состоит из магнитопровода (ярма) и обмотки, расположенной на неподвижной части магнитопровода (якоре). Между ярмом и якорем имеется воздушный зазор  $\delta$ , в результате изменения которого с помощью регулирующего винта осуществляется плавное регулирование сварочного тока.

При увеличении зазора  $\delta$  между подвижной и неподвижной частями сердечника электрическое сопротивление (индуктивное) дросселя уменьшается, в результате чего увеличивается ток в сварочной цепи. При уменьшении зазора  $\delta$  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.

Сварочный трансформатор типа СТН с встроенным регулятором (рис. 8.5) отличается от предыдущего тем, что на общем магнитопроводе находятся три обмотки: первичная I и вторичная II обмотки трансформатора и обмотка регулятора  $\Pi_k$ , включенная последовательно со вторичной обмоткой.

Регулирование сварочного тока осуществляется изменением воздушного зазора  $\delta$  между магнитопроводом и якорем С.

Преимуществом этой системы является компактность, меньший расход меди и трансформаторной стали; при регулировании тока с большого значения на минимальное напряжение холостого хода увеличивается, что повышает устойчивость горения дуги.

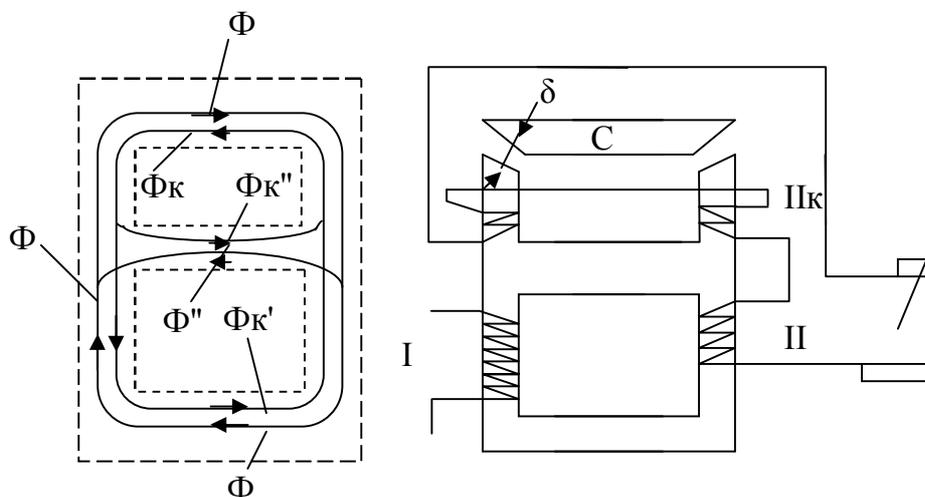


Рис. 8.5. Электромагнитная схема трансформатора СТН со встроенным регулятором

*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 транс-

форматора. Чем больше сопротивление шунтирующей цепи, тем меньше индуктивность рассеяния трансформатора и больше сварочный ток.

У трансформаторов с подмагничиваемым шунтом ТДФ вторичная обмотка состоит из двух частей (рис. 8.6, а). Основная часть 2 находится у нижнего ярма 1 сердечника, 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 с подвижными обмотками (рис. 8.6, б) типа ТД, ТСК, ТС, СТР 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.

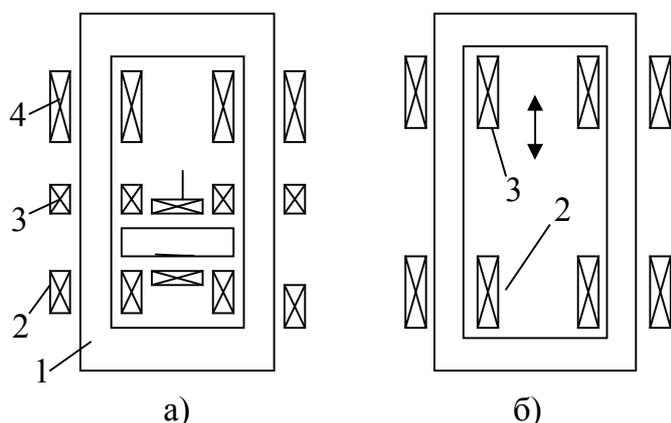


Рис. 8.6. Схемы сварочных трансформаторов

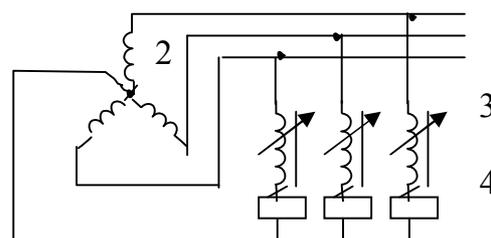


Рис. 8.7. Схема многопостовой сварки на переменном токе

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

$$n = \frac{I_{\text{ТР}}}{I_{\text{П}} \kappa},$$

где  $I_{\text{ТР}}$  – номинальный ток сварочного трансформатора, А;  $I_{\text{П}}$  – сварочный ток поста, А;  $\kappa$  – коэффициент загрузки (0,6 – 0,8).

Многопостовая сварка осуществляется от однофазного или трехфазного трансформатора. Электрическая схема многопостовой сварки на переменном токе показана на рис. 8.7. 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.

*Источники питания постоянного тока* подразделяют на две основные группы: сварочные преобразователи и сварочные выпрямители.

*Сварочный преобразователь* состоит из собственно генератора постоянного тока и первичного двигателя (электродвигателя или двигателя внутреннего сгорания).

Однопостовые сварочные генераторы в зависимости от схемы формирования падающей внешней характеристики подразделяются на три основные группы:

– генераторы с ращепленными полюсами и с поперечным полем, у которых падающая внешняя характеристика достигается за счет размагничивания основного поля генератора магнитным полем реакции якоря;

– генераторы с независимым возбуждением, падающая внешняя характеристика которых достигается за счет уменьшения основного магнитного потока генератора потоком последовательной обмотки. Питание независимой обмотки возбуждения осуществляется от генератора – возбуждателя или выпрямителя;

– генераторы с намагничивающей параллельной и размагничивающей последовательной обмотками, в которых падающая внешняя характеристика создается за счет размагничивающего действия потоков последовательной обмотки и реакции якоря генератора.

Многопостовой генератор должен иметь жесткую внешнюю характеристику, т. е. напряжение генератора при изменении тока должно поддерживаться почти постоянным (не более 5 % от номинального значения).

Сварочные генераторы с жесткими и пологопадающими внешними характеристиками используются как многопостовые источники питания либо для питания автоматов или полуавтоматов с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. Генераторы этого типа имеют специальную систему возбуждения (рис. 9.8), в которой потоки обмоток 1 и 3 направлены согласно, а напряжение холостого хода устанавливается с помощью реостата 2. Каждый сварочный пост включается через балластное сопротивление 4, позволяющее регулировать ток в широких пределах. Балластный реостат создает падающую характеристику, служит регулято-

ром тока, ограничивает и регулирует ток короткого замыкания сварочной цепи поста в момент зажигания дуги. Одновременно с этим в нем имеются потери электрической энергии.

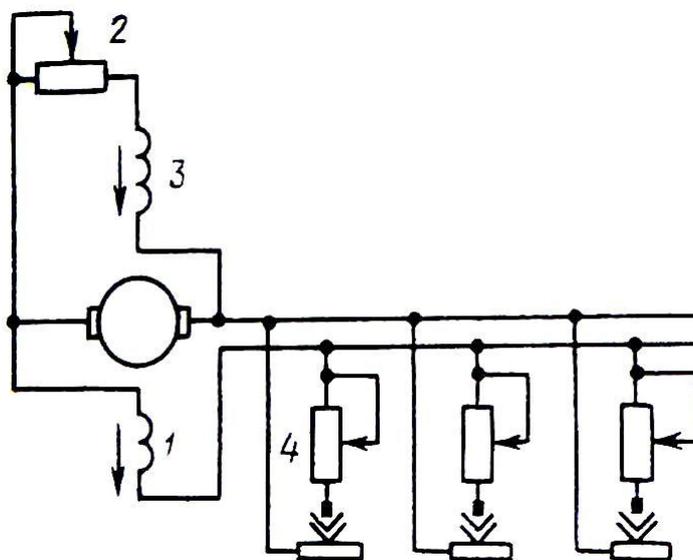


Рис. 8.8. Схема многопостового преобразователя с балластными реостатами

*Сварочные выпрямители* по сравнению со сварочными трансформаторами обеспечивают большую стабильность дуги, особенно на малых токах, вследствие чего напряжение холостого хода их может быть снижено.

*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. Возможна и одновременная работа обратной связи по току и напряжению для получения заданной крутизны наклона пологопадающих внешних характеристик. Структурная схема тиристорного выпрямителя с падающими характеристиками показана на рис. 8.9.

Задаваемое напряжение сравнивается с сигналом обратной связи пропорциональным текущему значению сварочного тока, и усиленная разность между ними подается на вход блока фазового управления. Поступающие на тиристорный блок импульсы зажигания обеспечивают поддержание с определенной точностью постоянного заданного сварочного тока. Крутизна наклона характеристики зависит от коэффициента усиления системы.

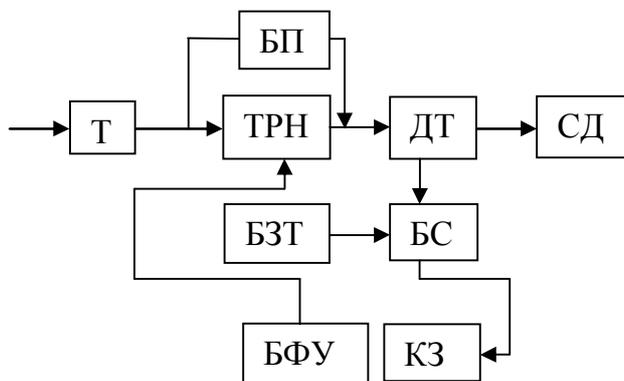


Рис. 8.9. Структурная схема сварочного тиристорного выпрямителя с падающей характеристикой: Т – силовой трансформатор; ТРН – тиристорный регулятор напряжения; БП – блок подпитки; БФУ – блок фазного управления; ДТ – датчик тока; СД – выход – сварочная дуга; БС – блок сравнения; БЗТ – блок задания тока; КЗ – корректирующее звено

Для сглаживания пульсаций и обеспечения стабильного процесса сварки в цепь включается индуктивность, значение которой зависит от технологических особенностей и режимов процесса.

Наиболее широкое распространение получили схемы, обеспечивающие минимальную пульсацию выпрямленного тока для ручной и автоматической сварки (ВСС, ВКС, ВД).

Выпрямительный блок выполняется по трехфазной мостовой схеме Ларионова и снабжен фильтрами для подавления радиопомех, а также схемой защиты, отключающей его от сети при чрезмерном перегреве.

Для аргонно-дуговой сварки металлов малых толщин постоянным и импульсным токами применяются транзисторные преобразователи серии АП (рис. 8.10). Они состоят (рис. 8.10, а) из силового трехфазного трансформатора Тр, выпрямительного блока В, блока транзисторов Т, блока управления БУ, генератора импульсов ГИ и блока поджига дуги БП. В блок поджига входит осциллятор, обеспечивающий зажигание дуги без касания электродов. Сварочный ток регулируется безынерционно и плавно изменением тока блока транзисторов, обеспечивая крутопадающую ВАХ (рис. 8.10, б). Для получения импульсной дуги в цепи управления имеется генератор импульсов регулируемых амплитуд, длительности и частоты.

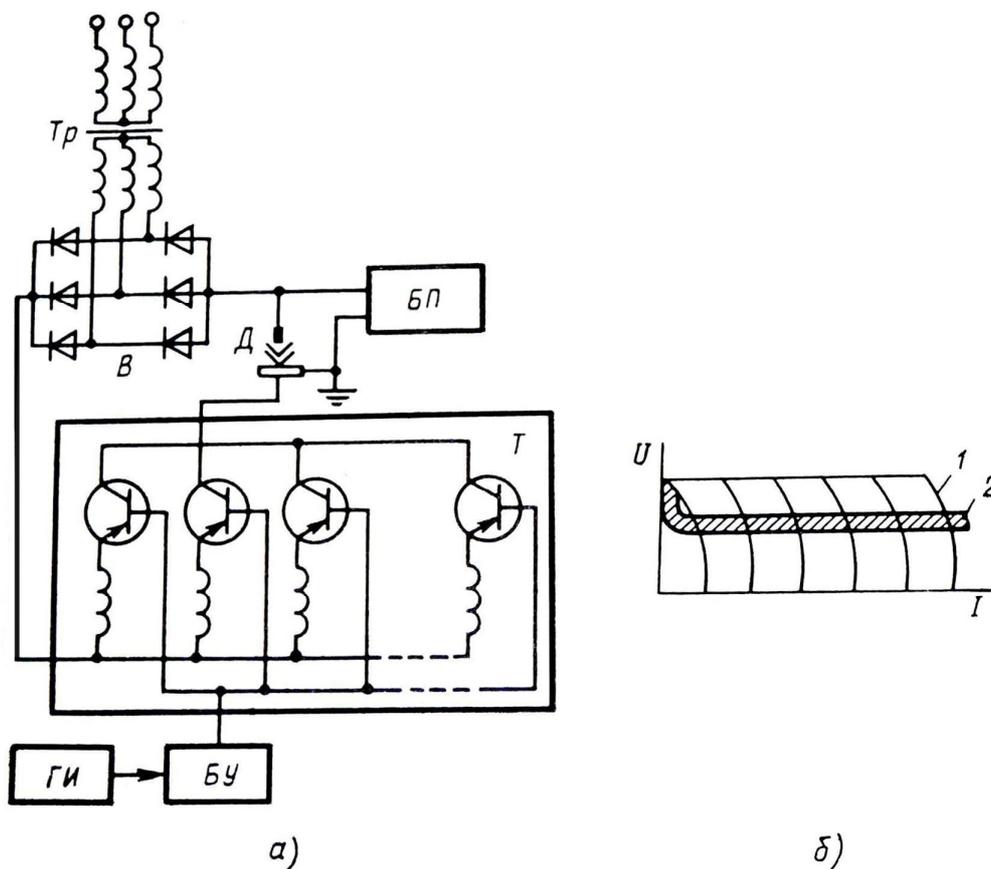


Рис. 8.10. Принципиальная схема и внешние характеристики аппаратов типа АП

### 8.3. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА

С помощью ручной сварки выполняются многообразные операции соединения деталей в приспособленных для этой цели цехах, а также непосредственно на конструкциях и стройплощадках. Сварочные агрегаты переносного исполнения снабжены сварочными проводами соответствующего сечения. Electrode holders при всех технологических приемах надежно удерживают электроды диаметром 0,3 – 6 мм, приготовленные из холоднотянутой или горячекатаной проволоки, материал которой соответствует материалу свариваемых деталей.

Условные обозначения присадочного материала и легирующих элементов приведены в табл. 8.1.

Обозначение марки сварочной проволоки может состоять из цифры, соответствующей ее диаметру (мм), букв Св, означающих «сварочная», цифр, показывающих содержание углерода, и буквенных обозначений компонентов? входящих в состав проволоки (например 2Св-08ГС).

Элемент	Условное обозначение		Элемент	Условное обозначение	
	в таблице Менделеева	в марке стали		в таблице Менделеева	в марке стали
Марганец	Mn	Г	Титан	Ti	Т
Кремний	Si	С	Ниобий	Nb	Б
Хром	Cr	Х	Ванадий	V	Ф
Никель	Ni	И	Кобальт	Co	К
Молибден	Mo	М	Медь	Cu	Д
Вольфрам	W	В	Бор	B	Р
Селен	Se	Е	Азот	N	А
Алюминий	Al	Ю			

Электроды классифицируют в зависимости от материала, из которого они изготовлены, металла, для сварки которого они предназначены, от количества покрытия, нанесенного на стержень, от химического состава стержня и покрытия, характера шлака, образующегося при расплавлении покрытия. Например: УОНИ-13/45-Э42А-4,0ФГОСТ9467-60 – расшифровывается так: УОНИ-13/45 – марка электрода ; Э42А – тип; 4,0-Ф – диаметр и покрытие электрода.

Силу сварочного тока выбирают в зависимости от марки и диаметра электрода  $d_{эл}$ , при этом учитывают положение шва в пространстве, вид соединения, толщину и состав свариваемого металла, температуру окружающей среды. При этом необходимо работать на максимально возможном токе. Ток для электродов выбирают, исходя из соотношений

$$I_{св} = 50d_{эл}; \quad I_{св} = (20 + 6d_{эл}) d_{эл}.$$

#### 8.4. УСТАНОВКИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ

При механизации и автоматизации сварки совершенствуется не только подача проволоки в зону горения дуги, но и возбуждение и поддержание горения дуги, перемещение дуги относительно изделия со скоростью сварки, заварка конечного кратера и разрыв дуги, подача и отсос флюса.

Производительность механизированной и автоматической сварки в 5 – 20 раз выше, чем ручной, при высоком качестве шва и экономном расходовании электроэнергии и материалов. При этих видах сварки флюсы и присадочную электродную проволоку выбирают по тем же критериям, что

и при ручной сварке, с тем отличием, что плотность тока в электроде выбирают значительно большей, диаметр применяемой проволоки при токах 100 – 3000 А составляет 1 – 6 мм.

Сварочная установка состоит из трех основных частей: сварочного агрегата, обеспечивающего процесс сварки, источника питания и аппаратного ящика с пультом управления.

Установки для механизированной и автоматизированной сварки включают в себя следующие разновидности: сварочные полуавтоматы; сварочные автоматы; сварочные тракторы.

*Сварочные полуавтоматы* обеспечивают сварку и наплавку с механизированной подачей проволоки и других сварочных материалов в зону горения дуги и ручным перемещением дуги вдоль линии сварного шва. В состав наиболее распространенных полуавтоматов для сварки в защитных газах входят горелка, механизм подачи электродной проволоки, кассета или катушка, являющаяся контейнером для электродной проволоки, шкаф или блок управления, аппаратура для регулирования и измерения параметров подачи газа, источник питания.

*Полуавтоматы* для сварки под флюсом состоят из тех же узлов, но вместо газовой аппаратуры они снабжены устройствами для подачи флюса.

Горелки для сварки изготавливают на определенный ток, который выбирают из стандартного ряда токов: 125, 160, 220, 250, 315, 400, 500, 630 А.

*Сварочные автоматы* снабжены механизмами передвижения, корректировки направления и положения электрода, сматывания электродной проволоки, устройствами подачи и отсоса флюса, аппаратурой для подачи и изменения расхода газа. 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. Напряжение на дуге при сварке под флюсом обычно выбирают по опытным данным, отражающим изменение напряжения дуги в зависимости от значения сварочного тока, диаметра электрода, марки металла и других параметров. Обычно  $U = 32 \dots 24$  В при  $I = 180 \dots 300$  А и  $U = 40 \dots 44$  В при  $I = 1000 \dots 1200$  А (для электродов диаметром 2 и 5 мм под флюсом АН/348А).

Диаметр электродной проволоки  $d_3$  (мм) можно приближенно вычислить из формулы

$$I_{CB} = 110d_3 + d_3^2.$$

Скорость подачи электродной проволоки зависит от ее диаметра, тока дуги и составляет от 0,5 до 4 – 5 м/мин. Ее увеличивают с ростом тока и уменьшением диаметра электродов.

Особенностью дуговой сварки как объекта управления, определяющей методы и состав технических средств автоматизации, является то, что фактическое положение линии соединения свариваемых элементов в пространстве не вполне определено. Оно является результатом совместного действия следующих преимущественно случайных факторов: погрешностей изготовления свариваемых элементов и их сборки перед сваркой; погрешностей фиксации свариваемого изделия в позиции сварки; погрешностей в задании и обработке траектории движения сварочной головки. Необходимо также учитывать такие случайные факторы, как характер и степень износа элементов сварочного оборудования, отклонение конца электродной проволоки вследствие нестабильности ее формы и диаметра. Если совместное действие этих факторов не приводит к отклонениям, превышающим допустимые, то траектория сварки может быть задана заранее геометрическими аналогами, в цифровом виде с помощью средств числового программного управления, что далее успешно реализуется исполнительными механизмами.

В остальных случаях, когда отклонения значительно превышают допустимые, траектория движения головки должна корректироваться в ходе процесса с применением средств автоматического слежения и измерения. Для этого в сварочных установках применяют следящие, программные и комбинированные системы, оборудованные различными датчиками координат, скорости, мощности дуги. Объектами программного управления при механизированной дуговой сварке могут быть как перемещения (координаты звеньев манипуляционной системы), так и режим сварки (наплавки).

Манипуляционная система, оснащенная техническими средствами автоматического ведения сварочного процесса с программным управлением координатами инструмента и изделия, а также параметрами режима сварки, имеет общее название «промышленный сварочный робот». В роботах, используемых для дуговой сварки, применяются прямоугольная и двухполярная сферическая системы координат региональных движений манипулятора сварочного инструмента, а также сферическая и цилиндрическая системы координат. При необходимости придания сварочному инструменту колебаний поперек линии сварки их осуществляют манипулятором инструмента путем наложения на траекторию движения заданного закона колебаний.

## РАЗДЕЛ III. УСТАНОВКИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО НАГРЕВА

### ГЛАВА 9. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

#### 9.1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

Электронно-лучевой нагрев применяется для обработки тугоплавких и химически активных металлов, сварки, испарения металлов и оксидов, выращивания монокристаллов, металлизации и напыления и т. д.

С технологической точки зрения основными преимуществами электронно-лучевого нагрева следует считать:

а) возможность в широких пределах плавно изменять удельную энергию в зоне нагрева;

б) большую удельную мощность (от десятков ватт до нескольких мегаватт) в месте взаимодействия электронного луча с обрабатываемым изделием);

в) возможность управления пространственным положением луча с помощью магнитной системы;

г) возможность использования вакуума как рабочей среды;

д) возможность получения малоразмерной (прецизионной) зоны воздействия электронного луча на обрабатываемый материал.

В нагревательных установках с использованием электронного луча последний представляет собой направленный поток электронов, переносящий энергию от излучателя электронов к изделию. Ускоренные электроны приобретают кинетическую энергию, пропорциональную их скорости, которую они передают веществу обрабатываемого объекта.

Излучаемые катодом электроны ускоряются в электрическом поле и формируются электрическими и магнитными полями в электронный луч. Мощность электронного луча:

$$P_{\text{л}} = I_{\text{л}} U_{\text{у}}, \quad (9.1)$$

где  $I_{\text{л}}$  – ток луча, А;  $U_{\text{у}}$  – ускоряющее напряжение, В.

Удельная мощность в луче:

$$P_{\text{л}} = \frac{P_{\text{л}}}{S_{\text{л}}} = \frac{I_{\text{л}} U_{\text{у}}}{\pi \cdot r_{\text{л}}^2}, \quad (9.2)$$

где  $S_{\perp}$  и  $r_{\perp}$  – поперечное сечение и радиус луча на обрабатываемой поверхности.

Сформированный пучок проходит через рабочую камеру и попадает на поверхность обрабатываемого объекта. Скорость электронов при попадании на поверхность детали

$$v = \sqrt{\frac{2e_0 U_Y}{m_e}}.$$

Глубина проникновения электронов (м) с энергией 5 – 100 эВ (что имеет место в электронно-лучевых установках (ЭЛУ)) может быть определена по формуле Шонланда:

$$b = 2,1 \cdot 10^{-17} U_Y \gamma, \quad (9.3)$$

где  $\gamma$  – плотность вещества мишени, кг/м<sup>3</sup>.

