

**А.В. БОЛОТОВ**  
**Г.А. ШЕПЕЛЬ**

# **Электро- технологические установки**

Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебника для студентов  
вузов, обучающихся по специальности  
«Электроснабжение промышленных  
предприятий»



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1988

ББК 31.29—5

Б79

УДК 621.3.031

Рецензенты: кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий» Московского энергетического института (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В. В. Шевченко; д-р техн. наук, проф. А. В. Донской (научный руководитель отраслевой лаборатории электротехнологических установок МЭТП при ЛПИ им. М. И. Калинина)

**Болотов А. В., Шепель Г. А.**

**Б79** Электротехнологические установки: Учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение пром. предприятий». — М.: Высш. шк., 1988.—336 с.: ил.  
ISBN 5—06—001270—0

В книге рассмотрены физические основы процессов, элементы инженерного расчета параметров, примеры аппаратурного оформления; приведены необходимые сведения по эксплуатации электротехнологических установок; описаны технологические процессы переработки и обработки материалов, в которых электрическая энергия превращается в другие виды энергии непосредственно в зоне воздействия на вещество или в самом веществе.

Б 2302040000(4309000000)—228 119—88  
001(01)—88

ББК 31.29—1  
6П2.1

ISBN 5—06—001270—0

© Издательство «Высшая школа», 1988

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	6
Введение . . . . .	8
<b>РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ . . . . .</b>	<b>12</b>
Глава 1. Физико-технические основы электротермии . . . . .	12
§ 1.1. Электротермические установки и области их применения . . . . .	12
§ 1.2. Теплопередача в электротермических установках . . . . .	13
§ 1.3. Материалы, применяемые в электропечестроении . . . . .	16
Глава 2. Установки нагрева сопротивлением . . . . .	20
§ 2.1. Физическая сущность электрического сопротивления . . . . .	20
§ 2.2. Нагревательные элементы . . . . .	23
§ 2.3. Установки электроотопления и электрообогрев . . . . .	26
§ 2.4. Электрические печи сопротивления . . . . .	32
§ 2.5. Электрооборудование и регулирование параметров печей сопротивления . . . . .	40
§ 2.6. Нагрев сопротивлением жидких сред . . . . .	43
§ 2.7. Электрошлаковые установки . . . . .	46
Глава 3. Установки контактной сварки . . . . .	50
§ 3.1. Физические основы электрической контактной сварки и ее разновидности . . . . .	50
§ 3.2. Стыковая сварка . . . . .	52
§ 3.3. Точечная сварка . . . . .	54
§ 3.4. Шовная сварка . . . . .	57
§ 3.5. Электрооборудование установок контактной сварки . . . . .	58
Глава 4. Установки индукционного и диэлектрического нагрева . . . . .	65
§ 4.1. Физико-технические основы индукционного нагрева . . . . .	65
§ 4.2. Индукционные плавильные установки . . . . .	70
§ 4.3. Индукционные нагревательные установки . . . . .	80
§ 4.4. Физические основы диэлектрического нагрева . . . . .	86
§ 4.5. Установки диэлектрического нагрева . . . . .	89
§ 4.6. Источники питания установок индукционного и диэлектрического нагрева . . . . .	94
<b>РАЗДЕЛ ВТОРОЙ. УСТАНОВКИ ДУГОВОГО НАГРЕВА . . . . .</b>	<b>102</b>
Глава 5. Основы теории и свойства дугового разряда . . . . .	102
§ 5.1. Ионизация газов. Понятие плазмы . . . . .	102
§ 5.2. Структура электродугового разряда . . . . .	105
§ 5.3. Характеристика приэлектродных областей и протекающих в них процессов . . . . .	108
§ 5.4. Основные закономерности электродугового столба . . . . .	113
§ 5.5. Особенности дуги переменного тока . . . . .	116
§ 5.6. Устойчивость и регулирование параметров электрической дуги . . . . .	119