## 9.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

Основные технологические операции электронно-лучевой обработки можно условно подразделить на четыре группы: плавка в вакууме, локальный переплав; испарение (испарение в вакууме, размерная обработка электронным лучом); термообработка (без изменения агрегатного состояния вещества); сварка.

Плавка электронным лучом в вакууме применяется в тех случаях, когда необходимо получить особо чистые металлы. Она имеет преимущества перед плавкой в вакуумных дуговых и индукционных печах, поскольку позволяет производить рафинирование жидкого металла в ванне после прекращения плавления электрода, а также осуществлять другие физико-химические процессы, которые при иных методах плавки не успевают проходить полностью или не протекают вообще. Переплавляемый материал может быть использован практически в любой форме (шихта, пруток, лом, спеченные штабики, губка).

Переплавляемый металл (рис. 9.1) в виде порошка, гранул или мелкого металлолома подается в установку, где он подвергается обработке одной или несколькими пушками.

Электронно-лучевая плавка удобна при выращивании монокристаллов (рис. 9.2), когда на затравку 2 наплавляется материал 5 из тигля 7 и

вытягивается с заданной скоростью вертикально вверх с получением монокристалла 3.

В промышленности применяют электронно-лучевую плавку с последующей заливкой литейных форм. На различных ЭЛУ для плавки в вакууме при давлении  $10^{-4} - 10^{-7}$  Па получают слитки массой до 20 т.

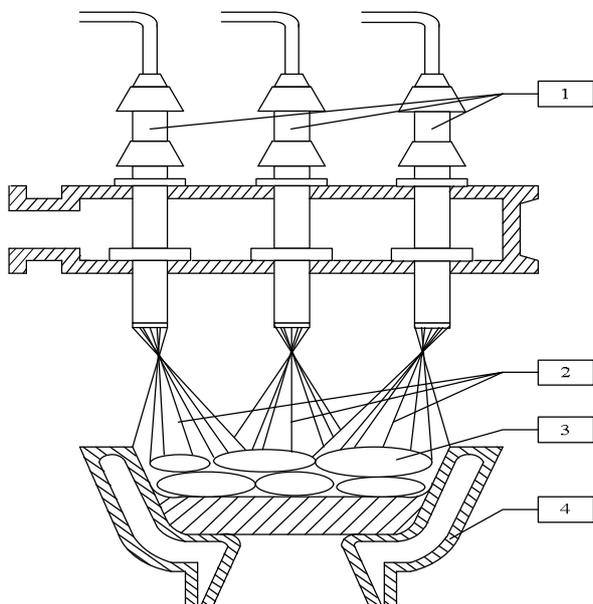


Рис. 9.1. Схема ЭЛУ для переплавки металлолома:

- 1 – электронные пушки;
- 2 – электронные лучи;
- 3 – переплавляемый металл;
- 4 – водоохлаждаемая форма

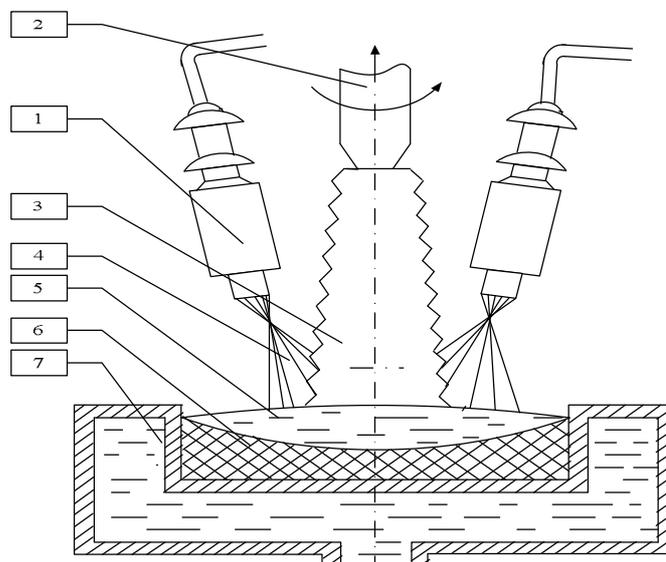


Рис. 9.2. Схема ЭЛУ для выращивания монокристаллов: 1 – электронная пушка; 2 – затравка; 3 – монокристалл; 4 – электронный луч; 5 – расплав переплавляемого материала; 6 – переплавляемый материал; 7 – водоохлаждаемый тигель

Локальный переплав обрабатываемых поверхностей с помощью электронного луча дает возможность получать чрезвычайно высокие скорости кристаллизации металла в зоне плавления. Образующиеся при этом структуры значительно отличаются от структур, получаемых в обычных условиях: расширяются границы растворимости для твердых растворов, измельчается микроструктура, значительно повышаются пластичность и твердость.

Испарение в вакууме материалов при нагреве их электронным лучом широко используют для получения тонких пленок. В отличие от других способов испарения, где энергия подводится к испаряемой поверхности через стенку тигля или высокотемпературный нагревательный элемент, при электронно-лучевом испарении осуществляется прямой нагрев поверхности испаряемого материала. Это позволяет испарять материалы из

водоохлаждаемых тиглей, что особенно важно при работе с химически активными и тугоплавкими материалами.

С помощью размерной обработки заготовки электронным лучом в ней получают глухие или сквозные отверстия заданных размеров или заданный контур. Размерная обработка основана на том, что при достаточно большой удельной поверхностной мощности скорость испарения обрабатываемого материала и давление пара возрастают настолько, что весь жидкий металл с потоком пара выбрасывается из зоны обработки. Строгое дозирование подводимой энергии осуществляется импульсным воздействием электронного луча на поверхность или его перемещением по поверхности с заданной скоростью.

Электронный луч нашел применение в первую очередь для размерной обработки твердых материалов – алмазов, кварца, керамики, кристаллов кремния и германия.

Особой разновидностью размерной электронно-лучевой обработки является перфорация (получение мелких сквозных отверстий) различных материалов. Этим способом изготавливают металлические и керамические элементы фильтров, пористый материал для охлаждения камер сгорания и лопаток турбин.

Электронно-лучевая термообработка заключается в локальном нагреве обрабатываемых участков поверхности с целью получения структурных превращений материала. Она применяется также для отжига материалов в вакууме, повышая их пластичность и очищая поверхность от адсорбированных газов.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) является одним из самых распространенных технологических применений электронного луча. Ее производят с помощью тонкого пучка электронов, который фокусируется на стыке соединяемых деталей и нагревает их до плавления. Сварочный шов при ЭЛС получается чистым и свободным от газов, оксидов и летучих примесей. Общее количество энергии, необходимое для расплавления материала, гораздо меньше, чем при других видах нагрева в процессе сварки. Это обусловлено высокой концентрацией энергии в фокусе электронного луча.

В общем случае глубина проплавления электронным лучом может превышать ширину шва более чем в 20 раз («кинжальное проплавление»). Глубина проплавления также зависит от скорости сварки и от температуры предварительного прогрева свариваемого металла.

## ГЛАВА 10. ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ (ЛАЗЕРЫ)

### 10.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ

Основой работы оптического квантового генератора (ОКГ) является генерирование монохроматических волн оптического диапазона под воздействием индуцированного (вынужденного) излучения.

Согласно законам квантовой механики энергия относительного движения любой системы связанных частиц не является произвольной, а принимает определенный ряд значений, которые называются уровнями энергии  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  и т. д. Весь набор допустимых значений энергий принято называть энергетическим спектром системы.

При переходе с высокого уровня энергии  $E_n$  на нижний  $E_m$  частицы излучают электромагнитные волны, частота которых  $\nu$  определяется соотношением

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h}, \quad (10.1)$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

При переходах на более высокие энергетические уровни частицы могут поглощать электромагнитные волны такой же частоты.

Если микрочастица находится в возбужденном состоянии, а ее энергия превышает минимально допустимое значение  $E_0$ , то такое состояние не может сохраняться в течение значительного времени. Даже полностью изолированная от внешней среды возбужденная частица через некоторое время перейдет в состояние с меньшей энергией, при этом переходе она испускает фотон. Такой переход называют самопроизвольным или спонтанным излучением. Спонтанное излучение носит шумоподобный характер. Отдельные акты спонтанного излучения различными частицами происходят случайно. Момент излучения кванта каждой из возбужденных частиц, направление его движения и поляризация не связаны с актами испускания квантов другими такими же частицами. Все традиционные источники света (нагретые тела, плазма газовых разрядов) дают спонтанно излучаемый свет.

Иначе происходит процесс индуцированного излучения. Если возбужденная частица находится под воздействием внешних электромагнитных волн резонансной частоты, то она может перейти в состояние с меньшей энергией. При этом она испускает квант, не отличимый от приходящих извне, т. е. имеющий такую же частоту, поляризацию и направление

распространения. Вероятность испускания индуцированного излучения пропорциональна интенсивности внешнего излучения – числу квантов в единицу времени. Фаза возникающих при индуцированных переходах электромагнитных волн строго согласована с фазой внешних волн. Поток индуцированного излучения отличается от первичного только возросшей интенсивностью.

В любом ОКГ используется явление индуцированного излучения среды, поддерживаемой в состоянии с инверсной заселенностью уровней за счет работы стороннего источника энергии. Принцип работы ОКГ рассмотрим на примере конструкции с рубиновым стержнем (рис. 10.1).

Синтетический рубиновый стержень представляет собой плавленный оксид алюминия с добавкой (0,04 – 0,05 %) атомов трехвалентного хрома.

Для изготовления лазеров подбирают такие вещества, атомы которых переходят из возбужденного состояния в основное не сразу, а через промежуточное метастабильное состояние. Атомы находятся в этом состоянии до тех пор, пока они не будут вынуждены перейти в основное состояние. В лазерах достаточно лишь одному атому перейти из метастабильного состояния в основное и испустить при этом фотон, как это стимулирует такой же переход других атомов.

Весь процесс излучения света лазером происходит в два этапа, как показано на энергетической диаграмме (рис. 10.2). Три горизонтальных линии на этом рисунке соответствуют трем энергетическим уровням системы, а стрелками обозначены возможные переходы между ними. Нижний уровень соответствует основному состоянию атома; верхний – возбужденному, а средний – метастабильному.

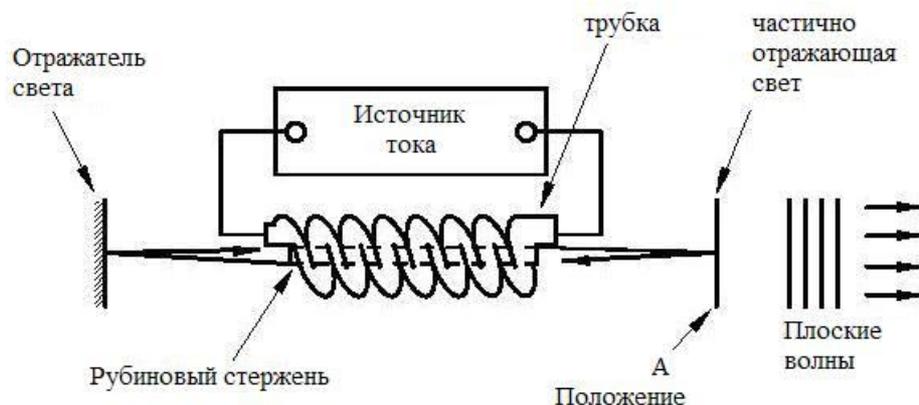


Рис. 10.1. Принципиальная схема лазера с рубиновым стержнем

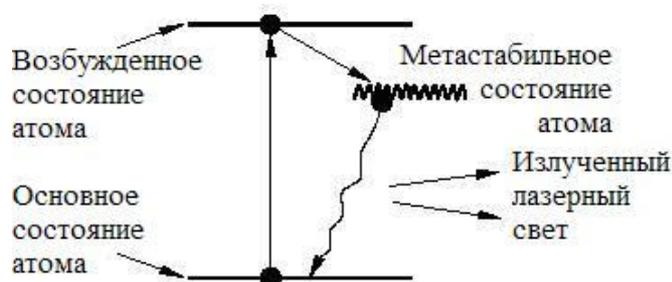


Рис. 10.2. Энергетическая диаграмма

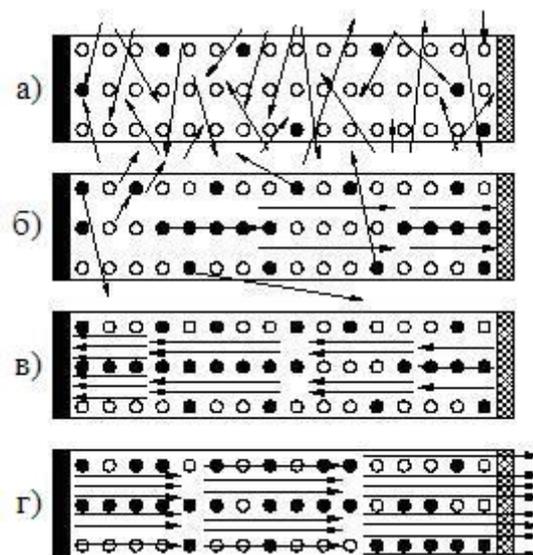


Рис. 10.3. Схема процессов системы частиц в активном веществе лазера

Если подействовать на находящиеся в метастабильном состоянии атомы квантами световой энергии, частота которых равна частоте перехода из метастабильного состояния в основное, то атомы мгновенно переходят в основное состояние, излучая при этом световую энергию.

При вспышке разрядной трубки, подключенной к источнику питания, возбуждается активный элемент – рубиновый стержень. Возникший в нем луч усиливается, многократно отразившись от световых экранов, и выходит через поверхность, частично отражающую свет в виде когерентного светового излучения. Когерентным называют излучение с одной частотой, одним направлением и с одинаковыми фазами или постоянной разностью фаз.

Основные процессы, происходящие в активном веществе лазера, при его освещении импульсной вспышкой показаны на рис. 10.3. Находящиеся в невозбужденном состоянии атомы хрома (на рисунке они показаны черными точками) под действием фотонов (стрелки на рисунке) переходят в возбужденное состояние (белые точки) (рис. 10.3, а). После поглощения импульса света возбужденные атомы хрома переходят на более низкий уровень, излучая при этом избыток энергии в форме электромагнитных колебаний, в т. ч. и в видимой области спектра.

## 10.2. ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Любой ОКГ независимо от конструктивного выполнения содержит следующие основные элементы:

- 1) рабочее тело, состоящее из ансамбля атомов или молекул, для которых может быть создана инверсия заселенностей;
  - 2) систему, позволяющую осуществлять инверсию (ее обычно называют системой накачки);
  - 3) оптический резонатор;
  - 4) устройство для вывода энергии из резонатора;
  - 5) систему управления концентрацией энергии и пространственным положением полученного пучка света;
- б) различные специальные системы, связанные с конкретным применением ОКГ.

Для инверсии населенности в ОКГ применяют следующие виды накачки:

- а) оптическую – за счет облучения вещества мощным световым потоком;
- б) электрическую, осуществляемую при прохождении через вещество электрического тока;
- в) химическую, когда инверсия возникает за счет химической реакции, в которой принимает участие рабочее вещество, и т. д.

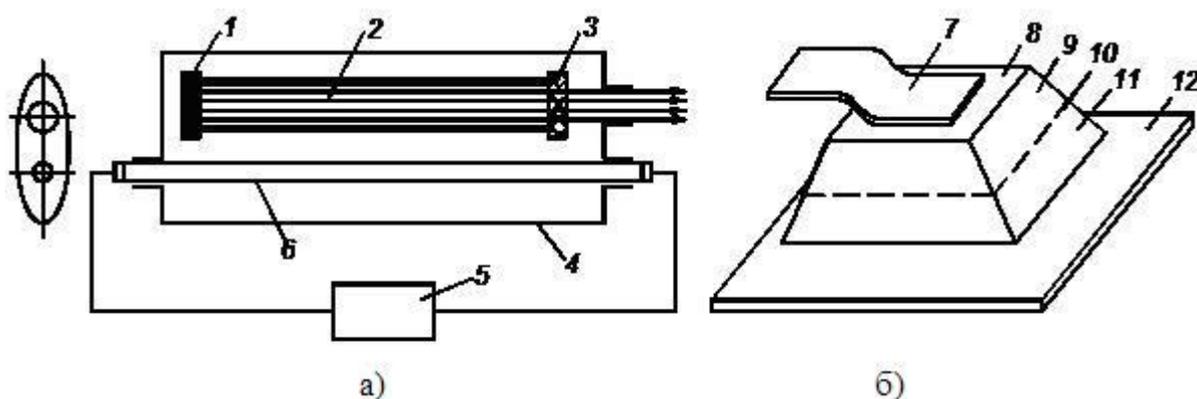


Рис. 10.4. Принципиальные схемы твердотельных лазеров:  
 а – с рубиновым стержнем; б – полупроводникового

В зависимости от режима работы ОКГ различают устройства, работающие в непрерывном и импульсно-периодическом режимах.

Существующие лазеры по роду материалов, используемых для получения индуцированного излучения, подразделяют на четыре основных

типа: твердотельные с оптическим возбуждением, полупроводниковые (инжекционные), жидкостные и газовые (рис. 10.4).

1. Лазеры твердотельные с оптической накачкой. В лазерах этого типа излучателем – активным элементом – является твердое тело.

Материалом матрицы служат кристаллы щелочно-земельных фторидов, вольфраматов или молибдатов, синтетического рубина, иттриево-алюминиевые гранаты, стекла различных составов. Активирующими примесями являются различные редкоземельные элементы, а также хром и уран.

Принципиальная схема твердотельного оптического квантового генератора показана на рис. 10.4, а. Стержень 2, изготовленный из рабочего вещества, помещен между двумя зеркалами 1, 3. Зеркало 1 полностью отражает все падающие на него лучи, а зеркало 3 является полупрозрачным. Для накачки энергии используется газоразрядная лампа-вспышка 6, которая для большей эффективности облучения кристалла помещена вместе с ним внутрь отражающего кожуха 4 с поперечным сечением в форме эллипса. При размещении лампы и кристалла в фокусах эллипса создаются наилучшие условия равномерного освещения кристалла. Питание лампы-вспышки осуществляется от импульсного высоковольтного источника 5.

Длительность импульса твердотельных ОКГ определяется индуктивностью, включаемой в цепь конденсаторной батареи, и обычно колеблется в пределах 0,1 – 10 мс.

КПД твердотельных лазеров относительно невысок, поскольку значительная часть подводимой к лампе накачки энергии превращается в теплоту.

Лазерное излучение на поверхности обрабатываемой детали фокусируется с помощью сферической или цилиндрической оптики. В первом случае луч фокусируется в точку, во втором – в линию, длина которой определяется поперечным сечением луча генератора.

2. Твердотельные полупроводниковые лазеры. Лазеры этого типа отличаются от рубиновых тем, что в качестве излучающего свет вещества в них используется кусочек полупроводника.

Полупроводниковые инжекционные лазеры характеризуются очень высоким преобразованием электрической энергии в когерентное излучение (до 100 %) и могут работать в непрерывном режиме. В полупроводниковых ОКГ, работающих при температуре жидкого азота, достигается мощность порядка 100 Вт, а при температуре жидкого гелия – до 10 Вт. Наиболее перспективны инжекционные лазеры на гетеропереходах. Они могут работать в непрерывном режиме при комнатной температуре.

3. Жидкостные лазеры. Их преимущество – возможность циркуляции жидкости с целью ее охлаждения, что позволяет получать большие энергии и мощности излучения в импульсном и непрерывном режимах. Созданы лазеры на основе растворов редкоземельных ионов в ряде неорганических жидкостей, а также лазеры непрерывного и импульсного действия, у которых в качестве активной среды используются растворы органических красителей.

4. Газовые лазеры. Принципиальное устройство лазеров этого типа гораздо проще уже рассмотренных. Стеклообразная трубка наполняется специальной газовой смесью. В ее торцы впаивают два электрода и к ним подводят напряжение от источника питания. В трубке возбуждается газовый разряд. Для газовых лазеров подбирают специальные активные смеси, атомы или молекулы которых могут некоторое время находиться в метастабильном состоянии. По сравнению с твердыми телами и жидкостями газы обладают меньшей плотностью и более высокой однородностью, что не вызывает искажения светового луча, его рассеяния и потерь энергии. В результате направленность лазерного излучения в газах резко увеличивается, достигая предела, обусловленного дифракцией. В качестве активных газов в ОКГ применяют аргон, неон, криптон, ксенон, смеси гелия и неона, углекислый газ с добавкой азота и гелия. Газовые ОКГ подразделяют на три большие группы: лазеры на атомных, ионных и молекулярных переходах.

### 10.3. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СВЕТОЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

Технологические генераторы когерентного светового излучения (в основном газовые и твердотельные) имеют мощность непрерывного излучения до нескольких сотен киловатт и энергию отдельного импульса до нескольких сотен джоулей.

Особенностью лазерной обработки является интенсивный локальный разогрев обрабатываемого материала. Интенсивность нагрева определяется глубиной проникновения излучения в материал  $\delta$  и толщиной прогретого путем теплопроводности слоя  $\sqrt{a\tau}$ , где  $a$  – температуропроводность материала;  $\tau$  – длительность воздействия лазерного излучения. Для металлов, когда  $\delta \ll \sqrt{a\tau}$ , источник теплоты является поверхностным.

Процесс взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемым материалом можно разделить на следующие стадии: поглощение света с последующей передачей энергии тепловым колебанием решетки твердого тела; нагрев материала без разрушения, включая и плавление; разрушение материала путем испарения и выброса его расплавленной части; остывание после окончания воздействия.

При термообработке и сварке различных материалов используются нагрев и плавление, а тепловое разрушение и выброс расплавленной части доминируют в процессах резки и сверления отверстий.

В зависимости от назначения в состав лазерной технологической установки кроме лазера могут входить оптико-механический блок устройства управления лазерным излучением, устройство измерения и стабилизации параметров излучения, блок охлаждения, устройство автоматики, сигнализации и т. д. Структурная схема промышленной лазерной установки показана на рис. 10.5.

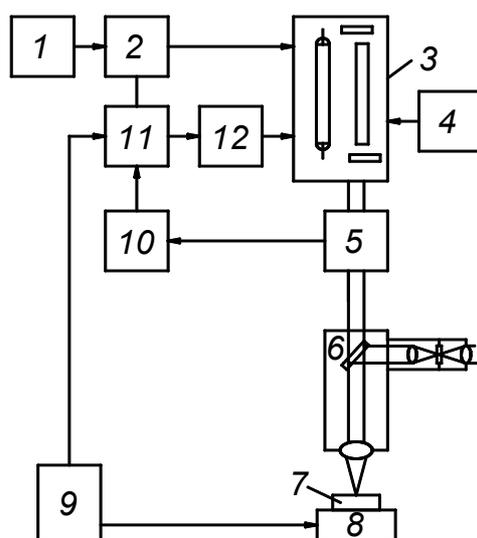


Рис. 10.5. Структурная схема промышленной лазерной установки:  
 1 – зарядное устройство; 2 – емкостный накопитель; 3 – лазерная головка; 4 – система охлаждения; 5 – датчик энергии излучения;  
 6 – оптическая система; 7 – изделие; 8 – предметный столик;  
 9 – система программного управления; 10 – система стабилизации энергии излучения; 11 – система управления; 12 – блок поджига

Газолазерная резка основана на разделении материала под воздействием выделяющейся в нем теплоты с поддувом в зону резки газа, который удаляет продукты разрушения и инициирует при разделении материалов химическую реакцию. Этот способ резки целесообразен для обработки дорогих металлов и сплавов, поскольку из-за небольшой ширины реза ей

свойственны минимальные отходы. Она широко применяется в электронной и микроэлектронной промышленности при производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем. Успешно применяется лазерная резка в текстильной промышленности. Разработаны технологические процессы лазерного изготовления глухих и сквозных отверстий при изготовлении алмазных фильер и рубиновых часовых камней.