Глава 6. Электродуговые и рудно-термические печи	123
§ 6.1. Классификация дуговых печей	123
§ 6.2. Дуговые печи прямого действия	125
§ 6.3. Электрооборудование дуговых печных установок	129
§ 6.4. Рабочие режимы и характеристики электродуговых печей	134
§ 6.5. Магнитное перемешивание металла в дуговых сталеплавильных печах	139
§ 6.6. Дуговые сталеплавильные печи в системе электроснабжения	141
§ 6.7. Энергетический баланс дуговой сталеплавильной печи	142
§ 6.8. Рудно-термические печи	143
Глава 7. Вакуумные дуговые печи	151
§ 7.1. Области применения и устройство вакуумных дуговых печей	151
§ 7.2. Особенности дугового разряда в вакуумной дуговой печи	154
§ 7.3. Электрооборудование вакуумных дуговых печей	158
Глава 8. Плазменные технологические процессы и установки	165
§ 8.1. Устройства для получения низкотемпературной плазмы и области их применения	165
§ 8.2. Энергетические характеристики плазмотронов и источники питания	176
§ 8.3. Плазменные плавильные установки	181
§ 8.4. Установки плазменной резки и сварки металлов	184
§ 8.5. Установки плазменного нанесения покрытий	188
Глава 9. Установки дуговой электрической сварки	190
§ 9.1. Физико-технические основы дуговой сварки	190
§ 9.2. Источники питания дуговой сварки	195
§ 9.3. Ручная дуговая сварка	204
§ 9.4. Установки механизированной и автоматической сварки	206
<b>РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ. УСТАНОВКИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО НАГРЕВА</b>	215
Глава 10. Установки электронно-лучевого нагрева	215
§ 10.1. Физико-технические основы электронно-лучевого нагрева	215
§ 10.2. Конструкции электронно-лучевых установок	217
§ 10.3. Технологическое применение электронно-лучевого нагрева	221
Глава 11. Оптические квантовые генераторы (лазеры)	226
§ 11.1. Основные принципы работы лазеров	226
§ 11.2. Типы оптических квантовых генераторов	230
§ 11.3. Основы технологии светолучевой обработки	236
<b>РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ</b>	239
Глава 12. Электролизные установки	239
§ 12.1. Основы электрохимической обработки	239
§ 12.2. Электролиз растворов и расплавов	242
§ 12.3. Электрооборудование электролизных производств	249

§ 12.4. Применение электрохимической обработки материалов в машиностроении	254
§ 12.5. Источники питания установок электрохимической обработки	258
Глава 13. Электроэрозионная обработка металлов	260
§ 13.1. Общая характеристика и физические основы процесса	260
§ 13.2. Параметры импульсных разрядов	263
§ 13.3. Генераторы импульсов	264
§ 13.4. Разновидности электроэрозионной обработки и элементы ее оборудования	269
§ 13.5. Электроконтактная обработка	274
Глава 14. Электрохимико-механическая обработка в электролитах	276
§ 14.1. Анодно-абразивная обработка	276
§ 14.2. Анодно-механическая обработка	279
§ 14.3. Характеристика операций электрохимической обработки	281
§ 14.4. Оборудование электрохимико-механической обработки	283
<b>РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ</b>	284
Глава 15. Установки магнитоимпульсной обработки металлов	284
§ 15.1. Физико-технические основы	284
§ 15.2. Элементы оборудования установок магнитоимпульсной обработки	287
§ 15.3. Характеристика операций магнитоимпульсной обработки	290
§ 15.4. Электромагнитные насосы	291
Глава 16. Электрогидравлическая обработка материалов	295
§ 16.1. Физические основы электрогидравлического эффекта	295
§ 16.2. Технологическое использование высоковольтного электрического разряда в жидкости	298
Глава 17. Ультразвуковые электротехнологические установки	301
§ 17.1. Физическая сущность ультразвуковой обработки	301
§ 17.2. Элементы оборудования ультразвуковых установок	303
§ 17.3. Технологическое использование ультразвуковых колебаний	309
<b>РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ. ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ</b>	312
Глава 18. Основы электронно-ионной технологии	312
§ 18.1. Характеристика электронно-ионных процессов	312
§ 18.2. Заряд частицы в электрическом поле	314
§ 18.3. Движение заряженной частицы в электрическом поле	317
§ 18.4. Осаждение в электрическом поле	318
Глава 19. Электростатические промышленные установки	320
§ 19.1. Принцип действия и устройство электрофильтров	320
§ 19.2. Источники питания электрофильтров и регулирование их параметров	325
§ 19.3. Электростатические технологические процессы и их оборудование	329
Заключение	334
Литература	335

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Намеченный XXVII съездом КПСС интенсивный путь развития народного хозяйства СССР, путь революционных перемен в экономике открывает широкие возможности для научно-технического прогресса, перевода всех отраслей на прогрессивную технологию. Запланированное повышение производительности труда, фондоотдачи предусматривает разработку новых технологических процессов и установок с высокой степенью электрификации. Нарастание производства электроэнергии, требования сокращения вредных выбросов в окружающую среду и снижения доли топлива в нагревательных процессах определяют бурное развитие электротехнологии, как науки о технологических возможностях электричества. Практическим результатом развития этой науки является создание большого количества электротехнологических установок, применяемых в металлургии, химии, машиностроении и других отраслях народного хозяйства и обеспечивающих эффективное участие электрической энергии в преобразовании веществ.

«Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года», план социалистической интеграции в научно-техническом прогрессе стран-членов СЭВ выдвинули такие приоритетные направления электрификации как применение низкотемпературной плазмы, электронно-ионной, импульсной и лазерной техники. Успешное решение этих задач позволит создать новое поколение высокопроизводительных экологически чистых установок и производств.

В реализации этих грандиозных планов особая роль отводится подготовке высококвалифицированных инженеров-электриков, обладающих современным научным мышлением, эрудицией и фундаментальным знанием технологических процессов, совершающихся в электрических и магнитных полях при прохождении электрического тока.

Специфическое электрооборудование электротехнологических установок органически связано с технологическим процессом и может правильно создаваться и эксплуатироваться только при глубоком понимании основ технологии. С этим расчетом и составлен настоящий учебник.

Книга предназначена для подготовки инженеров-электриков по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий» и соответствует программе дисциплины «Электротехнологические

установки», утвержденной Министерством высшего и среднего специального образования СССР.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность коллективу кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Московского энергетического института (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В. В. Шевченко) и д-ру техн. наук, проф. А. В. Донскому (Ленинградский политехнический институт) за ценные замечания и советы, высказанные при рецензировании рукописи.

Отзывы о книге просим направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

*Авторы*

---

## ВВЕДЕНИЕ

Установки, в которых происходит превращение электрической энергии в другие виды с одновременным осуществлением технологических процессов, называют электротехнологическими. Эти установки имеют довольно сложное оборудование, включающее в себя рабочий орган — плазмотрон, плазменный реактор, электронную пушку, электродные системы дуговых и ионных агрегатов, специфические источники питания, автоматически поддерживающие заданный режим работы или управляемые с помощью микропроцессорной техники. В состав вспомогательного оборудования входят системы обеспечения водой, газом, создания и поддержания вакуума и др. Правильные монтаж, наладка и эксплуатация оборудования без знания выполняемого им технологического процесса затруднительны.

Производственная деятельность человека и его быт стремительно насыщаются электротехнологическими установками. Это обусловлено не только ростом потребности в них, но и в незначительной степени сокращением природных запасов и повышением стоимости углеводородного топлива, необходимостью принятия кардинальных мер по охране окружающей среды, созданию безотходных технологий. Развитие электротехнологических процессов обеспечивается развивающейся энергетикой страны, строительством новых атомных и тепловых электростанций, сооружением мощных линий электропередач.