Лазерная сварка наиболее эффективна в микроэлектронике. С ее помощью производят соединение плоских выводов с монтажом печатных плат. Лазерная сварка применяется и при герметизации металлических корпусов интегральных схем. Высокая локальность и кратковременность нагрева при импульсной лазерной сварке позволяет понизить температуру в наиболее чувствительных к нагреву элементов интегральной схемы.

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

Термическое действие лазерного излучения может быть применено для закалки и поверхностного упрочнения («залечивание» микродефектов плавлением) быстроизнашивающихся металлических деталей, для создания *p-n*-переходов в производстве полупроводниковых приборов, для интенсификации процессов локального окисления и восстановления; для получения тонких пленок путем испарения материалов в вакууме и т. д.

Лазерное излучение абсолютно стерильно, поэтому оно используется в медицине для глазных операций, при остановке кровотечений, а также в сельском хозяйстве для предпосевной обработки семян.

Высокая мощность и экономичность  $\text{CO}_2$  – лазеров делают возможным их использование для разрушения сверхпрочных горных пород при работах в шахтах и тоннелях.

Новые химические реакции, новые химические продукты, ускорение и удешевление химических реакций, разделение изотопов - вот неполный перечень тех преимуществ, которые может дать применение лазеров в химической технологии.

# РАЗДЕЛ IV. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

## ГЛАВА 11. ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ УСТАНОВКИ

### 11.1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Электрохимия изучает поведение ионов в растворах и явления на границе между твердым телом и раствором. Она основана на применении электролитов.

*Электролитами* называются вещества, растворы и расплавы которых могут проводить электрический ток ионами, образуясь в результате электролитической диссоциации. В отличие от металлов и полупроводников растворы и расплавы электролитов обладают ионной проводимостью.

*Электролитической диссоциацией* называется процесс распада вещества на разноименно заряженные ионы при его растворении или расплавлении. Число положительных и отрицательных ионов, возникающих в процессе электролитической диссоциации, одинаково. Положительные ионы представляют собой атомы или молекулы, потерявшие один или несколько электронов, отрицательные ионы – атомы или молекулы, имеющие один или несколько лишних электронов.

В электролитах наряду с процессом диссоциации протекает обратный процесс воссоединения ионов в отдельные молекулы – молизация. В результате одновременного протекания этих двух процессов в растворе устанавливается подвижное равновесие между числом вновь образующихся ионов и числом ионов, воссоединяющихся в молекулы.

Если же к опущенным в электролит электродам приложить электрическое поле, то кроме хаотического теплового движения возникает направленное движение ионов. Положительные ионы (катионы) направляются к катоду, а отрицательные (анионы) – аноду. Дойдя до соответствующих электродов, ионы отдают им свои заряды и, став обычными атомами или молекулами, выделяются на электродах или вступают в химические реакции с материалом электрода.

В отличие от металлов и полупроводников прохождение электрического тока через электролит сопровождается переносом массы вещества.

Количество вещества  $g$ , выделившегося на электроде при прохождении электрического тока через раствор электролита, определяется законом Фарадея:

$$g = \alpha I \tau, \quad (11.1)$$

где  $\alpha$  – электрохимический эквивалент, г/Кл;  $I$  – ток, А;  $\tau$  – время прохождения тока, с.

Электрохимический эквивалент  $\alpha$  – количество вещества, выделившееся из электролита при прохождении одного кулона электричества. Численно он равен отношению химического эквивалента вещества к числу Фарадея. Число Фарадея ( $F_{\Phi}$ ) – количество электричества, требующееся для выделения одного грамм-эквивалента вещества [ $F_{\Phi} = 96485$  Кл/(г·эquiv)].

Процессы в электролитах подчиняются закону Ома.

Плотность тока, проходящего через электролит,

$$j = env = en\mu E, \quad (11.2)$$

где  $\mu = e/k$  – подвижность иона;  $e$  – заряд иона;  $n$  – концентрация ионов.

Учитывая плотность токов положительных и отрицательных ионов, получим

$$j = e(n^+ \mu^+ + n^- \mu^-)E, \quad (11.3)$$

где  $n^+$ ,  $n^-$ ,  $\mu^+$  и  $\mu^-$  – концентрации и подвижности положительных и отрицательных ионов соответственно.

Так как в электролите плотность тока  $j$  пропорциональна напряженности электрического поля, то вступает в силу закон Ома.

Проводимость электролита  $\sigma = e(n^+ \mu^+ + n^- \mu^-)$  увеличивается с ростом концентрации ионов и их подвижности.

## 11.2 ЭЛЕКТРОЛИЗ РАСТВОРОВ И РАСПЛАВОВ

Явление выделения вещества на электродах при прохождении через электролит тока, а также процессы окисления или восстановления на электродах, сопровождающиеся приобретением или потерей частицами вещества электронов, называются электролизом.

В промышленности электролиз применяется в основном для анодного растворения металла и его катодного осаждения из растворов и расплавов.

Если в электролизной ванне процесс происходит с поглощением электрической энергии, ванна называется электролизером. Принципиальная схема электролизера показана на рис. 11.1.

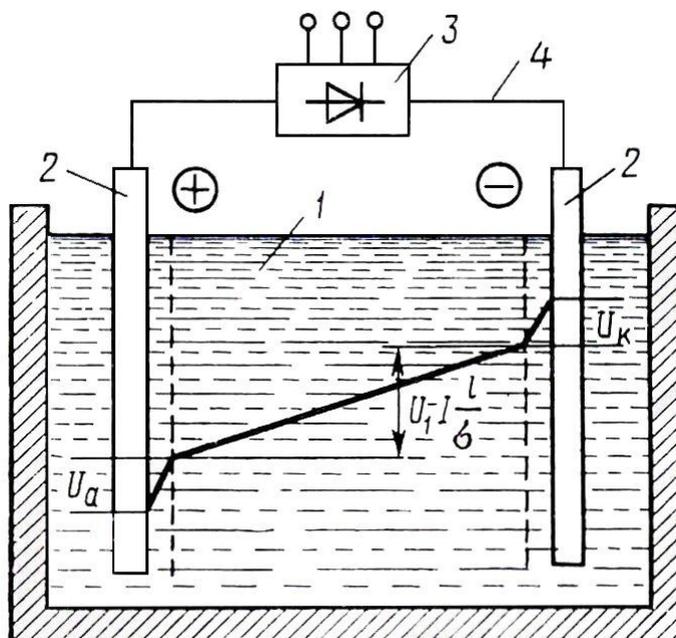


Рис. 11.1. Схема электролизной установки и распределение потенциала между электродами:

1 – электролит; 2 – электроды;  
3 – источник питания; 4 – проводящие ионы

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

$$U = U_1 + U_a + U_k = \frac{I l}{\sigma}, \quad (11.4)$$

где  $U_1$  – напряжение электрохимического разложения вещества;  $U_a$ ,  $U_k$  – анодное и катодное падения потенциала соответственно;  $I$  – сила тока в ванне;  $l$  – расстояние между электродами;  $\sigma$  – проводимость электролита.

Мощность, выделяющаяся в электролизной ванне:

$$P_{\text{Э}} = I \left( U_1 + U_{\text{а}} + U_{\text{к}} + \frac{I_1}{\sigma} \right), \quad (11.5)$$

Только часть этой мощности ( $IU_1$ ) идет на электрохимическое разложение вещества, остальная же мощность расходуется на нагрев электролита и транспортировку ионов через раствор.

Отношение количества вещества, полученного при электролизе, к теоретически возможному количеству вещества, определенному по закону Фарадея, называют выходом вещества по току  $A_i$  (%):

$$A_i = \left( \frac{q_1}{q_2} \right) 100, \quad (11.6)$$

где  $q_1$  – фактически выделившееся количество вещества;  $q_2$  – количество вещества, которое должно было выделиться по закону Фарадея при отсутствии электрических потерь. Выход по току указывает, насколько экономично и рационально идет процесс электролиза.

Эффективность электролизного процесса оценивается выходом по энергии:

$$A_{\text{Э}} = \left( \frac{\alpha A_i}{U} \right) 100, \quad (11.7)$$

где  $\alpha$  – электрохимический эквивалент вещества;  $A_i$  – 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).

Электродная плотность тока определяется ( $\text{А}/\text{м}^2$ ):

$$j_{\text{Э}} = \frac{I}{S}, \quad (11.8)$$

где  $I$  – сила тока;  $S$  – поверхность погруженной в электролит части электрода.

Образующийся около поверхности электрода двойной электрический слой препятствует подходу к электроду иона, а также выходу иона с электрода. Для его разрушения применяют циркуляцию электролита, питание электролизной ванны импульсным напряжением, а также вибрацию электродов.

При этом выравнивается температура электролита по ванне, а при питании импульсным напряжением нейтрализуется объемный заряд.

*Электролиз меди.* Целью электролиза меди является снижение содержания примесей в черновой меди, полученной плавкой в отражательных печах, извлечение находящихся в ней благородных и других ценных металлов и получение чистой электролитической меди.

Процесс ведут в электролизных ваннах ящичного типа, устанавливаются литые аноды черновой меди, между которыми подвешиваются тонкие пластины чистой меди (катоды) и подаётся электролит, представляющий собой водный раствор медного купороса.

Процесс электролиза начинается при напряжении 0,3 – 0,35 В. Плотность тока колеблется в пределах 180 – 270 А/м<sup>2</sup>. Фактический выход по току составляет 92 – 98 %. Удельный расход электроэнергии составляет 200 – 379 кВтч/т чистой меди.

*Электролиз цинка.* В ваннах устанавливаются алюминиевые катоды и свинцовые аноды, которые заполняются водным раствором сернокислого цинка ZnSO<sub>4</sub> (5 – 6 %), который диссоциирует на катионы цинка Zn<sup>2+</sup> и анионы SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, и серной кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, диссоциирующей на катионы водорода H<sup>+</sup> и анионы SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. В результате на катоде осаждается металлический цинк, на аноде выделяется газообразный кислород, а в растворе образуется серная кислота H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Электролиз ведут при повышенных плотностях тока (400 – 600 А/м<sup>2</sup>).

*Электролиз алюминия.* Электролитом является раствор оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в расплавленном криолите (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>), ток через ванну достигает значений более 100 кА, поэтому ванны включают в серии последовательно без предварительного объединения в блоки.

При нормальной работе напряжение на ванне составляет 4,2 – 4,5 В, что достигается поддержанием заданного состава электроплита.

### 11.3. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Питание электролизных установок постоянным током осуществляется от генераторов постоянного тока или полупроводниковых выпрямительных агрегатов, преобразующих переменный ток промышленной частоты в постоянный.

Регулирование напряжения должно обеспечить необходимую глубину и плавность. Наибольшая глубина регулирования необходима при пуске электролизных установок. Необходимая ширина диапазона регулиро-

вания достигается за счет переключения сетевой обмотки трансформатора со звезды на треугольник, параллельно-последовательным включением ее секций и т. д.

Выпрямительные агрегаты выполняются с неуправляемыми и управляемыми вентилями. Принципиальная схема силовой части показана на рис. 11.2. Две вентильные обмотки соединены треугольником, а две – звездой. Трансформатор питает четыре параллельно включенных вентильных блока БВ, выполненных по шестифазной мостовой схеме (схеме Ларионова).

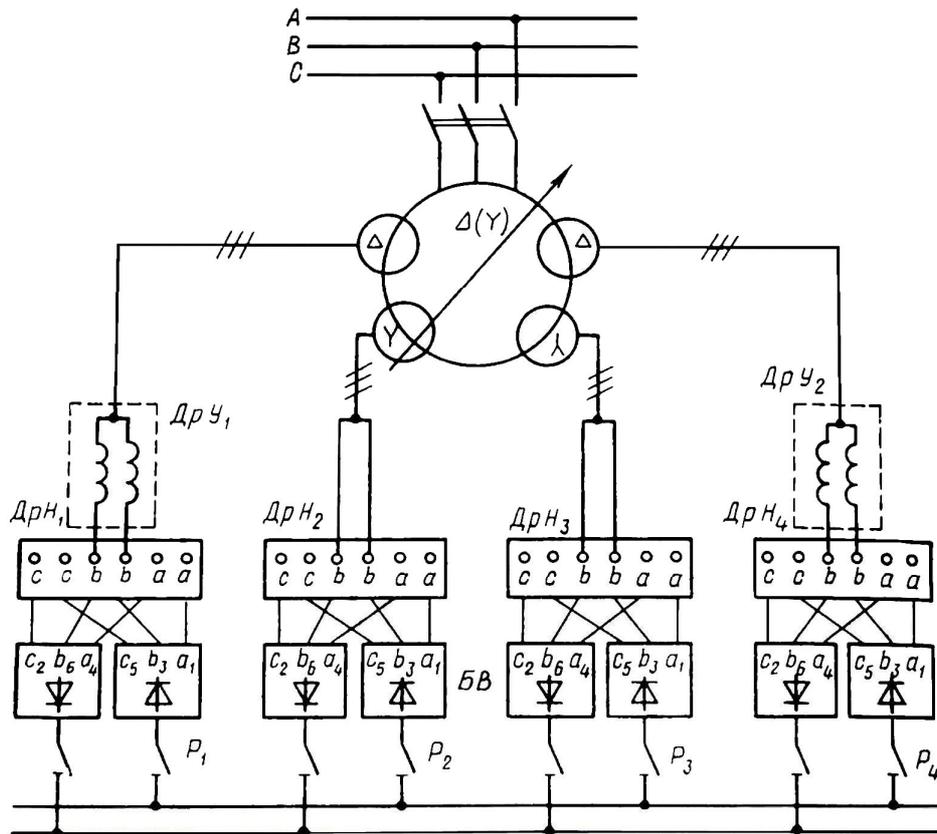


Рис. 11.2. Схема силовой части вентильного преобразователя с неуправляемыми вентилями

Уравнивающие дроссели  $ДрУ_1$  и  $ДрУ_2$  предназначены для равномерного распределения токов между выпрямительными блоками, поскольку напряжение соединенных в треугольник обмоток трансформатора на 1 % выше напряжения обмоток, соединенных звездой.

Дроссели насыщения  $ДрН_1$  –  $ДрН_4$  обеспечивают плавное регулирование напряжения.

Принципиальная схема выпрямительного агрегата с управляемыми вентилями (тиристорами) показана на рис. 11.3. Первичные обмотки трех однофазных трансформаторов  $Тр_1$  –  $Тр_3$  соединены в звезду с помощью

тиристоров, которые служат для плавного регулирования переменного тока. В агрегате применена двухконтурная система регулирования с внутренним токовым контуром и внешним контуром напряжения. Регулятор тока РТ подключен к входу системы импульсно-фазового управления тиристорами – СИФУ. Неуправляемый анодный выпрямитель В питается от вторичных обмоток трансформаторов  $Tr_1 - Tr_3$ , соединенных по схеме двойной трехфазной звезды. В нормальном режиме регулятор напряжения РН находится в насыщенном состоянии, а при увеличении напряжения на нагрузке выше заданного уровня корректирует суммарное значение выпрямленного тока.

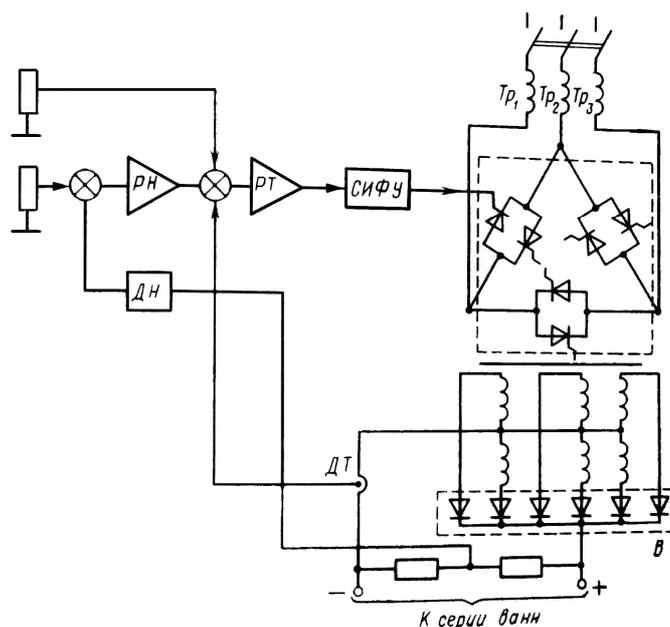


Рис. 11.3. Схема выпрямительного тиристорного агрегата

Поскольку рабочие токи электролизных ванн достигают десятков и сотен килоампер, сечение шинпровода также получается большим – до  $15 \text{ дм}^2$ .

Коэффициент мощности агрегатов с неуправляемыми вентилями достаточно высок и зависит лишь от числа фаз выпрямления, проблема повышения его возникает при использовании управляемых вентилей. Компенсация реактивной мощности, генерируемой преобразовательными агрегатами, может производиться следующими методами: применением статических конденсаторов, использованием синхронных машин, применением продольной емкостной компенсации (ПЕК) реактивного сопротивления питающей сети, введением специальных схем с неуправляемыми вентилями (компенсационные выпрямительные агрегаты), а также эксплуатацией специальных схем управляемых вентильных агрегатов.

Оптимальная степень компенсации определяется по обобщенному критериальному показателю – нагрузочному КПД цепи электроснабжения, характеризующему активные потери энергии. Возникающие производительные потери электроэнергии  $\Delta W_{\Theta}$  при компенсации реактивной мощности:

$$\Delta W_{\Theta} = Q_a^2 R_a^2 \frac{2v - v^2}{U_a^2}, \quad (11.9)$$

где  $Q_a$  – потребляемая с шин подстанции реактивная мощность в нескомпенсированном режиме, квар;  $R_a$  – активное сопротивление цепи от шин подстанции до шин бесконечной мощности системы, Ом;  $U_a$  – напряжение на шинах подстанции, кВ;  $v$  – степень компенсации реактивной мощности.

Для преобразовательной подстанции эта формула имеет вид

$$\Delta W_{\Theta} = \frac{S_a \cos \varphi_a \sin^2 \varphi (2v - v^2)(1 - \eta_{\text{ц}})}{\eta_{\text{ц}}}, \quad (11.10)$$

где  $S_a$  – потребляемая с шин подстанции кажущаяся мощность, кВА;  $\varphi_a$  – фазный угол сдвига тока и напряжения на шинах подстанции;  $\eta_{\text{ц}}$  – нагрузочный КПД цепи электроснабжения, рассчитанный с учетом активных потерь в токопроводах, трансформаторах и синхронных генераторах, связанных с выработкой реактивной мощности.

При использовании ПЕК нагрузочный КПД системы электроснабжения

$$\eta_{\text{пек}} = \eta_a \eta_{\text{п}} \eta_{\text{г}}, \quad (11.11)$$

а при использовании компенсационных выпрямительных агрегатов

$$\eta_{\text{к}} = \eta_a \eta_{\text{г}}, \quad (11.12)$$

где  $\eta_a$  – нагрузочный КПД участка радиальной цепи от шин системы до шин подстанции без учета постоянных потерь;  $\eta_{\text{п}}$  – нагрузочный КПД преобразовательной подстанции без учета постоянных потерь и потерь в вентилях и ошиновке;  $\eta_{\text{г}}$  – нагрузочный КПД генераторов, связанный с выработкой реактивной энергии.

Значение  $\eta_{\text{г}} = 0,995$  можно принять постоянным. Значение  $\eta_{\text{п}}$  находят по величине потерь и перетоков мощности на участках, по которым

проходит поток мощности рассматриваемой преобразовательной подстанции.

Экономический эффект  $\mathcal{E}$  (р./год), определяемый степенью компенсации  $\nu$ :

$$\mathcal{E} = 3S_a \sin^2 \varphi_a \left[ \cos \varphi_a (2\nu - \nu^2)(1 - \eta_{\text{ц}}) / \eta_{\text{ц}} - \nu \right], \quad (11.13)$$

где  $3$  – удельные годовые затраты, р./(кВт·год).

Оптимальная степень компенсации:

$$\nu_{\text{опт}} = 1 - \frac{3Q_a}{3 \frac{1-\eta}{\eta} \sin \varphi_a}, \quad (11.14)$$

где  $3 = S_a \sin \varphi_a \nu$  – приведенные затраты в зависимости от степени компенсации, р./год.

При  $\nu_{\text{опт}} < 0$  компенсация реактивной мощности для данной преобразовательной подстанции неэффективна. Если  $\nu_{\text{опт}} > 0$ , то следует продолжить расчет по определению экономической эффективности компенсации реактивной мощности.

#### 11.4. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Электрохимическими способами обработки материалов условно принято называть группу новых методов электротехнологии, которые применяются для удаления материала с обрабатываемых поверхностей, его переноса, формообразования деталей или структурных преобразований, осуществляемых с помощью электрической энергии, вводимой непосредственно в зону обработки.

В большинстве методов используется преимущественно процесс анодного растворения, т. е. перехода металла, помещаемого в электролизер в качестве анода, из металлического состояния в различные неметаллические соединения. При этом вначале металл анода переходит из металлического состояния в ионное путем отдачи металлом электронов:



где  $n$  – число единичных зарядов.

Затем происходит образование различных металлических соединений, состав которых определяется химическим составом электролита или продуктов электролиза. Для удаления из зоны обработки выпавшего осадка электролиту придается большая скорость движения в межэлектродном промежутке, что позволяет выполнять обработку при повышенных плотностях тока (до сотен ампер на квадратный сантиметр), поскольку при этом происходит интенсивное охлаждение электролита.

При электрохимической обработке (ЭХО) металлов в кислых растворах, когда продукты реакций достаточно хорошо растворимы в электролите, плотности тока относительно невелики ( $2 - 3 \text{ А/см}^2$ ) и обработка производится в стационарном либо медленно перемешиваемом электролите.

По этим признакам операции ЭХО подразделяют на две группы:

- 1) ЭХО при невысокой плотности тока в стационарном электролите;
- 2) ЭХО при высокой плотности тока в проточном электролите.

На рис. 11.4 показана схема электрохимической обработки в стационарном электролите для наиболее типичной операции электролитического шлифования или полирования.