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. Были получены высококачественные проводниковые и полупроводниковые материалы и изделия из не использовавшегося ранее сырья или отходов производств, работающих по старой технологии. Современные успехи большинства отраслей промышленности и науки достигнуты благодаря применению электротехнологических процессов.

Наиболее впечатляющие результаты применения электротехнологических процессов получены в микроэлектронике. Радиотехнические устройства, ЭВМ, управляющие комплексы содержат сотни тысяч, а порой десятки миллионов элементов, объединенных в системы сотнями тысяч соединений.

Если бы эти системы монтировались из компонентов, выпускаемых по технологии, которая была 30—40 лет тому назад, то масса таких устройств достигла десятков тонн, объем — десятков кубометров, потребляемая мощность — сотен киловатт.

В настоящее время благодаря освоению процессов плазменного нанесения покрытий и пленок, ионно-лучевого легирования, плазменного травления, лазерной сварки, фотолитографии, а также благодаря применению новых материалов, полученных также в электротехнологических установках, созданы принципиально новые устройства микроэлектроники. Разработаны качественно новые принципы конструирования и изготовления электронных микросхем, при которых ее активные, пассивные и соединительные элементы образуются в микрообъемах полупроводникового кристалла или на поверхности диэлектрической подложки в едином технологическом процессе.

Входящие в микросхему элементы (транзисторы, диоды, конденсаторы, резисторы и др.) не имеют внешних выводов, а вся микросхема имеет общую герметизацию, защиту от механических повреждений, влияний окружающей среды и входит в состав комплексов. Поэтому стали привычными миниатюрные наручные часы, многофункциональные, снабженные микрокалькулятором, микротелевизором; малогабаритные цветные телевизоры и ЭВМ, обладающие огромным быстродействием и памятью.

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

В получении высококачественных металлов исключительно важна роль электрошлакового переплава.

Электротехнологические процессы, особенно их новые разновидности, имеют весьма короткий срок перехода из стен лаборатории в науку, технику, быт и производство. Это относится к тем процессам, которые не могут быть выполнены без электроэнергии, либо к тем, в которых использование электроэнергии дает несоизмеримые преимущества. 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, превратившиеся в настоящее время в базовые технологические процессы.

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 бесчисленное множество операций — изменение температуры, формы, структуры, состава, свойств в разных направлениях и т. д. В огромный перечень электротехнологических установок индивидуального изготовления или серийного производства введена некоторая систематизация.

Их 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, а также электродные ванны, где нагревательным элементом служит расплав щелочи или оксидов.

Установки электрошлакового переплава металлов и электрошлаковой сварки используют явление выделения тепловой энергии преимущественно в шлаке, заполняющем пространство между электродами.

В установках контактной сварки электрическая энергия преобразуется в тепловую в переходном сопротивлении в точке контакта двух деталей. Процесс происходит только при импульсном протекании тока, что определяет особенности электроснабжения и схемы сварочных машин.

В установках индукционного нагрева используется преобразование энергии переменного тока промышленной или повышенной частоты в энергию переменного магнитного поля, которая преобразуется вновь в электрическую, а затем в тепловую в нагреваемом теле. Этот способ применим для нагрева проводящих тел.

Для нагрева диэлектриков применяются установки, использующие высокочастотное электрическое поле, где преобразование

электрической энергии в тепловую идет через процессы поляризации веществ.

Установки, принцип действия которых основан на нагреве электрической дугой, включают в себя электродуговые и руднотермические печи для выплавки металлов, огнеупоров, получения фосфора и других материалов, а также вакуумно-дуговые печи для переплава и рафинирования металла. Сюда же относятся установки плазменной и плазмодуговой обработки металлов и неметаллических материалов, которыми производят переплав металлов, нанесение защитных покрытий, наплавку и другие операции.

В электродуговых сварочных установках выделение мощности в основном происходит в опорных пятнах электрической дуги, однако и столб ее играет существенную роль в протекании сварочного процесса.

Возможность получения высококонцентрированных потоков тепловой энергии реализована 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.

Особый класс составляют установки ультразвукового воздействия, осуществляющие технологический процесс путем создания в веществе механических колебаний высокой частоты, получаемых от ультразвуковых генераторов.

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

Приведенное разделение в большой степени условное, поскольку многие технологические процессы могут обеспечиваться (или сопровождаться) несколькими способами преобразования энергии (например, при химических процессах в низкотемпературной плазме, плазменном нанесении покрытий, электрогидравлическом эффекте, магнитоимпульсной обработке металлов, электролизе расплавов), расширяя возможности электротехнологических процессов.

# Раздел первый

---

## ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

### Глава I

#### ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

##### § 1.1. Электротермические установки и области их применения

Понятие «электротермия» объединяет большой класс технологических процессов в различных отраслях промышленности, основной которых служит нагрев материалов и изделий с помощью электрической энергии. Применение электрической энергии для нагрева имеет ряд преимуществ: существенное снижение загрязнений окружающей среды; получение строго заданных значений температур, в том числе и превосходящих уровни, достигаемые при сжигании любых видов топлива; создание сосредоточенных интенсивных тепловых потоков; достижение заданных полей температур в нагреваемом пространстве; строгий контроль и точное регулирование длительности выделения энергии; гибкость управления потоками энергии; возможность нагрева материалов и изделий в газовых средах любого химического состава и в вакууме; выделение тепловой энергии непосредственно в нагреваемом веществе.

Применение электронагрева вместо пламенного в некоторых технологических процессах позволяет получить большую экономию топлива и сократить обслуживающий персонал.

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 по-

ступает 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 объекта 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 (более нагретые, а следовательно, более подвижные) отдают часть своей энергии менее нагретым (менее

подвижным) при соударении. Скорость теплопередачи в этом случае зависит от физических свойств вещества, в частности от его плотности. Она больше у плотных тел (например, металлов) и меньше у пористых (например, пенопласта). Если температура нагревателя и нагреваемого тела не меняется во времени, то температурное поле системы является стационарным или установившимся. При стационарных процессах теплопередачи тепловой поток, проходящий через тело в единицу времени, постоянный, так как в процессе передачи теплоты теплосодержание тела не изменяется.

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

$$Q = (t_1 - t_2) / (lF\lambda), \quad (1.1)$$

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/(м·К).

Для большинства применяемых в печестроении материалов

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta t_{cp}). \quad (1.2)$$

Здесь  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности при 273 К;  $\beta$  — температурный коэффициент;  $t_{cp} = 0,5 (t_1 + t_2)$  — средняя температура стенки, К.

При расчете тепловых потерь через стенку электропечи необходимо учитывать теплообмен между наружной поверхностью стенки и окружающей средой и внутренней поверхностью стенки и рабочим пространством печи.

*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*.

Аналитическое решение задач, связанных с конвективным теплообменом, представляет значительные трудности, поскольку этот процесс описывается сложной системой дифференциальных уравнений. Поэтому задачи конвективного теплообмена обычно решают с использованием экспериментально полученных констант и величин.

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>.

По закону Ньютона—Рихмана, тепловой поток  $Q$  прямо пропорционален поверхности омывания, режиму движения теплоносителя и разности температур стенки и газа или жидкости.

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.

Формула (1.3) может быть применена при естественной и вынужденной конвекциях. Сложность заключается в выборе коэффициента теплоотдачи, поскольку он определяется рядом переменных: физическими свойствами омывающих стенку сред; температурой теплоотдающей и тепловоспринимающей сред; геометрическими размерами и формами омываемой поверхности, а также скоростью и характером движения среды.