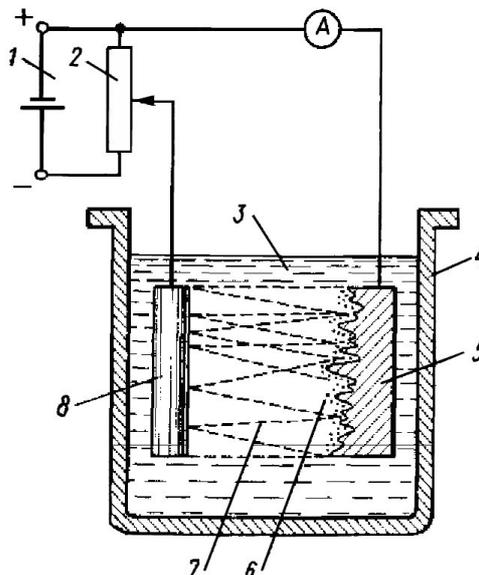


Рис. 11.4. Схема электрохимической обработки в стационарном электролите:

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

При прохождении электрического тока через электролит 3 и электроды 8 и 5 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, сосредоточивая силовые линии тока 7 на незащищенных участках поверхности анода. Выступы растворяются быстрее впадин, в результате чего происходит сглаживание поверхности изделий – ее полирование.

Принципиальная схема процесса ЭХО в проточном электролите (рис. 11.5) работает следующим образом. Обрабатываемую деталь 1 устанавливают относительно электрода-инструмента 2 с зазором, через который прокачивается электролит. Деталь подключена к положительному полюсу и является анодом, а электрод-инструмент – катодом.

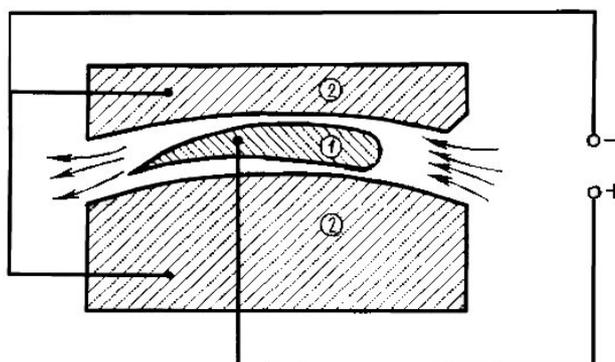


Рис. 11.5. Схема ЭХО в проточном электролите

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.

ЭХО могут проводиться следующие операции:

- очистка поверхности металла анодным травлением от оксидов ржавчины, жировых пленок и других загрязнений. Ее производят путем анодного растворения поверхности изделия;

- заострение и затачивание режущего инструмента, изготовление игл из цилиндрических прутков. Это выполняется за счет создания на режущем лезвии и острие повышенных плотностей тока;

- профилирование металлических заготовок. При этом способе обрабатываемое изделие помещено внутрь катода. Анодное растворение происходит интенсивнее в участках, более близких к катоду;

– гравирование и маркирование по металлам. На изделие, которое является анодом, наносят слой воска, лака или другого изолирующего вещества. Анодное растворение происходит в тех местах, где металл обнажен;

– изготовление сеток, (аналогично электрохимическому гравированию). Сетку-рисунок наносят изолирующим составом на поверхность анода. Она предохраняет металл от растворения. Обнаженные участки внутри лаковой сетки растворяются;

– изготовление листового металла малой толщины путем анодного растворения;

– нанесение металлопокрытий и анодирование. Процесс нанесения металлопокрытий на поверхность изделий методом электролиза называется гальванотехникой. В свою очередь, гальванотехника подразделяется на гальваностегию и гальванопластику;

– гальваностегия – электрохимическое нанесение металлов на металлические изделия с целью повышения их механической прочности, антикоррозионных свойств и декоративных качеств;

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

– анодирование – процесс получения оксидных антикоррозионных покрытий на поверхности металлических изделий из алюминия, магния и их сплавов путем их анодной обработки в соответствующих растворах.

## 11.5. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Электрохимическая обработка (ЭХО), основанная на анодном растворении, ведется на постоянном, импульсном, пульсирующем или 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, осуществление ступенчатого и плавного регулирования выходных величин, а также их стабилизация. Технологические возможности источников питания определяются их внешними характеристиками, которые могут быть жесткими, естественными (слабопадающими) и крутопадающими.

В качестве источников питания в основном используются полупроводниковые выпрямители, регулирующими элементами в которых служат тиристоры.

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

Структурная схема тиристорного источника питания установок ЭХО показана на рис. 11.6.

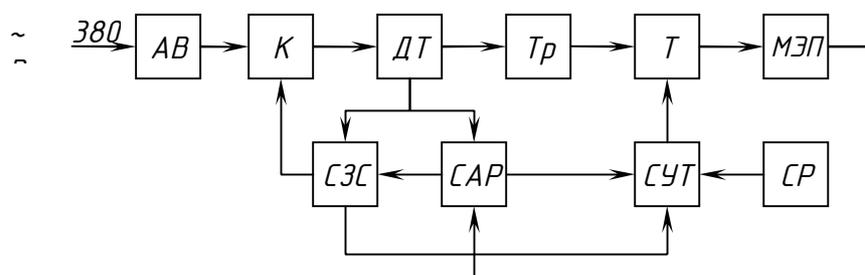


Рис. 11.6. Структурная схема источника питания установок ЭХО

Напряжение сети после срабатывания автоматического выключателя АВ и силового контактора К через датчики тока ДТ подается на силовой трансформатор Тр. Пониженное напряжение поступает на блок тиристоров Т, работой которых управляет система управления тиристорами СУТ. Изменяя подаваемые СУТ сигналы, можно получить различную форму выпрямленного напряжения и тока. Система реверсирования СР обуславливает смену полярности ИП.

При нарушении нормального режима работы установки с датчиков тока ДТ на систему автоматического регулирования САР поступают сигналы, по которым СУТ запирает тиристоры. Команда на отключение силового контактора подается системой защиты и сигнализации СЗС, что приводит к отключению источника питания от сети.

Система автоматического регулирования (САР) стабилизирует напряжение или ток в межэлектродном промежутке. Исполнительным органом САР является магнитный усилитель, обмотки управления которого

питаются от датчиков тока ДТ, межэлектродного промежутка (МЭП) и опорного напряжения. Схема управления тиристорами СУТ подключена к выходу магнитного усилителя.

На рис. 11.7 показаны принципиальные схемы тиристорных источников питания установок ЭХО на токи выше 600 А.

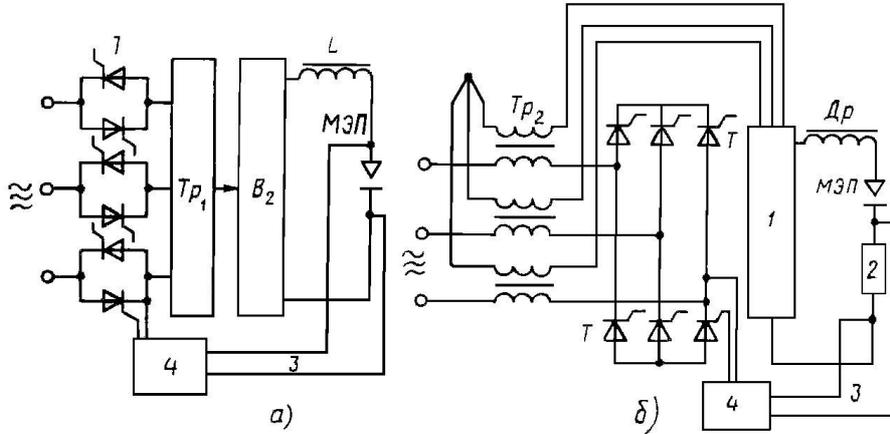


Рис. 11.7. Принципиальная схема тиристорного источника питания установок ЭХО

В схеме рис. 11.7,а используются тиристоры VT на первичной стороне силового трансформатора  $Tr_1$  с неуправляемым выпрямителем  $B_2$  на его вторичной стороне. Тиристоры VT включены в расщелку фаз сети (рис. 11.7, а) или по трехфазной мостовой схеме в разрыв нейтрали звезды на первичной стороне трансформатора (рис. 11.7, б).

Для получения жесткой внешней характеристики источника питания блок 4 управляет тиристорами по сигналам обратной связи 3 по выходному напряжению с межэлектродного промежутка (рис. 11.7, а). Для создания крутопадающей характеристики (рис. 11.7, б) тиристоры VT управляются сигналом обратной связи в функции тока нагрузки. Сигнал поступает в блок управления 4 с резистора 2. Естественная внешняя характеристика выпрямителя 1 получается поддержанием заданного угла ее наклона за счет обратных связей по току и напряжению. Дроссели  $Dr$  включены в цепь для уменьшения пульсаций рабочего тока при тиристорном регулировании.

## ГЛАВА 12. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

### 12.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

Для обработки металлов с высокими механическими свойствами применяется метод размерной обработки при непосредственном использовании теплового эффекта электрической энергии – электроэрозионная обработка (ЭЭО). Она основана на эффекте расплавления и испарения микропорций материала под тепловым воздействием импульсов электрической энергии, которая выделяется в канале электроискрового заряда между поверхностью обрабатываемой детали и электродом-инструментом, погруженным в жидкую непроводящую среду.

Следующие друг за другом импульсные разряды определенной длительности и формы производят выплавление и испарение микропорций металла. Электроэрозионный способ позволяет обрабатывать токопроводящие материалы любой механической прочности, вязкости, хрупкости, получать детали сложных форм и осуществлять операции, не выполняемые другими методами

Процессы, происходящие при ЭЭО, показаны на рис. 12.1. По достижении импульсным напряжением определенного значения между электродом-инструментом 4 и электродом-деталью 1 в диэлектрической жидкости 2 происходит электрический пробой. При этом от электрода, который в данный момент является катодом, отделяется стример 3 и направляется к аноду, ионизируя на своем пути жидкость. В результате этой фазы (ее длительность  $10^{-9} - 10^{-7}$  с) образуется канал сквозной проводимости, и сопротивление межэлектродного промежутка снижается от нескольких мегаом до долей ома (рис. 12.1, а).

Через канал проводимости в виде импульса выделяется электрическая энергии накопленная в источнике питания (рис. 12.1, б). При этом происходит электрический разряд 5, длительность которого составляет  $10^{-6} - 10^{-4}$  с, для которого характерна падающая вольтамперная характеристика. Разряд проходит искровую и дуговую стадии. Благодаря высокой концентрации энергии, в зоне разряда и приэлектродных областях развиваются высокие температуры. Под их воздействием образуется парогазовая полость 7.

В приэлектродных областях 8 происходит плавление и испарение микропорций металла на поверхности электрода. В результате развивающегося давления капли жидкого металла 6 выбрасываются из зоны разря-

да и застывают в окружающей электрода жидкой среде в виде мелких сферических частиц 9 (рис. 12.1, в).

После пробоя электрическая прочность межэлектродного промежутка восстанавливается. Следующий разряд возникает в другом месте между другими неровностями поверхностей электродов. При этом электрод-инструмент получает возможность внедряться в обрабатываемую деталь. Выделяющаяся в столбе разряда энергия расходуется на испарение жидкости и представляет собой потери энергии.

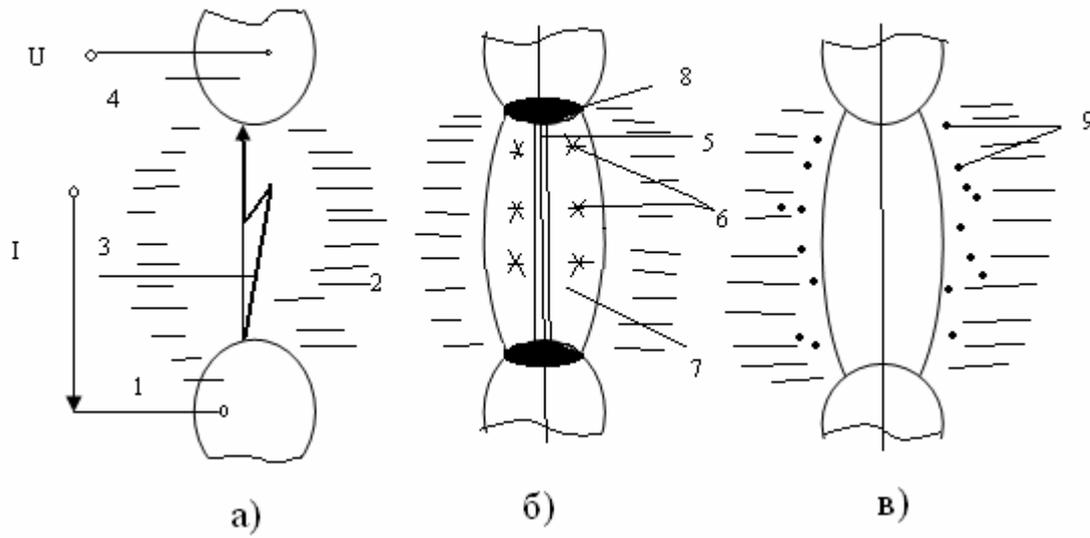


Рис. 12.1. Схема физических процессов в межэлектродном промежутке при электроэрозионной обработке

В месте действия импульса тока на поверхности электродов остаются небольшие углубления – лунки, образовавшиеся вследствие удаления разрядом некоторого количества металла. Параметры лунки (диаметр  $d$  и высота  $h$ ) определяются мощностью импульсного разряда, его длительностью и свойствами материала:

$$d = f(\varphi_a, k, A_{\text{И}}, U_{\text{к}}, U_a); \quad h = f_1(C_p \lambda), \quad (12.1)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала.

Для сохранения электрода-инструмента следует подобрать пару металлов инструмента и изделия, чтобы инструмент не разрушался; подобрать режим работы источника питания или вообще его параметры так, чтобы инструмент оставался целым.

## 12.2. ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ

Параметры импульсных разрядов в значительной мере определяют эффект электроэрозионной обработки металлов.

Поскольку при прохождении тока разряда межэлектродный промежуток имеет малое сопротивление, амплитудные значения тока в импульсах достигают нескольких миллионов ампер, скорость нарастания тока  $\frac{di}{dt}$  – до  $10^8$  А/с. При этом плотность тока в опорных пятнах разряда составляет  $10^{10}$  А/см<sup>2</sup>, а давление в зоне разряда достигает  $10^8$  Н/м<sup>2</sup>.

На рис. 12.2 показана форма импульсов тока при электроэрозионной обработке.

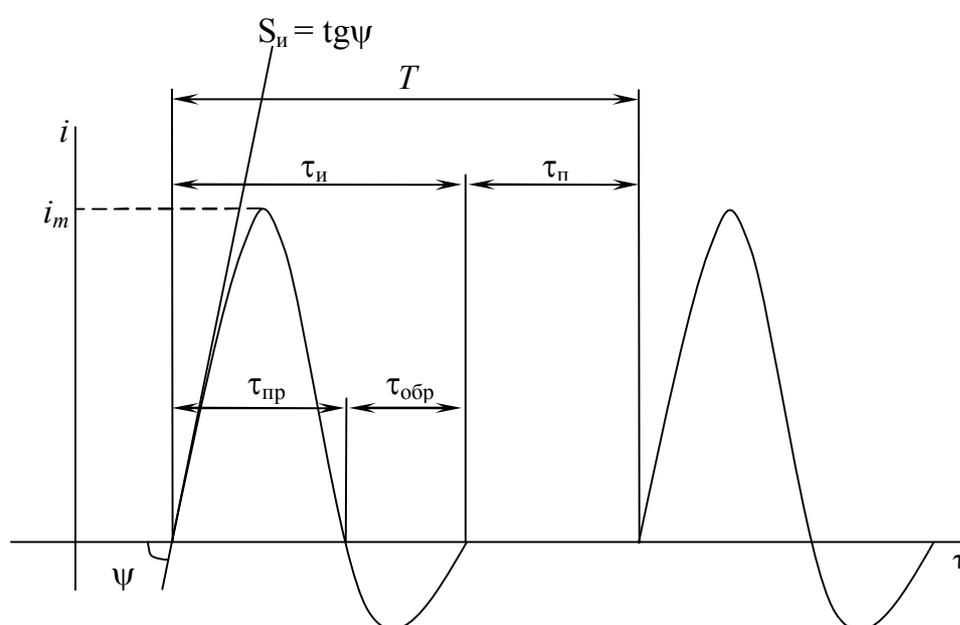


Рис. 12.2. Форма импульсов тока в межэлектродном промежутке

Различают две стадии: рабочую (с импульсом прямой полярности  $\tau_{пр}$ ) и холостую (с импульсом обратной полярности  $\tau_{обр}$ ).

Прямой полярностью импульса считается та его часть, которая вызывает наибольшее разрушение обрабатываемой детали.

Часть импульса, вызывающая разрушение электрода-инструмента, называется обратной полярностью импульса и располагается под осью абсцисс.

Униполярные импульсы – это импульсы, разрушающие только изделие.

Количество импульсов в секунду называется частотой импульсов  $f_{и}$ . Период  $T = 1/f_{и}$ , состоит из длительности импульса  $\tau_{и}$  и паузы между

импульсами  $\tau_{п}$ . Отношение периода импульса к его длительности называют скважностью. Скорость нарастания тока  $\frac{di}{dt}$  называют крутизной импульса  $S_{и}$ ; она равна тангенсу угла наклона касательной к кривой фронта импульса.

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

Средние значения токов и напряжений в импульсе определяют по формулам

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{ср}} &= \frac{1}{\tau_u} \int_0^{\tau_u} i(\tau) d\tau, \\ U_{\text{ср}} &= \frac{1}{\tau_u} \int_0^{\tau_u} u(\tau) d\tau, \end{aligned} \right\} \quad (12.2)$$

где  $i$  и  $u$  – мгновенные значения тока и напряжения.

Действующие значения 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

$$P_{\text{у ср}} = \frac{A}{\tau_u}.$$

### 12.3. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ

Стабильность импульсов тока (постоянство их длительности) зависит от постоянства свойств межэлектродного промежутка и крутизны переднего фронта импульса напряжения. Чем больше эта крутизна, тем стабильнее импульсы тока.

Подвод импульсов энергии к межэлектродному промежутку при ЭЭО можно осуществить по структурной схеме, показанной на рис. 12.3, а.

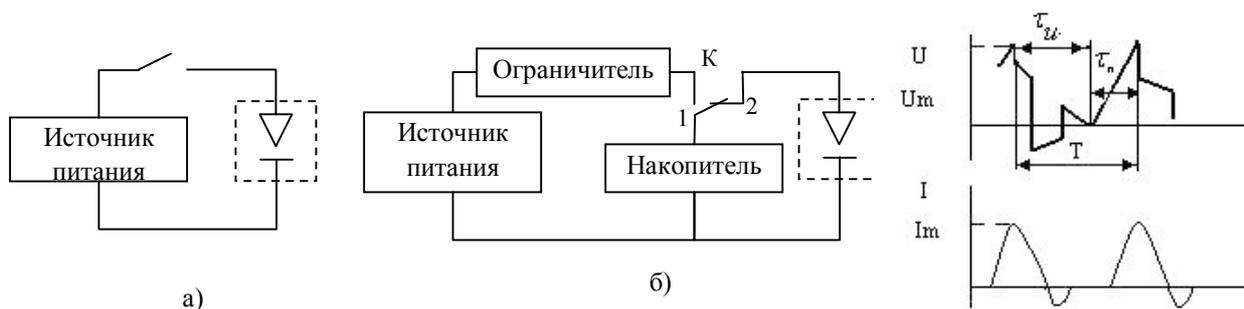


Рис. 12.3. Структурная схема импульсного генератора (ГИ)

В течение времени  $\tau_{\text{н}}$  коммутатор К замкнут и источник питания отдает нагрузке (МЭП) мощность  $P_{\text{и}}$ , которая в  $n$  раз превосходит среднюю мощность за период следования импульсов  $T$ .

Мощность источника питания должна быть равной  $P_{\text{и}} = I_m U_m$ , где  $I_m$  и  $U_m$  – амплитудные значения тока и напряжения в течение импульса. Она расходуется только в промежутке времени  $\tau_{\text{н}}$ .

Если пренебречь потерями в накопителе энергии, то отдаваемая накопителем в МЭП энергия составит  $A = P_{\text{и}} \tau_{\text{н}}$ , а мощность источника  $P = \frac{A}{T} = \frac{P_{\text{и}} \tau_{\text{н}}}{T} = \frac{P_{\text{и}}}{n}$ , т. е. при введении в структурную схему накопителя энергии мощность источника может быть уменьшена в  $n$  раз.

Схема ЭЭО, обеспечивающая импульсную работу с накопителем энергии, приведена на рис. 12.3 б.

В течение паузы  $\tau_{\text{п}}$  коммутатор К находится в положении 1 и через ограничитель тока накопителем от источника питания потребляется мощность  $\frac{P}{n}$ . Накопитель при этом запасает энергию  $A = P_{\text{и}} \tau_{\text{н}}$ , которая при переключения коммутатора К на время импульса  $\tau_{\text{н}}$  в положение 2 отдает мощность  $P_{\text{и}} = \frac{A}{\tau_{\text{н}}}$ .

Работа по этой схеме дает возможность трансформировать мощность источника  $P = \frac{P_{\text{и}}}{n}$  в мощность, которая расходуется на нагрузке.

Импульсные генераторы (ГИ) различают по принципу действия, конструкции и параметрам импульсов. ГИ условно подразделяют на зависимые, ограниченно зависимые и независимые. В первых из них парамет-

ры генерируемых импульсов определяются физическим состоянием межэлектродного промежутка. В независимых генераторах импульсы не связаны с состоянием МЭП.

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. 12.4). В процессе их разрядки расходуется энергия, накопленная в реактивных элементах цепи (конденсаторе или индуктивной катушке).

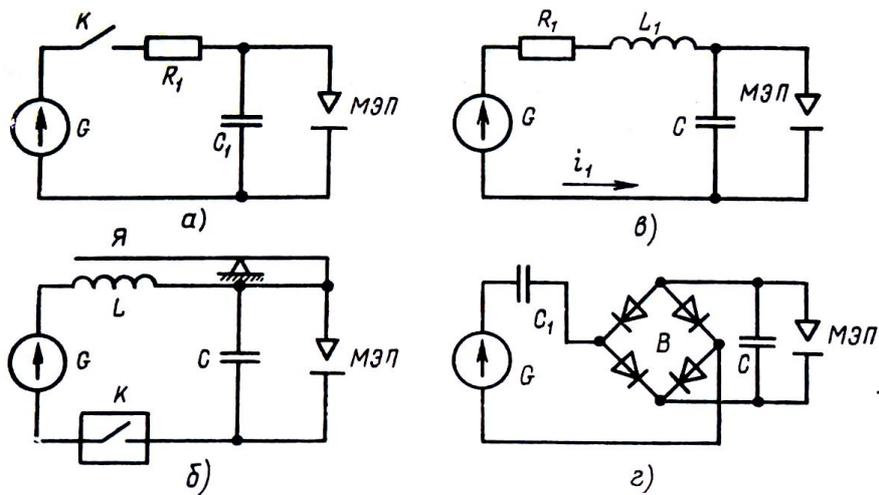


Рис. 12.4. Схема импульсных релаксационных генераторов

RC-генератор импульсов (рис. 12.4, а) состоит из последовательно соединенных источника питания  $G$ , ключа  $K$ , токоограничивающего сопротивления  $R_1$  и накопительного конденсатора  $C_1$ , подключенного параллельно МЭП.