Для определения коэффициентов теплоотдачи при конвективном теплообмене пользуются формулами, полученными путем обобщения большого количества экспериментальных данных. Так, для плоских вертикальных стенок в условиях естественной конвекции коэффициент теплоотдачи для диапазона температур  $\Delta t = t_c - t_r = 288 + 358$  К определяется выражением

$$\alpha_k = 3,45 (t_c - t_r)^{0,13},$$

а для  $\Delta t = 358 + 423$  К

$$\alpha_k = 2,05 (t_c - t_r)^{0,25}.$$

При вынужденной конвекции коэффициент теплоотдачи в первую очередь зависит от скорости движения омывающей среды.

Для общих случаев (заполнение печи специальной атмосферой, нагрев в жидких средах и т. п.) коэффициент теплоотдачи определяется с помощью безразмерных критериальных зависимостей, полученных обобщением экспериментальных данных на основе теории подобия.

**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 мк. 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 ( $\text{Вт/м}^2$ )

$$Q = c_s \varepsilon (T/100)^4, \quad (1.4)$$

здесь  $c_s$  — 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.

Рассмотренные виды теплопереноса во многих случаях осуществляются совместно. Например, в потоках жидкостей и газов наблюдается теплопроводно-конвективный перенос теплоты. В потоках высокотемпературных газов имеет место радиационно-конвективный перенос энергии и т. д.

### § 1.3. Материалы, применяемые в электропечестроении

При изготовлении электротермических установок (ЭТУ) применяется ряд специфических материалов, предназначенных 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.

Роль огнеупоров в экономии электроэнергии очень высока. Потери теплоты через стенки агрегата составляют 15—25% и могут быть значительно снижены применением огнеупорной и высокоогнеупорной теплоизоляции. В настоящее время с разработкой и промышленным выпуском волокнистых огнеупоров появилась возможность использовать технологичную внутреннюю изоляцию рабочего пространства с температурой до 2300 К.

При этом температура наружной поверхности ограждения не превышает 335—350 К, а тепловые потери в окружающее пространство (293 К) не превышают 760  $\text{Вт/м}^2$ . Одновременно значительно снижаются толщина стенки, масса теплоизоляции и доля теплоты, аккумулированная ею. Роль огнеупоров в ЭТУ не ограничивается их применением для теплоизоляции. Тугоплавкие оксиды, а также бескислородные соединения используют в атомной энергетике, установках прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Соединения углерода и кремния, циркония и кислорода применяются в качестве нагревателей при пропускании по ним электрического тока. Электроплавленный периклаз находит применение в трубчатых электронагревателях (ТЭН), предохранителях. В ближайшее время будут созданы новые огнеупорные материалы для установок плазменного и электронно-лучевого нагрева и технологического процесса получения из углей Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса (КАТЭК) жидкого топлива.

**Огнеупорные материалы.** Огнеупорными называют 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 особо 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.

Огнеупорные и теплоизоляционные материалы должны быть дешевы, легко обрабатываемы.

Наиболее полно изложенным требованиям удовлетворяют огнеупорные материалы, изготовляемые на основе кремнезема  $\text{SiO}_2$  (2000 К), глинозема  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2300 К), оксида магния  $\text{MgO}$  (2600 К).

Массовыми огнеупорами для электроплавильных печей являются динас (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  $ZrO_2$  (температура плавления 2800 К), оксид бериллия  $BeO$  (температура плавления 2870 К), диоксид тория  $ThO_2$  (3300 К) и др.

В последнее десятилетие в мировой практике начали применять искусственные высокотемпературные волокна в виде ваты и различных гибких изделий. При температуре выше 1300 К теплопроводность волокнистых материалов в 2 раза ниже, чем материалов с ячеистой структурой. Время и затраты труда на монтаж футеровки из волокнистых материалов составляют 10% времени и трудовых затрат на монтаж футеровки из огнеупорных легковесов. Огнеупорность волокнистых материалов из  $SiO_2-ZrO_2$ ,  $SiO_2-HfO_2$ ,  $SiO_2-ThO_2$ ,  $AlH_2O_3-SiO_2$  составляет 1800—2000 К, их рабочая температура 1300—1800 К.

**Теплоизоляционные материалы.** Они должны обладать малой теплопроводностью при достаточной огнеупорности. Поэтому теплоизоляционные материалы — 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 — почти чистый кремнезем ( $SiO_2$ ), используется для стен электропечей 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. Получаемый материал обладает хорошими теплоизолирующими свойствами.

На основе шлаковых и минеральных ват получают теплоизоляционные плиты, путем добавки в качестве связующего огнеупорной глины и асбеста.

*Стекловата* получается аналогичным способом из отходов стекольного производства. Максимальная температура ее применения 700—800 К.

*Пеностекло* получают путем добавления в расплав стекла газообразующих веществ. Полученные изделия из пеностекла обла-

дают хорошо развитой пористостью и большой механической прочностью, максимальная рабочая температура 900—1000 К. Однако дефицитность и высокая стоимость не позволили этому материалу получить широкое распространение.

**Зонолит** — легкая чешуйчатая масса, получаемая из низкосортной слюды путем обжига. Зонолит обладает малой теплопроводностью, выдерживает температуру до 1400 К и применяется в виде засыпки и для изготовления формованных изделий.

**Асбест** — волокнистый материал, с максимальной рабочей температурой 900 К. Обладает большой плотностью и невысокими теплоизоляционными свойствами.

В чистом виде применяется в качестве засыпки. Обычно служит армирующим веществом для создания композиционных материалов с повышенными теплоизоляционными свойствами (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.

Ряд деталей и конструкций в электротермических установках в процессе работы подвергаются воздействию высоких температур, больших механических нагрузок, различных по составу, в том числе и агрессивных атмосфер. Для их изготовления применяются материалы, механически прочные при высоких температурах, устойчивые к коррозии, легко поддающиеся различным видам технологической обработки (резание, сварка, прокатка и т. д.), дешевые и недефицитные.

Основные жаропрочные материалы — сплавы железа со специальными легирующими добавками. Легирующими материалами служат хром, алюминий, никель. Добавки хрома и алюминия придают сплавам способность противостоять высокотемпературной коррозии. Никель улучшает обрабатываемость материала, повышает его механическую прочность при работе в условиях высокой температуры.

Жаропрочные материалы подразделяют на жаростойкие и жароупорные. Основной легирующей добавкой в первой группе сплавов служит хром. Эти сплавы хорошо противостоят окислению при высоких температурах. Увеличение процентного содержания хрома в стали повышает его жаростойкость. Так, ненагруженные или слабонагруженные детали и конструкции (муфели, защитные экраны, подошвы плиты и т. д.), работающие при температурах до 1200 К, изготавливают из сплавов с содержанием хрома до 20%. Увеличение содержания хрома до 30% позволяет применять те же 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 на-

груженных конструкций и деталей, работающих в условиях высоких температур (конвейерные ленты, направляющие толкательных печей и т. п.). Хромоникелевые стали с содержанием хрома до 18% и никеля до 9% применяют при производстве электрических печей с рабочей температурой до 1100 К. Увеличение содержания никеля до 20—25% позволяет расширить температурный диапазон применения хромоникелевых сталей до 1300 К.

Жаропрочные стали довольно дороги, поэтому их применение не всегда экономически целесообразно. Заменителями жароупорных сталей могут быть специальные сорта хромистых и хромоникелевых чугунов. Из чугунов с содержанием хрома до 25—30% изготавливают различные виды литой тары, работающей при температурах до 1300 К.

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.

Материалы, применяемые для изготовления нагревательных элементов, рассмотрены в гл. 2.

## 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.

В соответствии с электронной теорией у металлов, которые являются кристаллическими веществами, ядра атомов находятся в узлах кристаллических решеток, а пространство между ними заполнено электронами (электронный газ).