Емкостный накопитель заряжается от источника питания через ограничивающее сопротивление  $R_1$ , благодаря чему зарядный ток много меньше тока импульса  $I_{и}$ . Ток зарядки конденсатора определится из соотношения

$$i_1 = \left( \frac{dU_c}{d\tau} \right) \cdot C.$$

Напряжение на конденсаторе

$$u_c = \frac{1}{C} \int_0^{\tau} i_1 d\tau + U_{co},$$

где  $U_{co}$  – начальное напряжение на конденсаторе в момент  $\tau = 0$ . К концу зарядки напряжение  $u_c$  будет равно напряжению источника питания. Раз-

рядка происходит в течение времени  $\tau_{и} = \frac{T}{n}$ . В случае большой скважности импульсов среднее значение разрядного тока во время прохождения импульса  $\tau_{и}$  в  $n$  раз больше тока зарядки, поэтому емкостный накопитель является по существу трансформатором тока.

В индуктивном накопителе скорость нарастания тока в индуктивности определяется ее значением и приложенным напряжением. Требуемая сила тока  $I_{и}$  может быть получена и при малых значениях падения напряжения на индуктивности  $u_L \ll u$ , т. е. индуктивный накопитель также можно рассматривать как трансформатор тока.

В процессах ЭЭО более широко применяются генераторы с емкостным накопителем, поскольку индуктивный накопитель уступает емкостному по энергетическим показателям.

Схема импульсного  $LC$ -генератора показана на рис. 12.4, б. Зарядный ток проходит к конденсатору  $C$  от источника питания  $G$  через обмотку вибратора  $L$ . Вначале он притягивает якорь  $Я$  электромагнитного вибратора и увеличивает межэлектродный промежуток, 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. 12.4, в) работают при более низком напряжении, чем  $RC$ -генераторы, т. к. при наличии резонанса между индуктивностью и емкостью напряжение на конденсаторе-накопителе оказывается больше напряжения источника питания.

Заряд конденсатора может проходить по экспоненциальному либо по колебательному закону.

Колебательный процесс возникает при  $(R^2_1/4L_1) - (1/L_1C) = 0$ . В таком режиме работы зарядной цепи напряжение на конденсаторе в конце зарядного периода  $\tau_{зар}$  равно почти удвоенной ЭДС. В действительности максимальное напряжение, до которого может зарядиться конденсатор, зависит от отношения  $R_1/(2L_1)$ .

В ЭЭО применяется также СС-генератор импульсов (рис. 12.4, 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. Частотные свойства СС-генератора определяются в основном частотными характеристиками диодов выпрямителя В.

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

Для питания устройств ЭЭО существуют статические ГИ, регулирующие временные и энергетические параметры в широком диапазоне при отсутствии накопительных элементов. В них легко формируются прямоугольные и униполярные импульсы. По способу генерирования их подразделяют на генераторы с независимым возбуждением, автогенераторы и инверторы.

Конструктивно они выполнены в основном на транзисторных или тиристорных полупроводниковых приборах.

Структурная схема широкодиапазонного генератора импульсов показана на рис. 12.5. Она включает в себя источник питания, силовые блоки, число которых может быть равно 6, с разделительным диодом  $D$ , блок поджига, задающий генератор, предварительный усилитель мощности, рабочий промежуток (МЭП), блок защиты от коротких замыканий. В состав силовых блоков и блока поджига включены силовые транзисторы, работающие в ключевом режиме и переключающиеся синхронно от задающего генератора. При включении транзисторов от блока поджига подается маломощный импульс. Он способствует пробоем промежутка и формированию низковольтного разряда. До пробоя разделительный диод  $D$  заперт. После пробоя напряжение на промежутке снижается до 40 – 25 В, диод  $D$  открывается и через промежуток проходит импульс тока, значение которого определяется количеством включенных параллельно силовых блоков. Их синхронное выключение прерывает разряд. При коротком замыкании электродного промежутка МЭП все транзисторы силовых блоков отключаются. Подача импульсов к электроэрозионному промежутку возобновляется после ликвидации короткого замыкания.

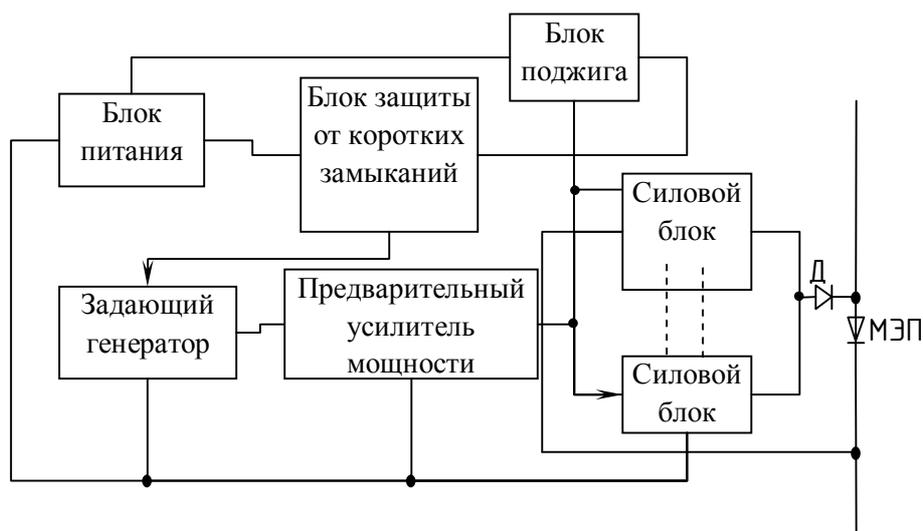


Рис. 12.5. Структурная схема широкодиапазонного генератора импульсов

Для ЭЭО металлов импульсами больших энергий с частотой 50 – 100 Гц используют статические генераторы импульсов – трансформаторы промышленной частоты с вентилем.

Импульсы энергии длительностью до миллисекунд получают с помощью ГИ, которые по принципу работы подразделяют на коммутаторные и индукторные генераторы.

#### 12.4. РАЗНОВИДНОСТИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ И ЕЁ ОБОРУДОВАНИЯ

Электроэрозионная обработка может осуществляться профилированным или непрофилированным электродом-инструментом (ЭИ). В первом случае его размеры и форма рабочих поверхностей определяются в соответствии с заданной поверхностью изготавливаемой детали. Во втором – электрод-инструмент имеет простейшую конфигурацию (проволока, диск или стержень), а его размеры лишь частично связаны с размерами электрода-детали.

Формообразование обрабатываемой детали электроэрозионным методом можно осуществить по трем схемам.

1. Копирование формы ЭИ, представляющего собой обратное отображение формы детали. При этой схеме обработки путем поступательного движения ЭИ внедряется в заготовку по мере удаления металла под

воздействием импульсов электрической энергии. Точность формы получаемой детали в этом случае зависит от точности изготовления ЭИ и его износа.

2. Взаимное перемещение заготовки и ЭИ по определенному закону. Схема формообразования имеет сходные черты с рядом процессов механической обработки. Съем металла с заготовки, в отличие от механических процессов, осуществляется за счет эрозии удаляемого металла под действием подводимых импульсов электрической энергии.

3. Сочетание обеих схем формообразования.

Наибольшее распространение получила первая схема, а выполняемые с ее помощью операции называют копировально-прошивочными, например прошивание круглых отверстий. Ее частным случаем является прошивание отверстий с криволинейной осью. Принципиальные схемы проведения этих операций показаны на рис. 12.6, а, б.

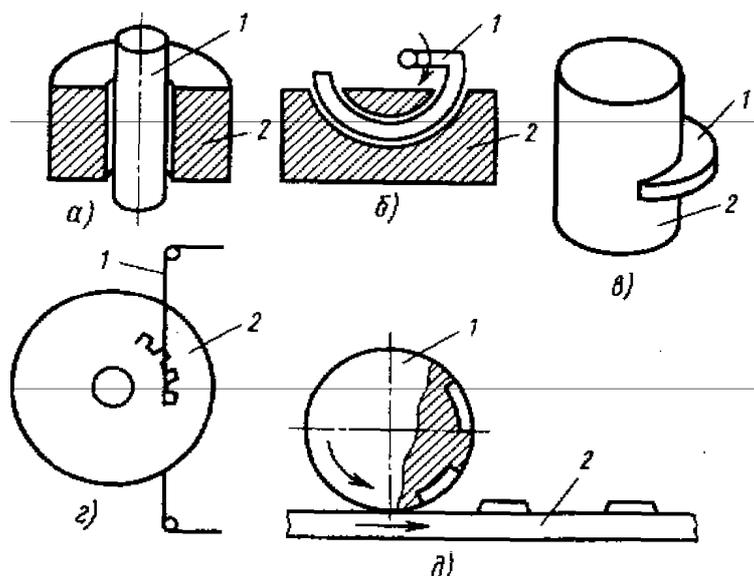


Рис. 12.6. Схема электроэрозионной обработки:  
1 – электрод-инструмент; 2 – электрод-изделие

Последнюю из этих операций производят аналогично первой, но ЭИ, являющийся катодом, имеет криволинейную форму, повторяемую в изделии.

По второй технологической схеме ЭЭО проводят резание с использованием в качестве электрода-инструмента металлического диска или проволоки (рис. 12.6, в, г). Обработка проволочным ЭИ позволяет вырезать сложноконтурные детали высокой точности.

Операции третьей схемы электроэрозионной обработки получили наименьшее распространение. Они используются при обкатке (рис. 12.6, д), электроэрозионной правке фасонных электроалмазных кругов, образовании в стальных роликах узких канавок и т. д.

## 12.5. ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ ОБРАБОТКА

Электроконтактная обработка (ЭКО) применяется для съема материала с электропроводной заготовки. В этом виде обработки используется электроэрозионный принцип формообразования, поэтому для ЭКО справедливы многие закономерности ЭЭО.

Схема простейшего устройства для ЭКО показана на рис. 12.7. Напряжение  $U_c$  от промышленной сети поступает на трансформатор 1. С его вторичной обмотки напряжение  $U$  с амплитудой до 40 В подается на два электрода, один из которых (диск 2) выполнен из электропроводного материала, второй – листовая заготовка 3. Дисковый ЭИ вращается от приводного двигателя с частотой  $n$ . Механическими средствами создается прижимающая диск к заготовке сила  $G_{пр}$ . Кроме вращения, диску сообщается поступательное движение вдоль обрабатываемой поверхности со скоростью  $V_{ин}$ . Межэлектродный промежуток заполнен непроводящей рабочей средой – воздухом, жидкостью, газожидкостной смесью.

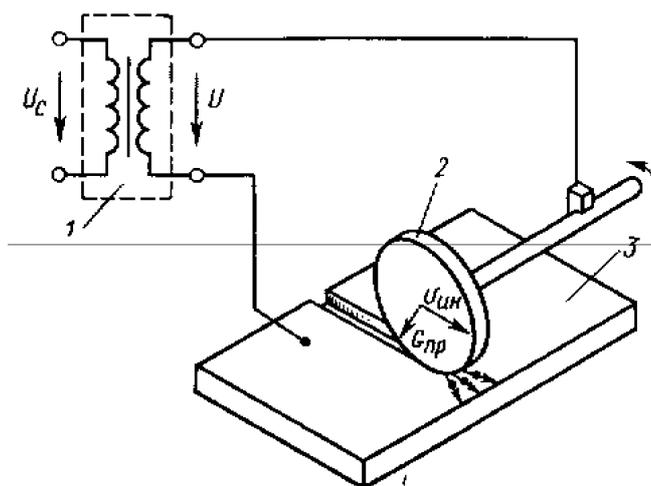


Рис. 12.7. Схема электроконтактной обработки

Электроды в общем случае подвергаются одновременно механическому и электрическому воздействию. Мощность электрического воздействия –  $UI \cos \varphi$ , где  $U$  и  $I$  – действующие значения напряжения и тока.

Мощность механического воздействия –  $2\pi M_c n / 60$ , здесь  $M_c$  – момент сопротивления на валу ЭИ;  $M_c = G_c r_d$ ,  $G_c$  – сила сопротивления;  $r_d$  – радиус диска. Значение  $G_c$  определяет силу трения, и тогда  $G_c = \kappa_{тр} G_{пр}$ , где  $\kappa_{тр}$  – коэффициент трения между электродами.

Суммарная мощность, поступающая в МЭП:

$$P = UI \cos \varphi + \left( \frac{2\pi}{60} \right) n G_{пр} \kappa r_d.$$

В зависимости от соотношения между мощностями осуществляются различные режимы ЭКО. Если механическая мощность превосходит электрическую, то энергия в МЭП вводится в основном за счет трения и ЭКО носит преимущественно механический характер. При высоких напряжениях и незначительной механической силе  $G_{пр}$  ЭКО присущи черты электроэрозионного процесса. В последнем случае электрическая энергия превращается в тепловую вследствие возникновения джоулевой теплоты в области кратковременного электрического контакта между участками электродов.

При низких напряжениях (1 – 2 В) преобладающим является механическое трение. При напряжении 2 – 10 В электрическая энергия превращается в тепловую благодаря контактному сопротивлению (электрические разряды при этом отсутствуют). При напряжении выше 10 В процесс приобретает чисто электроэрозионный характер, поскольку напряжение достаточно для возникновения дугового разряда без соприкосновения электродов друг с другом.

Последнюю разновидность ЭКО, в которой можно пренебречь ролью механических и контактных явлений, часто называют электроконтактно-дуговой обработкой.

Для ЭКО мощность применяемых трансформаторов составляет 30 – 500 кВ·А, при напряжении на вторичной обмотке 30 – 70 В (марки СТЭ-Э4, ТСД-10-3, ТК-16-31, ТСУ-120/05 и ряд специальных типов). Токи в станках для ЭКО достигают 15 кА при достаточно высоких напряжениях.

## ГЛАВА 13. ЭЛЕКТРОХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Под электрохимико-механической обработкой понимают процессы обработки металлических деталей в электролитах в совокупности с механическими и электроэрозионными процессами.

Различают анодно-абразивную и анодно-механическую обработку.

### 13.1. АНОДНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Этот тип обработки основан на анодном растворении и механическом (абразивном) воздействии на обрабатываемое изделие. При этом на поверхность электрода-заготовки (ЭЗ) могут воздействовать: электрический ток, обеспечивающий анодное растворение; механическая сила, создаваемая частицами абразива, режущими или царапающими поверхность ЭЗ, тепловой поток, приводящий к тепловой эрозии поверхностных слоев ЭЗ.

Схема МЭП при анодно-абразивной обработке (ААО) показана на рис. 13.1, а, б. Электрод-инструмент, поверхность которого со скоростью  $V_{и}$  движется вдоль поверхности ЭЗ, подключен к отрицательному полюсу, а к положительному полюсу подключен ЭЗ. МЭП заполняется раствором электролита.

Приложенная к ЭИ извне сила  $G$  поджимает его к ЭЗ, но так, чтобы между обоими телами не было обширного контакта, и их электропроводные поверхности оказались разделенными зазором  $a_{\min}$ . При этом через МЭП проходит ток  $I$ , а расходуемая на обработку электрическая мощность  $P = UI$ , где  $U$  – напряжение источника питания.

Внешняя сила  $G$  вызывает силу трения  $G_{\text{тр}}$ , которая приложена к поверхности ЭИ, движущегося со скоростью  $V_{и}$ . Таким образом, для обработки детали затрачивается также и механическая энергия  $A = V_{и}G_{\text{тр}}$ .

При ААО удаляются выступы 5 на ЭЗ (рис. 13.1, а). Во впадинах материал снимается менее интенсивно.

Снятое с поверхности ЭИ вещество может находиться в трех состояниях: химически связанном с составляющими электролита (как при ЭХО), в виде застывших капель металла (как при ЭЭО) и в виде металлических сколотых частиц. Каждое из состояний соответствует одному из уже упо-

мянутых воздействий. Менять роль любого из воздействий можно подбором режима.

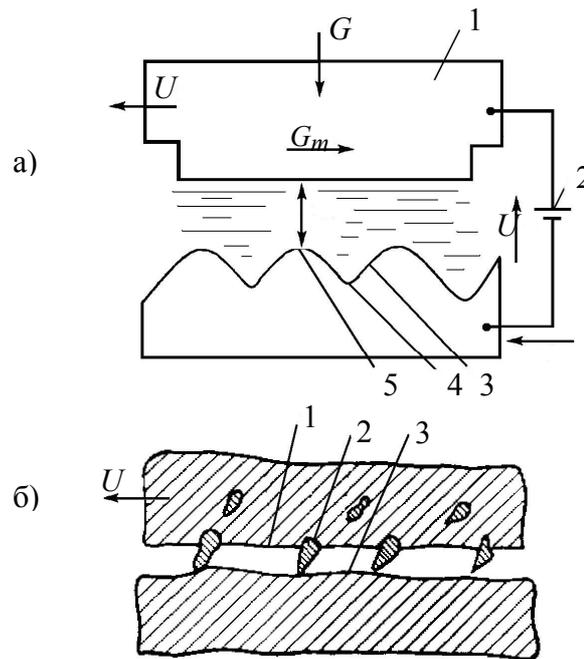


Рис. 13.1. Схема межэлектродного промежутка при анодно-абразивной обработке:

- 1 – электрод-инструмент (ЭИ);
- 2 – источник постоянного тока;
- 3 – электрод-заготовка (ЭЗ); 4 – раствор электролита;
- 5 – межэлектродный промежуток (МЭП)

Интенсивное снятие металла с микровыступов обеспечивается подбором электрического и механического режимов, применением ЭИ, изготовленного из различных абразивных материалов, а также созданием рабочих сред различного состава.

Ускорить обработку микровыступов можно подбором таких режимов, при которых плотность тока на выступах больше, чем во впадинах.

Напряжение на столбе электролита для параллельного МЭП определяется по закону Ома:

$$U_{\text{ст}} = \frac{ja}{\sigma_p}, \quad (13.1)$$

где  $j$  – плотность тока в МЭП,  $a$  – межэлектродное расстояние;  $\sigma_p$  – средняя электропроводность электролита.

Средняя кажущаяся плотность тока:

$$j_{\text{ср}} = \frac{I}{F_3}, \quad (13.2)$$

где  $F_3$  – площадь обрабатываемой поверхности ЭЗ.

В процессе ААО либо частицы абразива вводят в электропроводный материал дискового ЭИ, либо в качестве электролита применяют раствор, содержащий абразивные частицы.

В первом случае (рис. 14.1, б) зерна абразива 2 выходят из электропроводной связки рабочей поверхности ЭИ 1, выполненного в виде диска. Они обеспечивают некоторый минимальный зазор между электропроводными поверхностями электродов, механически счищают микровыступы на поверхности ЭЗ, а также способствуют подаче в зону обработки свежего электролита. При таком способе ААО ведут при малом зазоре между электропроводными поверхностями анода и катода.

Во втором случае, когда частицы абразива подаются вместе с электролитом, электроды разносятся на большее расстоянии друг от друга. В результате движения абразивных частиц относительно ЭЗ пассивирующая пленка удаляется преимущественно с микровыступов на поверхности ЭЗ, вследствие чего металл в этих местах быстро растворяется и зазор между электродами увеличивается, что приводит к снижению плотности тока и падению производительности. Поэтому такой вид ААО применяется лишь для улучшения качества поверхности ЭЗ.

## 13.2. АНОДНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Анодно-механическая обработка (АМО) основана на одновременном использовании электроэрозионных и электрохимических процессов, происходящих в заполненном электролитом МЭП между ЭИ и ЭЗ.

При этом виде обработки в МЭП происходит образование нерастворимых соединений элементов металла заготовки с анионами электролита. Такой процесс обеспечивается применением в качестве электролита водного раствора жидкого стекла.

Ионы железа, переходящие в раствор благодаря анодному растворению, соединяются с силикат-анионами и образуют нерастворимое соединение, выпадающее на ЭЗ в виде пленки (рис. 13.2).

Формообразование при АМО происходит в основном за счет удаления микровыступов с поверхности ЭЗ термоэрозионным способом.



Внутри самого микровыступа плотность тока больше, чем на его поверхности, благодаря свойствам электрического поля в выступе. Мощность, выделяющаяся в местных объемных источниках энергии, достаточна для микровзрывов выступов. В основании микровыступа материал плавится.

Тепловой взрыв приводит к термоэрозионному съему материала с выступа к образованию лунки (впадины), на дне которой обнажается покрытый пленкой металл. После остывания лунки и заполнения ее электролитом на поверхности лунки идет кратковременное анодное растворение, заканчивающееся образованием непроводящей пленки. Этот процесс повторяется снова, когда поверхность лунки вновь окажется выступом.

В процессе АМО одновременно с термоэрозионным разрушением детали может иметь место электрическая эрозия электрода - инструмента. При определенном напряжении (более 20 – 25 В) возможно образование дугового разряда, разрушающего пассивную пленку или сами микровыступы, вместо которых образуются лунки. Длительность протекания электрических разрядов невелика, поскольку они механически прерываются благодаря высокой скорости движения поверхности ЭИ.

В процессах формообразования с применением совмещенной электроэрозионно-химической обработки (ЭЭХО) удаление металла происходит благодаря анодному растворению и электроискровой эрозии ЭЗ в потоке электролита, прокачиваемого через МЭП. Для предотвращения шлакования и повышения мощности обработки диэлектрические углеродсодержащие жидкости заменяют водными растворами, имеющими к тому же большую теплопроводность.

Схема такого вида обработки показана на рис. 13.3. Electroды включаются на прямую полярность. На электроды, разделенные МЭП, подается напряжение  $U$  от источника питания. Электролит (например водный раствор хлористого натрия) подается через отверстие в ЭИ. Раствор в МЭП обладает определенной диэлектрической прочностью. Его пробой наступает при определенном значении напряжения  $U_{пр}$ .

При мгновенном напряжении  $u$ , меньшем  $U_{пр}$ , формообразование заготовки обусловлено исключительно анодным растворением. Если же  $u \gg U_{пр}$ , то происходит пробой МЭП, а в том месте, где его диэлектрическая прочность наименьшая, образуется канал разряда 5, заполненный плазмой. На ЭЗ в зоне электродного пятна происходит расплавление вещества, образование лунки и выброс расплава из нее.

Вне парогазовой полости, которая образуется вокруг электрического разряда, металл переходит в раствор в ионной форме.

Таким образом, при ЭЭХО удаленный с ЭЗ металл существует в виде застывших капель расплава (как при ЭЭО) или в виде образующих шлак нерастворимых соединений (как при ЭХО). После того как мгновенное значение  $u$  становится меньше напряжения горения дугового разряда, последний прерывается и формообразование протекает как при ЭХО до тех пор, пока мгновенное напряжение вновь не превысит значения пробивного напряжения.

Описанные два механизма удаления металла совмещаются лишь во времени, но не в пространстве. Причем одновременно они могут происходить только на разных участках ЭЗ.

### 13.3. ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Источниками питания установок ЭХМО могут быть генераторы постоянного тока, двухполупериодные выпрямители, импульсные генераторы и т. д.

В источниках питания ЭХМО по сравнению с источниками питания (ИП) электрохимической обработки в меньшей мере сказывается влияние коротких замыканий, поскольку электроды быстро перемещаются относительно друг друга. Это упрощает конструкцию ИП и делает их более надежными в работе.

Источник питания установок анодно-механической обработки (АМО) для отрезных операций (рис. 13.4) включает в себя трансформатор  $Tr$ , первичная обмотка которого включена звездой. Предусмотрено ступенчатое регулирование выпрямленного напряжения с помощью переключателя  $\Pi$  в каждой из фазных обмоток.

Шесть секций вторичной обмотки включаются по шестифазной схеме выпрямления вместе с уравнительным реактором УР. Ввод команды в блок автоматической подачи ЭИ осуществляется по цепи, включающей трансформатор ДТ, выпрямитель Д и настроечный резистор R. Трансформатор ДТ фактически является магнитным усилителем с последовательно включенными обмотками, питаемыми переменным током через выпрямитель Д. Обмоткой управления является выходная шина источника питания. Реле тока и автоматический выключатель В обеспечивают защиту от перегрузок и коротких замыканий. В процессе обработки напряжение пи-

тания не регулируется, что повышает требования к жесткости и устойчивости его внешней характеристики.

Конструкции современных станков ЭХМО включают в себя устройства для вращения ЭИ и пневматические зажимы для закрепления ЭЗ. Диски ЭИ снабжены направляющими для уменьшения ширины реза. Станки снабжены вентиляцией и устройством промывки горячей водой для полного удаления жидкого стекла.

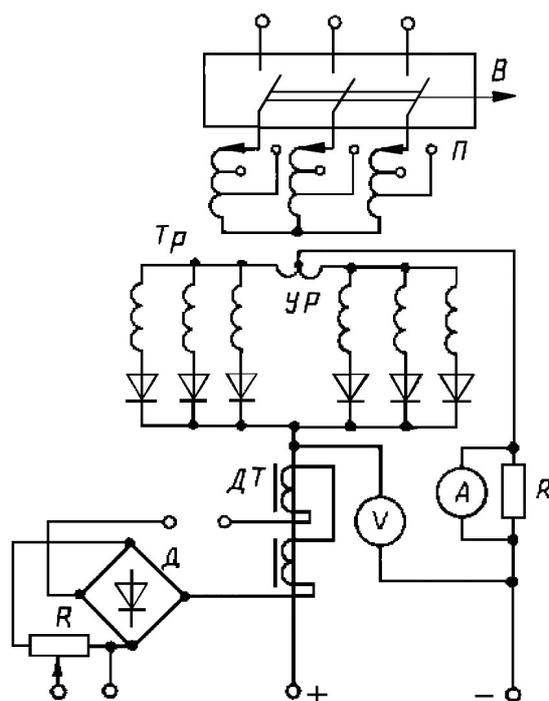


Рис. 13.4. Схема источника питания установки анодно-механической обработки

## РАЗДЕЛ V. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

### ГЛАВА 14. УСТАНОВКИ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

#### 14.1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Магнитоимпульсная обработка металлов (МИО) – это способ пластической деформации металлов и их сплавов, осуществляемый при прямом преобразовании электрической энергии в механическую непосредственно в самом обрабатываемом изделии.

Физическими основами МИО являются электродинамические силы, возникающие в проводящем теле, помещенном в переменное электромагнитное поле. Предположим, что из металлического тела (рис. 14.1) выделяется элементарный объем  $dv$  высотой  $dh$ , шириной  $dr$  и длиной  $dl$ , через который проходит элемент тока  $dI$ .

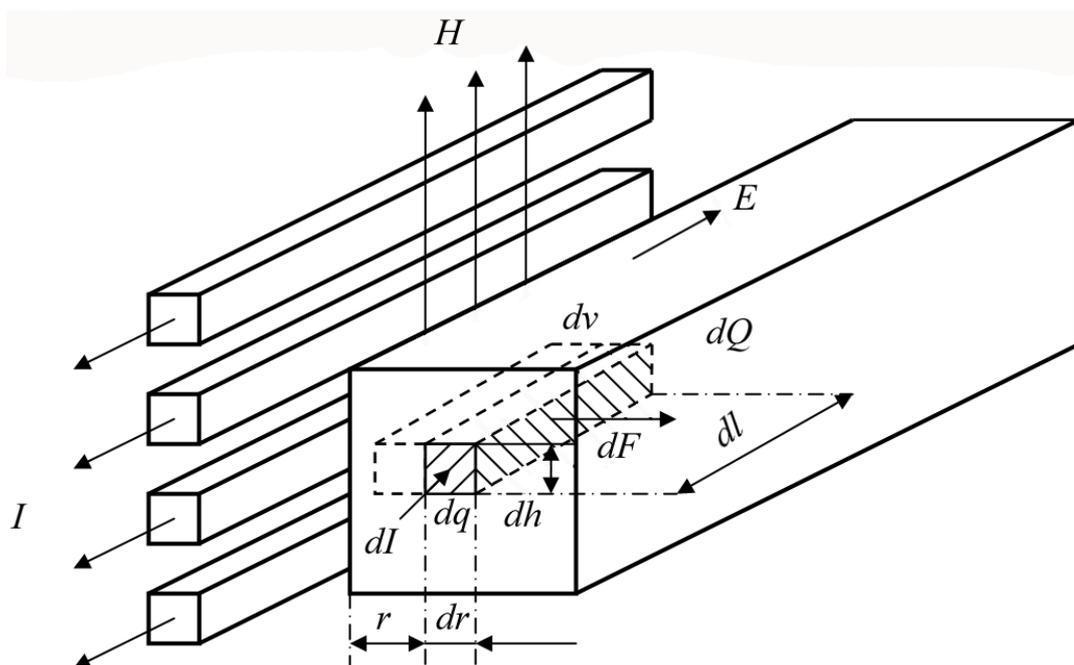


Рис. 14.1. Электродинамические силы в проводящем теле,  
помещенном в индуктор с переменным током

К элементу объема приложено механическое усилие  $dF$ , называемое электродинамической силой:

$$dF = dI[dl B], \quad (14.1)$$

где  $B = \mu H$  – магнитная индукция.

Если по индуктору проходит переменный синусоидальный ток, то средняя за период электродинамическая сила

$$dF = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{dI[dl B]\}. \quad (14.2)$$

Символ  $\operatorname{Re}$  указывает на использование действительной составляющей комплексного выражения. Элемент тока  $dI = jdq$ , где  $j$  – плотность тока в данной точке;  $dq$  – поперечное сечение элемента тока. Так как  $j = \sigma E$ , то

$$dI = \sigma E dq, \quad B = \mu_a H. \quad (14.3)$$

Запишем в общем виде выражение для удельной электродинамической силы, приложенной к единице объема проводника  $F_{\text{уд}} = \frac{dF}{dv}$ :

$$F_{\text{уд}} = \mu_a S \sigma, \quad (14.4)$$

где  $S = \left(\frac{1}{2}\right)[EH]$  – поток энергии.

Отсюда следует, что направление электродинамических усилий совпадает с направлением потока энергии в данной точке.

Электродинамические усилия создают в каждой точке металла давление, которое может быть найдено из формулы для  $F_{\text{уд}}$ . Так, если в точке, где проходит элементарный ток  $dI$ , имеет место удельная сила  $F_{\text{уд}}$ . Это значит, что к элементарному объему  $dv = dldq$  приложено бесконечно малое усилие  $dF = F_{\text{уд}} dv$ . Бесконечно малое давление, создаваемое этим усилием, равно его отношению к площади  $dQ$  (рис. 14.1):

$$dp_{\text{сж}} = \frac{dF}{dQ} = F_{\text{уд}} \frac{dv}{dQ} = F_{\text{уд}} dl.$$

В данной точке давление складывается из элементарных давлений создаваемых во всех элементах  $dv$ , лежащих между рассматриваемой точкой и поверхностью металла (со стороны индуктора). Поэтому давление, обусловленное электродинамическими силами:

$$p_{сж} = \int_0^{\gamma} F_{уд} dr \quad \text{или} \quad p_{сж} = \mu_a \sigma \int_0^{\gamma} S dr. \quad (14.5)$$

Для определения  $F_{уд}$  и  $p_{сж}$  в конкретных случаях в уравнение (14.5) подставляется соответствующее значение  $S$ . Возникающие электродинамические усилия и обусловленные ими давления сжимают металлическое тело и могут вызвать деформации его стенок.

Принципиальная схема установки МИО приведена на рис. 14.2. Она включает в себя зарядное устройство, батарею конденсаторов 3 – накопитель энергии, коммутирующее устройство 4 и индуктор 6.

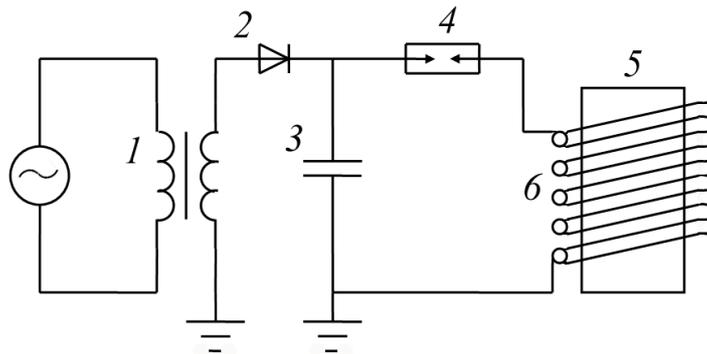


Рис. 14.2. Принципиальная схема электрической цепи установки для магнитоимпульсной обработки металлов

Батарея 3 заряжается через выпрямительное устройство 2 от источника питания 1. По окончании зарядки батарея с помощью коммутирующего устройства 4 замыкается на индуктор 6. Проходящий по индуктору ток создает магнитный поток, который пересекает металлическое изделие 5 и создает в нем вихревые токи.

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

Энергия, выделяемая в цепи  $L$  и  $R$  при разряде конденсатора, определяется выражением

$$W_{разр} = LI^2 / 2 + RI^2 \tau. \quad (14.6)$$

Поскольку

$$R \ll L, \quad W_{разр} = 0,5I^2(L_{уст} + L_{инд}),$$

где  $L_{уст}$  – индуктивность установки (батареи конденсаторов, ошиновки и разрядника);  $L_{инд}$  – индуктивность индуктора.

Электромагнитная энергия (14.6), выделяющаяся в цепи, расходуется на механическую работу деформации заготовки, нагрев заготовки и проводников цепи и частично рассеивается в пространстве.

Эффективность использования энергии батареи определяется по формуле:

$$\eta = W_{\text{инд}} / W_{\text{разр}} = L_{\text{инд}} / L ,$$

где  $L = L_{\text{инд}} + L_{\text{уст}}$ .

Полное давление на заготовку ( $\text{кг}/\text{см}^2$ ), обусловленное плотностью энергии электромагнитного поля определяется выражением

$$P = B^2 \cdot 10^{-6} / (8\pi), \quad (14.7)$$

где  $B$  – индукция магнитного поля.

При невысокой скорости нарастания магнитного поля и значительной длительности импульса оно может проникнуть за заготовку и вызвать противодействие, ослабляющее результирующее давление. Длительность импульса не должна превышать время деформации заготовки

$$\tau_{\text{деф}} = 2\sqrt{\varepsilon\delta} / v ,$$

где  $\varepsilon$  – перемещение стенки трубчатой заготовки в направлении обжатия, см;  $\delta$  – толщина стен заготовки;  $v$  – скорость перемещения стенки, см/с.

Скорость перемещения стенки заготовки при деформации:

$$v = \left[ \frac{B^2}{4\pi\gamma} \right]^{1/2} ,$$

где  $\gamma$  – плотность материала заготовки,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

## 14.2. ЭЛЕМЕНТЫ ОБОРУДОВАНИЯ МАГНИТОИМПУЛЬСНЫХ УСТАНОВОК

Установки для магнитоимпульсной обработки (МИО) состоят из двух основных узлов: подготовительного (накопление энергии и формирование импульсного напряжения и тока) и исполнительного – технологического. К первому узлу относятся генераторы импульсных токов, ко второму – индукторы и связанная с ними технологическая оснастка.

На рис. 15.3 показана функциональная электрическая схема установки МИО. Батарея – накопитель энергии 1 – заряжается от зарядного устройства 3 до требуемого напряжения. По накоплению заданного количества энергии батарея разряжается в импульсном режиме на рабочий индуктор 9 через коммутатор 10 и токопровод 11.

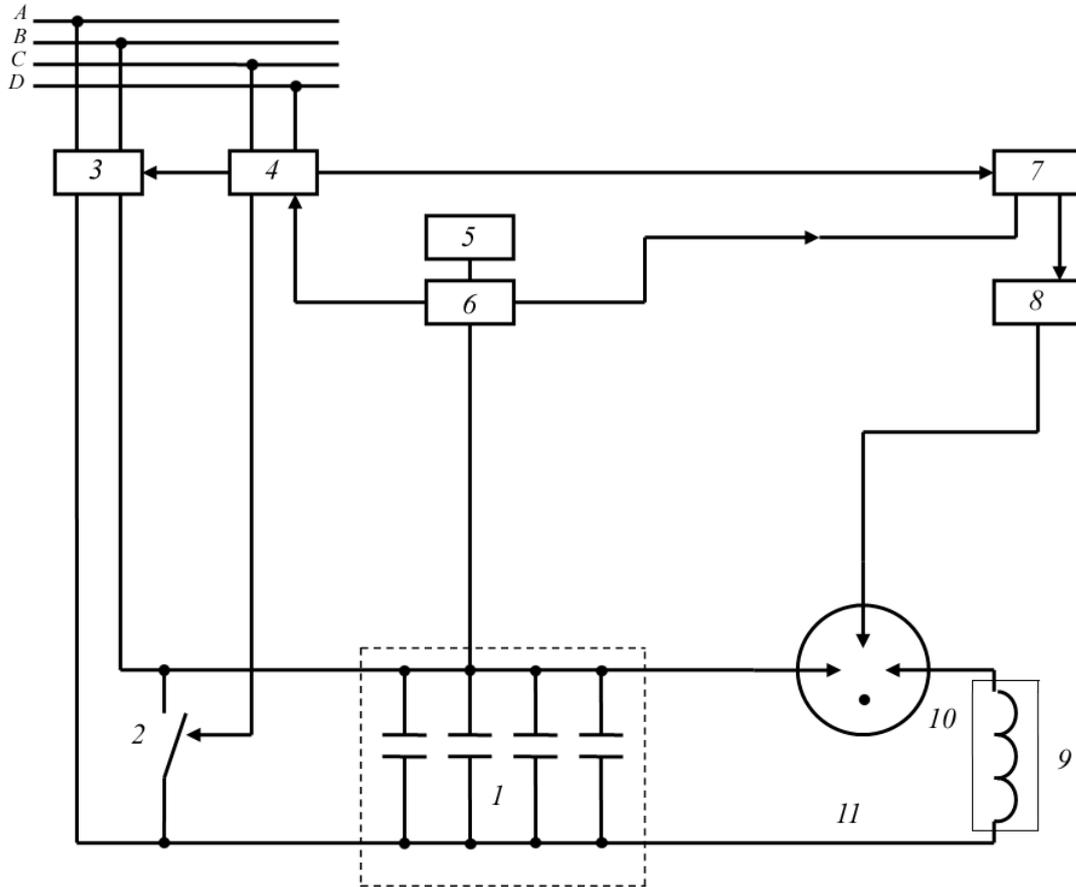


Рис. 14.3. Функциональная схема установки магнитоимпульсной обработки

В функции устройства 4 входит управление, контроль и сигнализация. Поджигающее устройство 8 подает команду на включение коммутатора 10. Командный датчик 5 и делитель напряжения 6 регулируют значение запасаемой энергии в автоматическом режиме работы. По достижении установленного напряжения зарядки блок автоматики 7 подает импульсы на включение поджигающего устройства. Снятие остаточного напряжения с накопителя энергии и блокировку осуществляет короткозамыкатель 2.

*Генераторы импульсных токов* преобразуют электрический ток промышленной частоты в импульсы токов большой амплитуды при разряде мощной батареи. Основными элементами генератора являются зарядное устройство, батарея конденсаторов, коммутирующее и поджигающее устройства.

В состав *зарядного устройства* входят повышающий трансформатор, высоковольтный выпрямитель и пускорегулирующая аппаратура. Батарея конденсаторов служит для накопления электрической энергии с дальнейшей разрядкой на технологическую установку, для этих целей применяются импульсные конденсаторы.

*Коммутирующее устройство* должно в заданный момент подавать импульс напряжения на рабочую катушку, пропускать возникающий импульсный ток за определенный промежуток времени и регулировать напряжение на конденсаторах. Конструкция коммутатора должна обеспечивать возможность регулирования рабочего напряжения, иметь малую собственную индуктивность, минимальный разброс времени срабатывания.

Дуговые разрядники выполняются трех основных конструкций: открытые, вакуумные и газонаполненные. Более перспективными являются *вакуумные* и *газонаполненные*. Основное их преимущество – широкий предел регулирования рабочего напряжения, возможность изменения давления в разряднике и способность коммутировать значительную энергию.

Поджигающее устройство предназначено для запуска основного разрядника. Они могут быть с механическим и электрическим запуском. Схема поджига с поджигающей емкостью  $C_{п}$ , заряжаемой от основного зарядного устройства, показана на рис. 14.4.

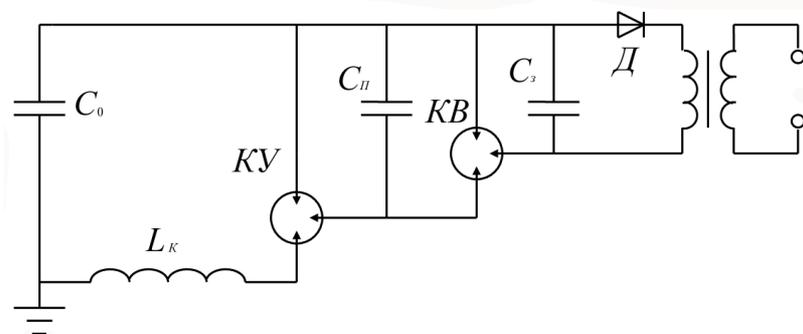


Рис. 14.4. Схема поджигающего устройства

Для запуска основного разрядника  $KV$  надо разрядить емкость поджига  $C_{п}$ . При этом на электрод поджига подается импульс напряжения, вызывающий вспомогательный разряд. Разрядка конденсатора осуществляется с помощью дополнительной емкости  $C_z$ , заряжаемой вспомогательным выпрямителем  $D$ . Схемы с электрическим запуском применяются в том случае, когда необходимо синхронизировать подачу поджигающего импульса с запуском измерительных или регистрирующих приборов.

К технологическому узлу предъявляют следующие требования:

- высокая эффективность преобразования электрической энергии в механическую энергию деформации заготовки;
- высокая механическая и электрическая прочность;
- конструктивная и технологическая простота.

В зависимости от назначения индукторы выполняют в виде одно- и многовитковых катушек, плоской спирали и др.

Тепловой режим индуктора обеспечивается охлаждением его спирали жидкостью, пропускаемой через специальные каналы в нем.

В одновитковом индукторе спираль изготовливается из меди и латуни в виде массивной плиты, сильно увеличенной в радиальном направлении. Для снижения паразитной индуктивности зазор паза между токопроводами выполняют минимальным.

### 14.3. ХАРАКТЕРИСТИКА ОПЕРАЦИЙ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Области применения магнитоимпульсной обработки (МИО) охватывают преимущественно операции обработки тонкостенных металлических заготовок любых форм (развальцовка, опрессовка, выдавливание гофров, раздача труб, чеканка, штамповка и т. д.).

Преимущества установок МИО: отсутствие движущихся и трущихся частей; легкость управления и регулирования мощности; компактность, простота обслуживания, ремонтоспособность и возможность встраивать в поточные линии; высокая производительность; несложность механизации и автоматизации операций обработки.

Принципиальные схемы таких операций показаны на рис. 14.5.

Метод формообразования импульсным магнитным полем можно применять для штамповки из металлического листа (рис. 14.6).

Для таких операций индуктор выполняют в виде плоской спирали 1. При подаче импульса тока магнитное поле наводит в заготовке 2, помещенной напротив торца катушки, кольцевые вихревые токи. Их взаимодействие с магнитным полем создает усилия, способные деформировать заготовку.

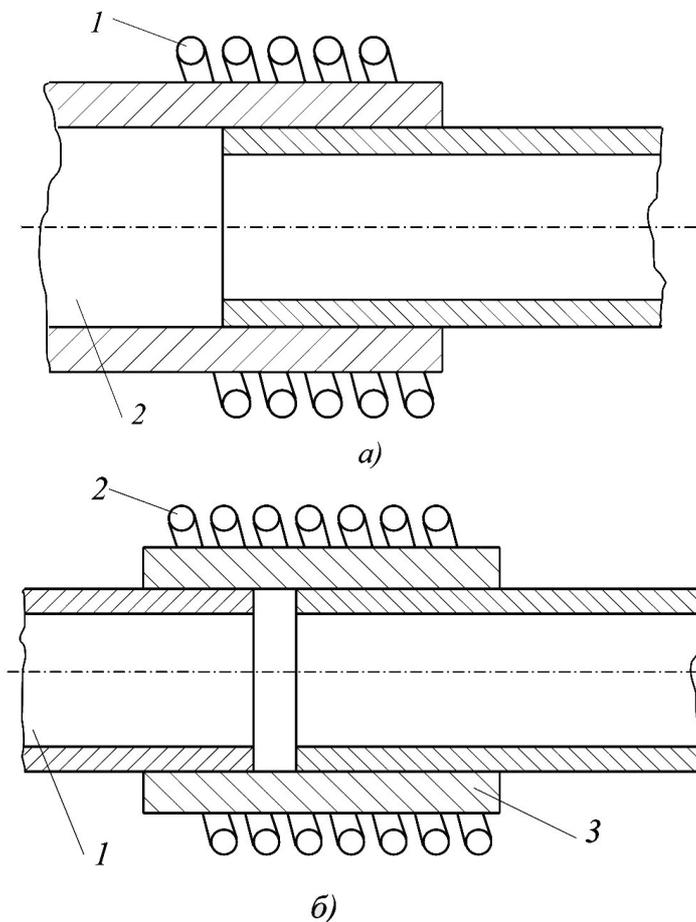


Рис. 14.5. Схема магнитоимпульсной обработки:  
*a* – соединение концов труб; *б* – соединение труб муфтой;  
 1 – заготовки; 2 – соленоид; 3 – муфта

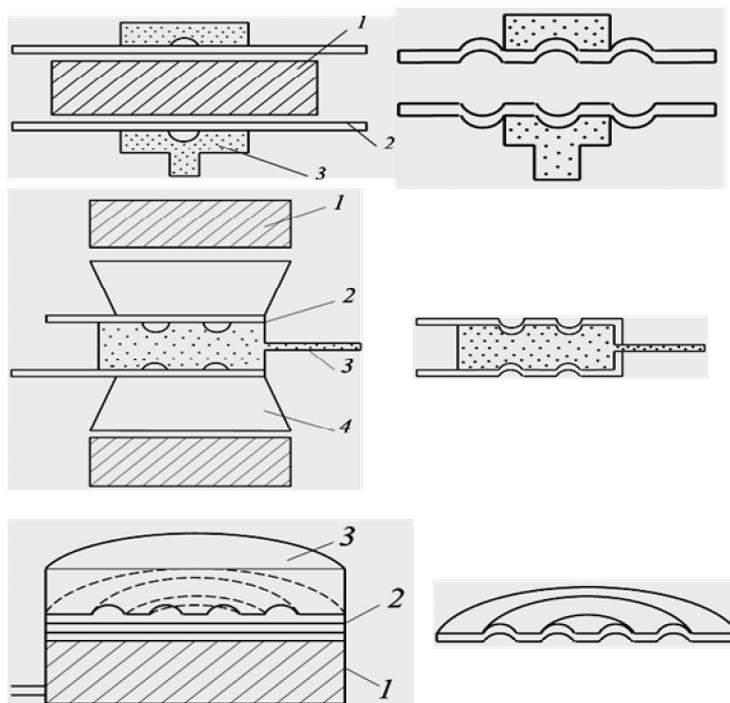


Рис. 14.6. Схема магнитоимпульсного формообразования:  
 1 – индуктор; 2 – заготовка; 3 – матрица; 4 – концентратор магнитного поля

## 14.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАСОСЫ

Установки электромагнитной транспортировки жидких металлов по принципу действия подразделяют на кондукционные и индукционные.

*Кондукционные насосы* перекачивают проводящую жидкость в результате воздействия на нее силы, возникающей при взаимодействии магнитного поля, создаваемого магнитной системой насоса, с электрическим током, проходящим через находящуюся в насосе проводящую жидкость.

Кондукционные насосы могут быть постоянного и переменного токов. *Насос постоянного тока* подобен электродвигателю постоянного тока, в котором обмотка якоря заменена электропроводящей жидкостью (рис. 14.7)

Сила, действующая на элементарный проводник  $dl$  с током  $I$  в магнитном поле  $B$ :

$$F = IBdl \sin \alpha . \quad (14.8)$$

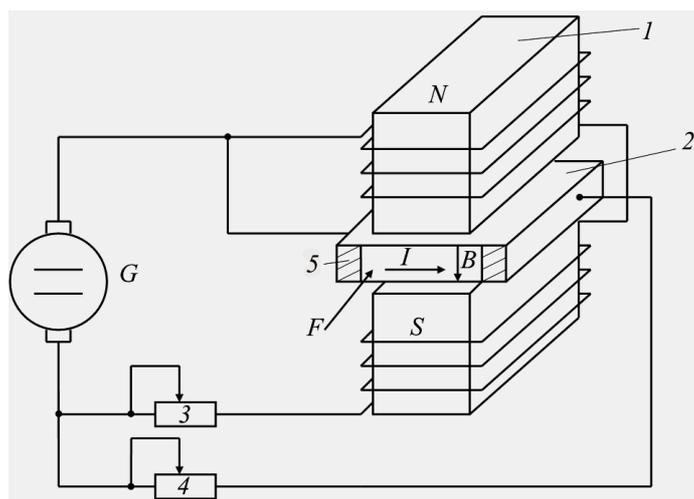


Рис. 14.7. Схема кондукционного насоса постоянного тока:  
1 — электромагнит; 2 — канал с токопроводящими шинами 5;  
3, 4 — регуляторы тока через канал и катушку электромагнита

Принцип действия кондукционных насосов переменного тока аналогичен. Однако в этом случае направление тока должно изменяться в соответствии с изменением направления магнитного поля. Часто такие насосы и трансформаторы объединяют в одно целое (рис. 14.8).

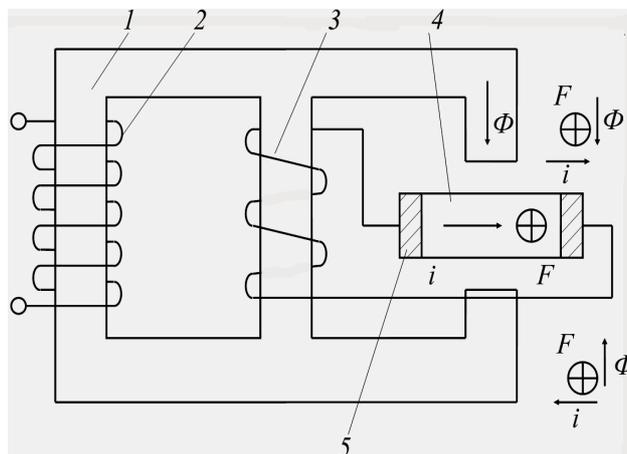


Рис. 14.8. Схема насоса-трансформатора:  
 1 – магнитопровод; 2, 3 – обмотки трансформатора;  
 4 – канал с жидкостью; 5 – токопроводящая шина

В каждый из полупериодов взаимодействие тока  $i$  и магнитного потока  $\Phi$  создает электромагнитную силу  $F$ , действующую в одном и том же направлении.

*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 (рис. 14.9). Он имеет два статора: внешний 1 и внутренний 2. Трехфазная обмотка, питающаяся от сети трехфазного тока, размещена в пазах магнитопровода внешнего статора. Между статорами в зазоре находится плоская труба из немагнитного материала 4, внутри которой протекает жидкий металл 3.

При подключении 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.

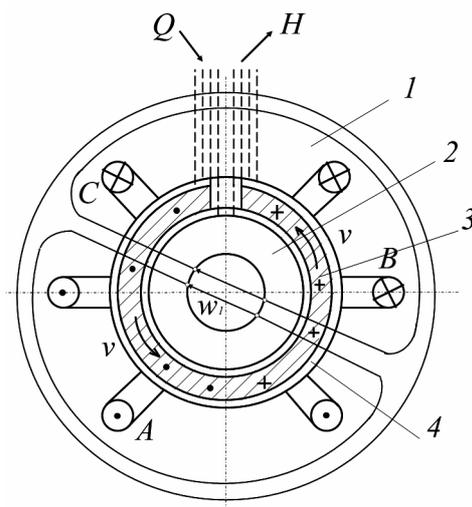


Рис 14.9. Схема винтового индукционного насоса

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.

## ГЛАВА 15. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

### 15.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

#### ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

*Электрогидравлический эффект* – это возникновение высокого давления в результате высоковольтного электрического разряда между погруженными в непроводящую жидкость электродами. За счет энергии импульсной ударной волны, распространяющейся вокруг канала разряда в рабочей среде, возникает давление до  $300 \text{ МН/м}^2$ .

Принципиальная схема осуществления электрогидравлического эффекта показана на рис. 15.1. Элементами схемы являются повышающий трансформатор Тр, выпрямитель Д, накопитель энергии С, формирующий промежуток ФП и разрядный промежуток РП.

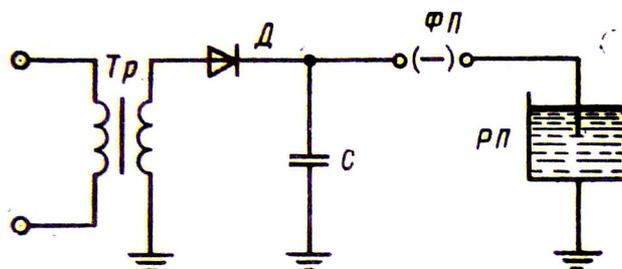


Рис. 15.1. Электрическая принципиальная схема установки электрогидравлического эффекта

Искровой высоковольтный разряд преобразуется в накопителе электрической энергии в тепловую, световую, механическую энергию. При пробое практическая несжимаемость жидкостей приводит к появлению *электрогидравлического удара*, что еще больше усиливает действие электрического взрыва.

Плотность тока в канале разряда достигает значений до  $10^6$  А/см<sup>2</sup> и выше. Плотность выделяющейся в канале энергии приводит к разогреву среды, ее диссоциации и ионизации. В результате образуется плазма с температурой порядка 15000 – 20000 К, что приводит к повышению давления в канале и его расширению, а также возникновению ударной волны

Носителями энергии при искровом высоковольтном разряде в жидкости являются ударная волна и парогазовая сфера. В импульсной механической работе большинства технологических процессов, таких как разрушение, дробление, формообразование, основное значение имеет энергия ударной волны, выделяющаяся в разрядном промежутке за первый полупериод колебания тока.

## 15.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗРЯДА

*Очистка литья.* Очистка литья от формовочной земли производится в воде и полностью исключает пылеобразование. При этом методе очищаемые отливки помещают в бак. После установки электродов относительно деталей последние очищаются от формовочной земли серией импульсов. Применение многоэлектродных трехфазных установок позволяет производить обработку сразу нескольких отливок, устанавливаемых относительно электродов в произвольном положении.

*Формообразование* – это процесс получения фасонных изделий из тонколистового материала с использованием направленных ударных волн при импульсном электрическом разряде.

Рис. 15.2. Схема электрогидравлической штамповки

Для получения различных по форме изделий создаются различные формы волн: с острым фронтом, сферические и др. Это достигается различным расположением электродов, а также различными формами проводочек, закорачивающих межэлектродный промежуток. Схема электрогидравлической штамповки детали показана на рис. 15.2. Листовую заготовку 2 укладывают на матрицу 1 и прижимают к ней с помощью прижимных устройств. Над заготовкой расположена жидкая передающая среда 4, в которой на определенном расстоянии от заготовки размещены положительный и отрицательный электроды 5, соединенные с генератором импульсов тока электрогидравлической установки.

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 гидропотока (рис. 15.2, а).

Более эффективному использованию энергии разряда способствует размещение рабочих электродов в замкнутой камере 3 (рис. 15.2, б) или внутри самой заготовки (рис. 15.2, в).

Изменяя расстояние между концами рабочих электродов, можно получить различную форму фронта ударной волны. Если расстояние между электродами достаточно мало, то возникает волна со сферическим фронтом. Если же электроды удалены друг от друга на несколько сантиметров,

то образуется волна с цилиндрическим фронтом. Плоский фронт можно получить, применив тонкую проволочную сетку, которая испаряется при прохождении тока.

Форму фронта ударной волны можно привести в соответствие с формой рабочей полости матрицы, для чего проволоку, закорачивающую концы электродов, изгибают таким образом, чтобы разряд следовал по возникшему плазменному каналу.

*Тонкое измельчение.* При этом технологическом приеме материал диспергируется или разрушается волной, в зависимости от параметров разрядного контура, а энергия импульса – от напряжения и емкости конденсатора.

Для дробления различных минеральных сред применяются специальные электрогидравлические вибраторы. Эти устройства просты и надежны. Они представляют собой систему цилиндр – поршень. Корпус вибратора заполнен жидкостью (водой). От специального источника питания на электроды вибратора подается высоковольтный импульс, вызывающий искровой разряд между ними. При этом в жидкости возникает импульс давления, под действием которого поршень перемещается вдоль своей оси. Атмосферное давление возвращает поршень в исходное положение, совершая возвратно-поступательное движение. Частота перемещения поршня задается частотой электрических разрядов в том случае, если общее время движения поршня вперед-назад меньше периода следования разрядов.

## ГЛАВА 16. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

### 16.1. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Ультразвуковой (УЗ) метод обработки является методом механического воздействия на материал, частота ударов соответствует диапазону неслышимых звуков, т. е.  $f$  составляет от 16 до  $10^5$  кГц.

Звуковые волны распространяются только в упругой среде в отличие от электромагнитных колебаний. Длина звуковой волны  $\lambda = v/f$ , где  $v$  – скорость распространения волны;  $f$  – частота волны. При распростране-

нии волны материальные частицы совершают упругие колебания около своих положений равновесия со скоростью, которая называется *колебательной*. Сгущение и разрежение среды в продольной волне характеризуется избыточным, так называемым *звуковым давлением*. Между колебательной скоростью и звуковым давлением существует взаимосвязь, определяемая свойствами среды. Для плоской звуковой волны взаимосвязь между давлением и колебанием определяется акустическим законом Ома

$$\frac{p}{y} = \gamma v = R_a, \text{ где } p - \text{звуковое давление; } y - \text{колебательная скорость; } \gamma -$$

плотность среды,  $\text{г/м}^3$ ;  $v$  – скорость распространения волны;  $R_a$  – акустическое сопротивление.

Скорость звуковой волны зависит от плотности среды, в которой движется волна:  $v = S/\gamma$ , где  $S$  – модуль продольной упругости (модуль Юнга). Из формулы следует, что скорость волны тем больше, чем жестче и легче материал среды.

УЗ 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, при котором происходит процесс образования полостей и пузырьков в УЗ поле во время фазы растяжения, имеющейся в переменном звуковом давлении. Эти полости и пузырьки аннигилируют (схлопываются) во время фазы сжатия. В зоне схлопывания кавитационного пузырька возникают большие местные мгновенные давления, достигающие значений  $10^7 - 10^8 \text{ Н/м}^2$ .

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

Поверхностное трение возникает вследствие движения частиц у граничной поверхности, разделяющей различные среды. Перечисленные явления лежат в основе ряда технологических процессов.

*Разделение молекул и частиц различной массы* в негомогенных суспензиях в звуковом поле зависит от состава суспензий и частоты поля.

*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 УЗ 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 другими.

## 16.2. ЭЛЕМЕНТЫ ОБОРУДОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УСТАНОВОК

Основными элементами колебательной системы являются источник УЗ колебаний и акустический трансформатор скорости.

Источники УЗ колебаний могут быть двух видов: механические и электрические.

К механическим источникам относятся ультразвуковые сирены и свистки. 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* (МСП) основан на продольном магнитострикционном эффекте (МЭ), который проявляется в изменении длины металлического тела из ферромагнитных материалов (без изменения их объема) под действием магнитного поля. Высокой магнитострикцией обладают никель и пермендюр.

Пакет МСП представляет собой сердечник из тонких пластин, на котором размещена обмотка для возбуждения поля высокой частоты. При МЭ знак деформации сердечника не изменяется при изменении направления поля на обратное. Частота изменения деформации в 2 раза больше частоты переменного тока, проходящего по обмотке преобразователя.

По схеме замещения можно рассчитать механические параметры аналогично расчету электрических схем, но с учетом коэффициента электромеханической связи  $\varphi$ , характеризующего связь колеблющейся механической части системы с электрической цепью. В соответствии с первой

системой электромеханических аналогий коэффициент  $\frac{\varphi}{j}$  используют при пересчете электрических напряжений в механические усилия;  $j\varphi$  – пересчетный коэффициент колебательных скоростей в ток, а  $\varphi^2$  – коэффициент пересчета электрических сопротивлений в механические. Пара-

метры схемы замещения изменяются в зависимости от конструкции и материала преобразователя.

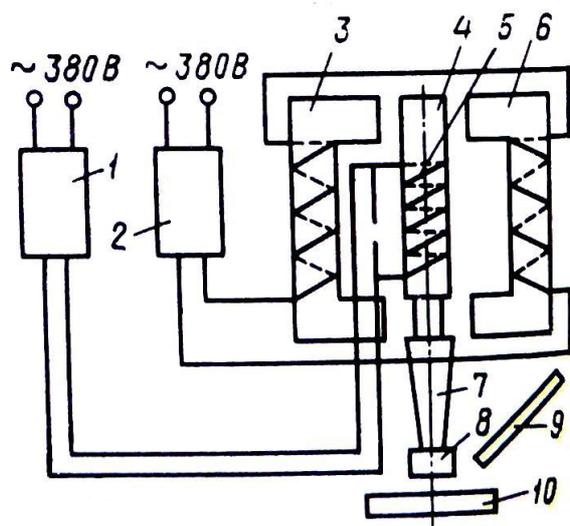


Рис. 16.1. Схема МСП

На рис. 16.1 показана схема МСП. Обмотка 5 сердечника преобразователя 4 питается от генератора тока высокой частоты 1. Под действием электромагнитов 3 и 6, питаемых от источника постоянного тока 2, возникает постоянное магнитное поле. В результате в системе будет проходить два магнитных потока: постоянный с индукцией  $B_0$  и переменный с индукцией  $B_{п}$ . В любой момент времени результирующий магнитный поток  $B_p$  равен их алгебраической сумме  $B_p = B_0 + B_{п}$ . В случае согласного направления потоков, когда  $B_p \neq 0$ , сердечник имеет длину  $l_1$ , когда же потоки направлены встречно и результирующий поток  $B_p \approx 0$ , длина сердечника  $l_2 \neq l_1$ . Таким образом, с помощью высокочастотного генератора 1, выпрямителя 2, концентратора 7 (акустического преобразователя скорости) электрическая энергия преобразуется в механическую энергию колебаний технологического элемента преобразователя 8, воздействующего на обрабатываемую деталь 10. Через шланг 9 к месту обработки подается рабочая жидкость.

Недостатками МСП является наличие потерь на перемагничивание сердечника, потребление значительного тока на подмагничивание, невысокая экономичность, низкий КПД.

Действие *пьезоэлектрических преобразователей* основано на способности некоторых веществ изменять свои геометрические размеры в электрическом поле. Распространение получили пьезоэлементы на основе титаната бария, цирконата-титаната свинца (ЦТС). Колеблущаяся пла-

стинка из пьезоэлектрического материала является электромеханическим преобразователем.

Примером технического применения пьезоэлектрического преобразователя являются установки для озвучивания растворов с целью их гомогенизации (рис. 16.2). Раствор, протекающий по каналу или находящийся в сосуде, облучается определенное время в звуковом поле, что ускоряет растворение компонентов.

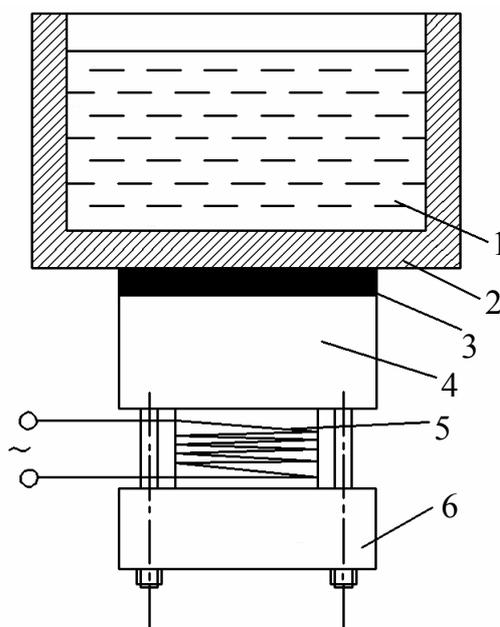


Рис. 16.2. Конструкция многослойного пьезопреобразователя:

- 1 – ванна с раствором; 2 – днище ванны;
- 3 – клеящийся состав;
- 4 – верхняя накладка; 5 – диски на ЦТС;
- 6 – нижняя отражающая накладка

*Акустические трансформаторы скорости (АТС)* – концентраторы продольных упругих колебаний. Они служат для согласования параметров преобразователя с нагрузкой, для крепления колебательной системы и ввода УЗК в зону обрабатываемого материала. Эти устройства представляют собой стержни различного сечения, выполненные из материалов со специальными требованиями.

Формы АТС показаны на рис. 16.3, а – е. Они характеризуются коэффициентом концентрации колебаний, равным отношению площади сечения большего торца концентратора (соединенного с вибратором) к малому выходному его торцу.

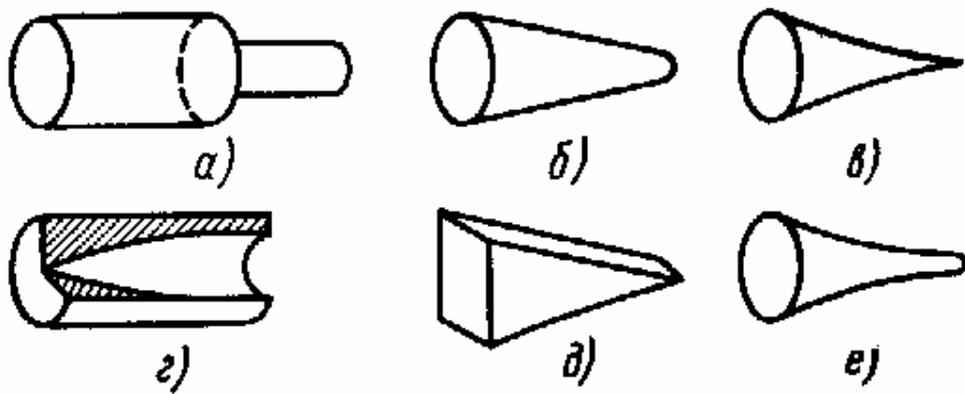


Рис. 16.3. Формы акустических трансформаторов скорости

*Источники питания ультразвуковых установок* предназначены для преобразования электрической энергии промышленной частоты в энергию ультразвуковой частоты для возбуждения преобразователя. Основные требования: стабильность генерируемой частоты и возможность ее регулирования; регулирование мощности; небольшие стоимость, масса и размеры; надежность.

Существуют ультразвуковые генераторы (УЗГ) на транзисторах, тиристорах, ламповые и машинные. Схема УЗГ8-0,1/22 с автоматической подстройкой частоты представлена на рис. 16.4. Генератор состоит из двух каскадов, первый – возбуждатель в виде блокинг-генератора на транзисторах  $T_1$ ,  $T_2$ , питающийся от выпрямителя с выходным напряжением  $E_1$ ; второй – выходной каскад выполнен по полумостовой схеме на транзисторах  $T_3$ ,  $T_4$ . Нагрузка  $M$  подключена к генератору через согласующий трансформатор  $Tr_2$ , цепь согласования  $C1$ ,  $L1$  и  $C2$ ,  $L2$ , дифференциальный трансформатор обратной связи  $Tr_3$ . Напряжение обратной связи с трансформатора  $Tr_3$  подается в базовые цепи транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  и осуществляет синхронизацию работы возбуждателя. В генераторе имеется возможность ступенчатого регулирования мощности от 10 до 100 % номинальной. Потребляемая из сети мощность – 180 В·А, выходная мощность – 100 Вт, рабочая частота –  $(22 \pm 1,65)$  кГц.

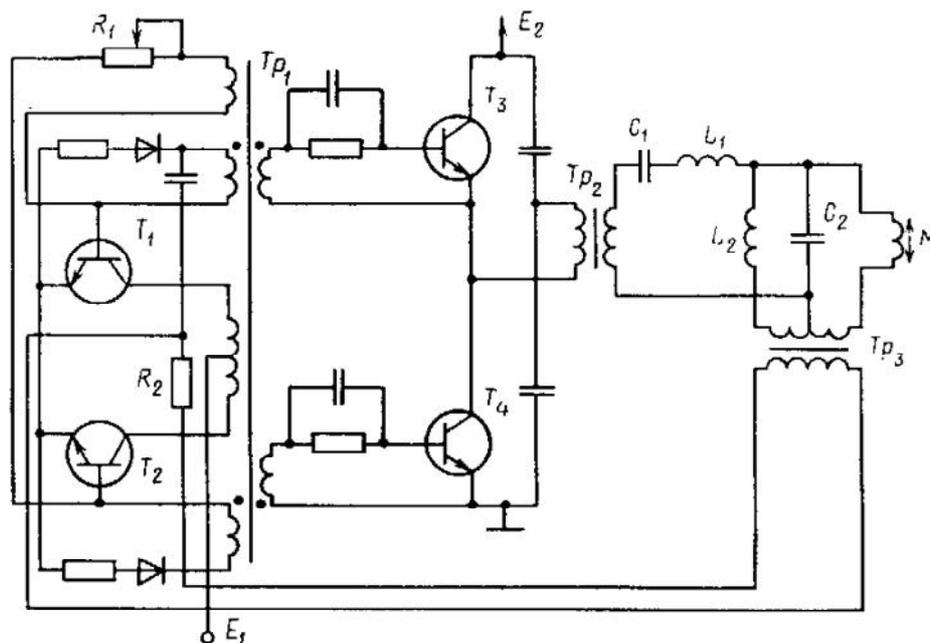


Рис. 16.4. Принципиальная схема ультразвукового генератора УЗГ-01/22

### 16.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Технологическое использование УЗ в промышленности осуществляется по трем основным направлениям: силовое воздействие на материал; интенсификация технологических процессов; УЗ методы контроля.

*УЗ процессы с силовым воздействием на обрабатываемый материал* применяются для механической обработки твердых и сверхтвердых сплавов, диспергирования и эмульгирования, удаления поверхностных пленок, загрязнений и др.

При методе *УЗ размерной обработки прошиванием* происходит направленное разрушение твердых и хрупких материалов с помощью инструмента, колеблющегося с УЗ частотой. При этом он оказывает на обрабатываемую поверхность ударное воздействие посредством мельчайших зерен абразивного порошка, вводимого в виде суспензии в зазор между торцом инструмента и изделием.

*УЗ диспергирование и эмульгирование* происходят под действием кавитации и турбулентного движения жидкостей. Этим методом удается получить стойкие эмульсии таких несмешивающихся обычными способами жидкостей, как вода и масло, ртуть и вода, бензол и вода и др.

Изготовление суспензий путем диспергирования твердой фазы с помощью УЗ волн позволяет существенно повысить производительность процесса.

УЗ методом можно производить очистку различных металлических деталей от окалины, паст, смол, продуктов коррозии, обезжиривание, удаление заусениц и т. д.

Применяемое при этом оборудование включает в себя ванну или сосуд с растворителем для основной очистки, источник УЗ с устройством для подвода колебаний в рабочую зону. Наиболее эффективна очистка труднодоступных полостей, углублений и каналов небольших размеров, при очистке мелких деталей сложной конфигурации, оптических изделий и т. п.

*Интенсификация технологических процессов.* УЗК существенно изменяют ход некоторых химических процессов. В частности, обработка УЗ значительно ускоряет полимеризацию винилацетата, эмульсий стирола, ацетальдегида и т. д. В металлургии различных металлов воздействие УЗ частоты на расплавы приводит к измельчению кристаллов и ускорению образования наростов в процессе кристаллизации, уменьшению пористости, повышению механических свойств затвердевших расплавов и снижению содержания газов в металлах.

Ряд металлов, например свинец и алюминий, не смешивается в жидком виде. Наложение на расплав ультразвуковых колебаний способствует «растворению» одного металла в другом.

*УЗ методы контроля* позволяют контролировать ход технологического процесса без проведения лабораторных анализов.

Установив предварительно зависимость параметров звуковой волны от физических свойств среды, измеряя затем амплитуду колебаний частиц, интенсивность УЗК или скорость звука, можно достаточно точно судить о состоянии среды и ее изменениях.

По отражению звуковых волн на границе раздела сред («просвечивание» ультразвуковым лучом) можно определить наличие примесей в монолите и создать на этом принципе методы и приборы ультразвуковой диагностики.

## РАЗДЕЛ VI. ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

### ГЛАВА 17. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННО-ИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

#### 17.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

При воздействии электрического поля высокой напряженности на вещество, находящееся в твердом, жидком или газообразном состоянии происходит изменение распределения образующих его частиц в пространстве. В технологических процессах это применение получило общее название электронно-ионной технологии (ЭИТ).

ЭИТ включает в себя три характерных процесса: электризацию материала в момент диспергирования или уже находящегося в дисперсном состоянии; организацию различных форм движения частиц в электрическом поле; формирование готового продукта или изделия.

Получили развитие следующие виды ЭИТ:

- электрогазоочистка – выделение из газового (воздушного) потока содержащихся в нем твердых или жидких частиц;
- электросепарация – разделение многокомпонентных систем на компоненты, путем использования электрофизических и физико-химических свойств частиц компонентов;
- электроокраска – нанесение твердых или жидких покрытий на изделия;
- электропечать – формирование изображения, получение многократных копий, выполнение матриц для размножения;
- электроформообразование.

В основе ЭИТ лежат следующие явления:

- электроосмос – движение жидкости по отношению к твердому телу под действием электрического поля;
- электрофорез, или катафорез, – движение частиц, взвешенных в жидкости или газе под воздействием электрического поля;
- электродиализ – явление, которое составляют диализ (очистка растворов от электролитов) и электрофорез.

Указанные явления имеют место в электростатических установках. При массопереносе в таких установках электрическое поле перемещает не ионы, как это происходит при электролизе, а макрочастицы вещества, состоящие из большого количества молекул. Протекание процессов обу-

словлено возникающими кулоновскими силами. Для их возникновения частицы должны быть заряжены.

На практике используются в основном три принципа зарядки частиц:

– путем осаждения на поверхности частицы ионов из объема газа, окружающего частицу. Источником ионов в этом случае может быть коронный разряд;

– путем электростатической индукции, т. е. разделения зарядов в электрическом поле;

– путем механической, химической и тепловой электризации, в этом случае наиболее распространена электризация частиц за счет трения друг о друга и о стенки сосуда (трибоэлектричество).

## 17.2. ОСАЖДЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Рассмотрим два вида осаждения в электрическом поле: электроосаждение аэрозольных частиц; электроосаждение в электрофилт্রে.

В первом случае в газе имеются заряженные частицы твердого вещества и капельки жидкости. Очистка газа происходит за счет поглощения капельками жидкости частиц твердого вещества с последующим выведением суспензии из очистительного агрегата.

Между частицами вещества и капельками жидкости действуют следующие силы.

1. Сила взаимодействия заряженной частицы с каплей (кулоновское взаимодействие):

$$F_k = \frac{q_p q_k}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

где  $q_p, q_k$  – заряды частицы и капли соответственно, Кл;  $r$  – расстояние между ними, м.

2. Сила индукции между зарядом на капле и индуцированным зарядом на частице:

$$F_{ИК} = -\frac{(\epsilon - 1)d_p^3 q_k}{(\epsilon + 2)16\pi\epsilon_0 r^2}.$$

3. Сила индукции между зарядом на частице и индуцированным зарядом на капле:

$$F_{\text{ИЧ}} = \frac{q_p^2 d_k}{13\pi\epsilon_0 r^3} - \frac{2q_p d_k^2 r}{\pi\epsilon_0 (4r^2 - d_k^2)^2}$$

В этих уравнениях  $d_p$ ,  $d_k$  – диаметры частицы и капли соответственно, м.

4. Сила взаимодействия между униполярно заряженными частицами:

$$F_y = -\frac{q_r^2 d_r^3 n}{24\epsilon_0 r^2},$$

где  $n$  – концентрация униполярно заряженных частиц.

Электроосаждение аэрозольных частиц происходит в том случае, если силы притяжения между каплей и частицей больше возникающих между ними сил отталкивания, и связано с электрическим полем.

Рассмотрим осаждение частиц, когда осадительный электрод представляет собой чистую поверхность, а в поле находятся сферические частицы, силы сцепления которых равны нулю. Улавливание происходит в воздухе при нормальных условиях полем электрофильтра и полем осевших частиц.

Частицу и осадительный электрод можно рассматривать как конденсатор, заряженный до напряжения  $U = \varphi - \varphi_0$  ( $\varphi$  – потенциал частицы;  $\varphi_0$  – потенциал стенки, в рассматриваемом случае  $\varphi_0 = 0$ ).

При соприкосновении со стенкой частица разряжается. Скорость разрядки определим по формуле

$$\frac{dq}{d\tau} = -\frac{\varphi}{R} e^{-\tau/RC} = -4\pi\epsilon_0 \frac{[1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)]Ed^2}{RC}, \quad (17.1)$$

где  $R = r_1 + r_2 + r_3$  ( $r_1$  – внутреннее,  $r_2$  – поверхностное и  $r_3$  – контактное сопротивление частицы, Ом);  $C$  – емкость конденсатора, Ф.

Как видно при удержании частицы на стенке осадительного электрода играет ее проводимость. Если проводимость частицы мала, то разряжается она медленнее. В любой момент времени на ней будет находиться заряд, и частица окажется прижатой полем к электроду.

## ГЛАВА 18. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ

### 18.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Электрофильтр как агрегат состоит из следующих основных элементов (рис. 18.1):

- система подготовки газов для подачи в электрофильтр, в которую входят устройства для увлажнения газа и выравнивания профиля скоростей;
- источник питания – повышающий трансформатор в комплекте с регулирующим автотрансформатором и высоковольтный выпрямитель;
- собственно электрофильтр.

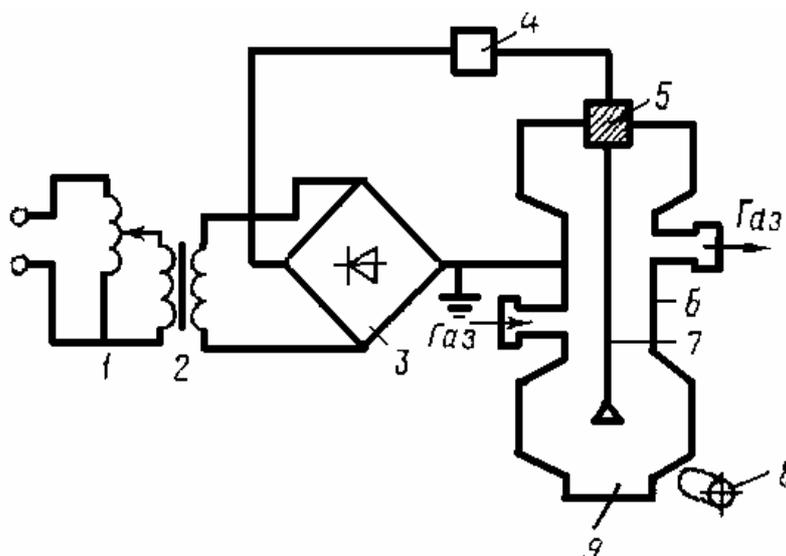


Рис. 18.1. Принципиальная схема электрофильтра:

- 1 – регулирующий автотрансформатор; 2 – повышающий трансформатор;  
3 – высоковольтный выпрямитель; 4 – кабель с ограничительным сопротивлением; 5 – изолирующий вход; 6 – коронирующий электрод;  
7 – осадительный электрод; 8 – механизм встряхивания, 9 – бункер

Процесс воздействия поля на частицы вещества в электрофильтрах включает две стадии: а) предварительная бесконтактная зарядка частиц; б) осаждение частиц за счет кулоновского взаимодействия их зарядов с электрическим полем.

Принцип действия электрофильтра. От источника питания через изолирующий ввод на коронирующий электрод и осадительный электрод подается высокое напряжение постоянного тока.

Необходимая разность потенциалов  $U_0$  для возникновения коронного разряда в электрофильтре определяется по известному значению  $E_0$  для соответствующей системы электродов:

$$E_0 = 30,3\delta(1 + 0,298/\sqrt{\delta \cdot r_0}).$$

По мере повышения напряжения после возникновения коронного разряда ток быстро растет и может перейти в искровой. Рабочие токи в электрофильтре обычно составляют 0,1 – 0,5 мА/м длины электрода.

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.

В общем виде энергия, затрачиваемая для выделения взвешенных частиц из газового потока, пропорциональна току  $I$ , потребляемому электрофильтром, и напряжению  $U$  на его электродах:  $P = UI$ . Она может быть определена по формуле

$$P = \frac{U_m I_{cp} \kappa_{\Phi} \cos \varphi}{\sqrt{2\eta_a}} + P_1, \quad (18.1)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения, кВ;  $I_{cp}$  – среднее значение тока, потребляемого электрофильтром, А;  $I_{cp} = i_0 L$  ( $i_0$  – линейная плотность тока, А/м;  $L$  – активная длина коронирующих электродов, м);  $\kappa_{\Phi}$  – коэффициент формы кривой;  $\eta_a$  – КПД электроагрегата ( $\eta_a \approx 8$ );  $\cos \varphi \approx 0,7 \dots 0,75$ ;  $P_1$  – мощность, потребляемая вспомогательными устройствами электрофильтров, кВт.

Электрофильтры подразделяют на две группы:

– однозонные, в которых зарядка и осаждение частиц происходят в одной конструктивной зоне, где расположены коронирующая и осадительная системы;

– 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 подразделяют на трубчатые и пластинчатые.

В корпусе электрофильтра размещены коронирующие осадительные электроды. Здесь собирается улавливаемый продукт. При использовании трубчатых осадительных электродов корпус иногда выполняют из двух

частей: нижней (входной коробки с бункерами) и верхней (выходной коробки).

Коронирующие электроды должны обладать особой формой для создания интенсивного и достаточно однородного коронного разряда; механической прочностью и жесткостью для обеспечения продолжительной службы электродов в условиях вибрации и раскачивания под влиянием сил электрического поля, воздействия механизма встряхивания и движущегося газового потока; стойкостью в газовой среде, которая может иметь повышенную температуру и содержать агрессивные компоненты.

## 18.2. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

В состав агрегата питания электрофильтров входят: регулятор напряжения, повышающий трансформатор, выпрямитель и интегратор. По принципу действия среди них различают источники тока и источники напряжения. При питании фильтра от источника тока ток короны практически остается постоянным, а выходное напряжение изменяется пропорционально сопротивлению нагрузки. При питании от источника напряжения ток короны сильно зависит от напряжения.

Агрегаты питания электрофильтров снабжены устройствами автоматического регулирования напряжения от  $U_{\min}$  до  $U_{\max}$ , поддерживающими его в пределах пробивного и снижающего на заданное значение ограничения энергии, выделяющейся при дуговых разрядах в электрофильтре аварийного отключения агрегата; сигнализации работы агрегата.

Источник питания (рис. 18.2) состоит из повысительно-выпрямительного блока с высоковольтным переключателем и панели управления. Блок включает в себя высоковольтный повышающий трансформатор  $T_r$  и высоковольтный выпрямитель  $D$ . Отрицательный полюс выпрямителя соединен с коронирующими электродами электрофильтра, а положительный полюс и осадительные электроды заземлены. Магнитный усилитель МУ, включенный последовательно с первичной обмоткой трансформатора, позволяет в широких пределах регулировать высокое напряжение за счет изменения тока подмагничивания.

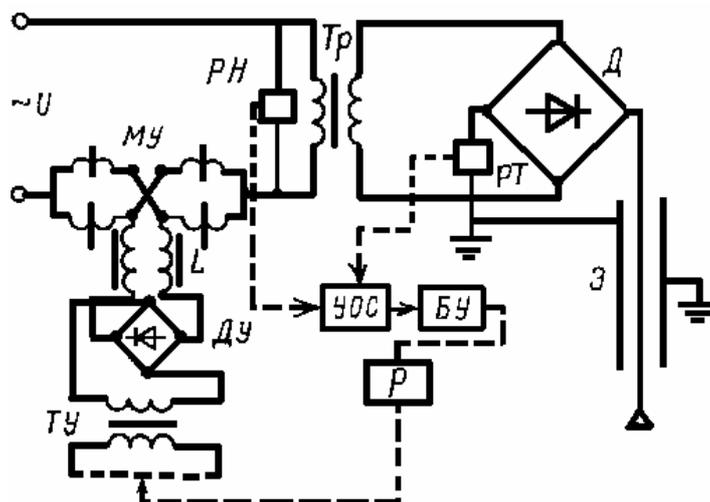


Рис. 18.2. Схема источника питания электрофильтра типа АИФ

Во время работы регулятор напряжения  $P$  по команде блока управления БУ понижает или повышает напряжение на первичной обмотке трансформатора управления ТУ, чем регулирует напряжение высоковольтного трансформатора Тр.

При возникновении искровых разрядов напряжение на электрофильтре автоматически резко снижается, что приводит к снижению тока. После этого искровые разряды прекращаются. Если возникает устойчивая электрическая дуга, срабатывает максимально-токовое реле РТ, а из-за резкого увеличения падения напряжения на магнитном усилителе отключается реле напряжения РН, в обоих случаях срабатывает реле защиты.

В некоторых источниках питания электрофильтров осуществляется экстремальное регулирование, при котором ведется непрерывный автоматический поиск электрического режима, соответствующего максимальному уровню среднего значения напряжения на электродах фильтра.

При возникновении дугового разряда между электродами управляющее устройство на  $0,01 - 0,02$  с полностью снимает с них напряжение, а затем оно плавно восстанавливается до прежнего уровня. При прекращении тока происходит деионизация дугового канала в электрофильтре за время порядка  $0,01$  с. Схема такого источника питания с тиристорами показана на рис. 18.3. Тиристорный силовой блок 3 выполняет функции коммутирующей аппаратуры и плавного регулирования напряжения на входе повышающего трансформатора.

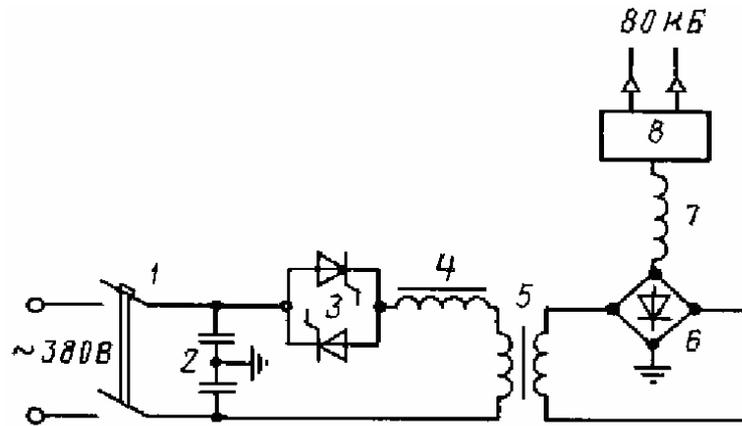


Рис. 18.3. Принципиальная электрическая схема источника питания типа АТФ: 1 – сетевой автомат; 2 – фильтр защиты от помех; 3 – силовой тиристорный блок; 4 – реактор, ограничивающий броски тока при переходных процессах и подавляющий высшие гармоники; 5 – повышающий трансформатор; 6 – кремниевый выпрямитель; 7 – сглаживающий реактор; 8 – высоковольтное распределительное устройство

### 18.3. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ОБОРУДОВАНИЕ

Установки, основанные на явлении электроосмоса, применяются для очистки воды, выделения растворенных в ней веществ, получения питьевой воды для населения и пресной воды для промышленности.

Установка электроосмотического опреснения воды позволяет очищать морскую воду и получать из нее пресную. Установка разделена на 10 – 12 самостоятельных ячеек (рис. 18.4)

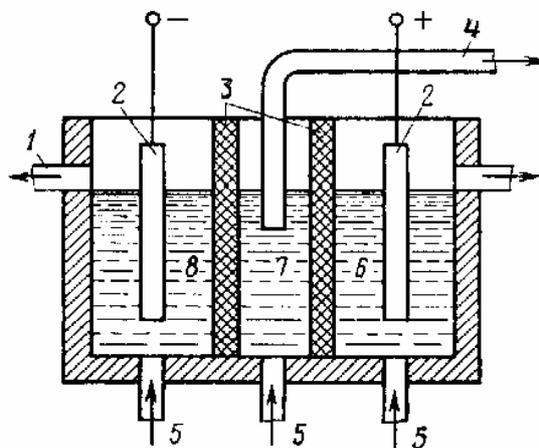


Рис. 18.4. Схема установки электроосмотического опреснения воды

Ячейка разделена диафрагмами 3, 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  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaHCO}_3$  и другие диссоциируют на катионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ , которые движутся к катоду, и анионы  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^{2-}$ , направляющиеся к аноду (отделение 6). В катодном отделении 8 вода становится щелочной, а в анодном 6 – кислой. Обедненная солями вода из отделения 7 первой ячейки по трубе 4 подается в ячейки опреснения.

Принципиальная схема установки для окраски металлических изделий в высоковольтном электрическом поле показана на рис. 18.5. 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. 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. Вытяжной вентилятор 7 удаляет из камеры пары растворителей.

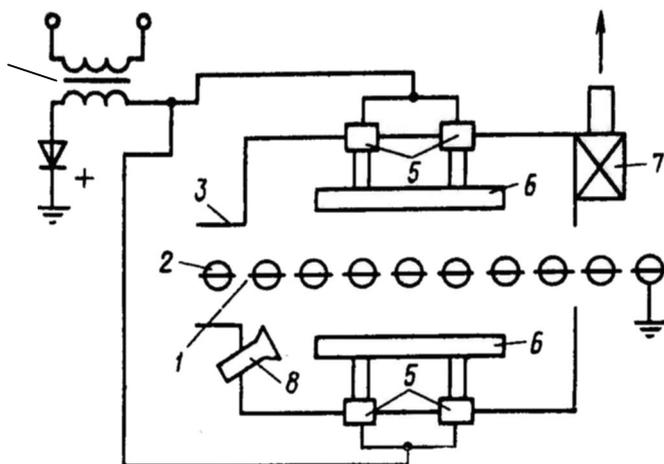


Рис 18.5. Схема установки для окраски изделий

Электронно-ионная технология применяется в сельском хозяйстве при опрыскивании растений, в кабельной и резиновой промышленности для припудривания изделий из резины и для других операций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные электротехнологические процессы стимулируют получение новых материалов, выдерживающих более высокие напряжения, температуры, обладающих высокими эмиссионными свойствами и т. п. Эти материалы широко используются для создания нового поколения электротехнологических установок с более высокими возможностями. Происходит взаимное совершенствование, позволяющее глубже проникнуть в природу материи и создать на этой основе динамично развивающуюся науку – электротехнологию.

В свою очередь, электротехнология является преддверием новейшего мирового технологического направления – нанотехнологии.

Материал, изложенный в пособии, является основой для проектирования определённого технологического оборудования, а также способствует проявлению творческих способностей в новой области электротехнологии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алиев Г. М., Гоник А. Е. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров. – М.: Энергия, 1971.
2. Артамонов Б. А. и др. Размерная электрическая обработка металлов. – М.: Высшая школа, 1978.
3. Болотов А. В., Шепель Г. А. Электротехнологические установки. – М.: Высшая школа, 1988.
4. Вагин Г. Я. Электротехнологические промышленные установки. – Горький: Изд.-во ГПТИ, 1981.
5. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975.
6. Миронова А. Н. Электроснабжение электротермических установок. – Чебоксары: Изд.-во ЧГУ, 1983.
7. Простяков А. А. Индукционные печи и миксеры для плавки чугуна. – М.: Энергия, 1977.
8. Степанов В. Г., Шавров И. Л. Высокоэнергетические импульсные методы обработки материалов. – Л.: Машиностроение, 1975.
9. Фарнасов Г. А., Рабинович В. Л., Егоров А. В. Электрооборудование и элементы автоматизации электроплавильных установок. – М.: Metallurgia, 1976.
10. Фомин Н. И., Затуловский Л. М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Metallurgia, 1979.
11. Электрические промышленные печи. Ч. II. Дуговые печи и установки специального нагрева / Под ред. А. Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1981.
12. Яковлев П. Б. Электротехнология. – М.: Изд.-во МЭИ, 1978.

Учебное издание

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

Часть 1

**Манин** Алексей Васильевич

Зав. РИО М. А. Салкова  
Редактор Н. В. Мирзоян, Л. В. Калинина  
Компьютерная верстка Л. В. Калинина

Подписано в печать 29.03.2010.  
Формат 60×84 1/16. Уч.-изд.л. 11,69. Тираж 300. Заказ 41.

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия  
имени П. А. Соловьева (РГАТА имени П. А. Соловьева)  
Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТА имени П. А. Соловьева  
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53