Число свободных электронов в металле очень велико. Так, для меди оно составляет приблизительно  $10^{29}/\text{м}^3$ .

Согласно электронной теории в идеальной кристаллической решетке не происходит ни рассеяния, ни отражения, ни торможения движущихся электронов, т. е. нет никаких препятствий прохожде-

нию электрического тока и электропроводность металлов должна быть бесконечно большой. В действительности этого не происходит. Электропроводность металлов является конечной величиной и зависит от многих факторов, в частности от наличия дефектов в его структуре. Дефектами структуры могут быть геометрические искажения решетки, а также всевозможные примеси.

С увеличением температуры металла его атомы в узлах кристаллических решеток колеблются с большими и большими амплитудами. Это увеличивает вероятность столкновения с ними свободных электронов. Соответственно с повышением температуры увеличивается и сопротивление прохождению электрического тока.

Проводники второго рода — электролиты-растворы или расплавы кислот солей, щелочей, оксидов и плазма — имеют два вида электропроводности — электронную и ионную. При постоянном токе у растворов и расплавов наблюдается преимущественно ионная проводимость в соответствии с законом Фарадея. Доля электронного тока в этом случае невелика. При переменном токе появляется существенная доля электронного тока, увеличивающаяся с повышением частоты тока. Процессы переноса вещества в этом случае явно не проявляются, так как наступающая в новом периоде полярность электродов анулирует действие предыдущей.

В плазме наблюдаются оба вида проводимости, причем доля электронного и ионного токов зависит от давления, температуры и состава плазмы.

В нагревательных процессах используются оба вида проводников, причем тепловая эффективность их прямо пропорциональна электронной составляющей протекающего тока.

Электролизная ванна слабо разогревается протекающим по ней постоянным током большой силы, а электродный котел на переменном токе быстро нагревает до кипения слабоминерализованную воду.

Исходя из этого, все дальнейшие рассуждения относительно тепловой эффективности нагревательных установок будем строить на предположении, что в них протекает электронный ток, тепловое действие которого при постоянном и переменном токе описывается известными зависимостями.

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>3</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,  $1/\sigma = \rho$  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  $t$

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

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).

Удельное статическое сопротивление  $\rho_{ст}$  пропорционально тангенсу угла  $\alpha$  наклона луча, проведенного из начала координат в данную точку характеристики, т. е.  $\rho_{ст} = \text{tg} \alpha$ . Удельное динамическое сопротивление пропорционально тангенсу угла  $\beta$  наклона касательной в данной точке харак-

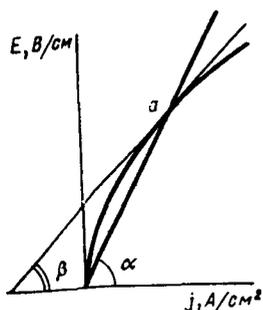


Рис. 2.1. Вольт-амперная характеристика проводника

теристики  $\rho_{\text{дин}} = \text{tg}\beta$ . Переходя от удельного сопротивления к проводимости, запишем

$$\sigma_{\text{ст}} = \text{ctg}\alpha; \quad \sigma_{\text{дин}} = \text{ctg}\beta.$$

Величину  $\text{ctg}\alpha = \sigma = dj/dE$  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 низких частотах переменного тока проводимость практически равна проводимости при постоянном токе.

Скорость электрона  $v_e$ , прошедшего в электрическом поле  $E$  разность потенциалов  $U$ ,

$$v_e = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U}, \quad (2.7)$$

и, например, для  $U = 40$  кВ  $v_e = 118,6$  тыс. км/с. При прохождении участка с разностью потенциалов  $U$  электрон приобретает кинетическую энергию  $W_e = e_0 U$ , эВ (электрон-вольт).

Вследствие столкновения и взаимодействия электронов с атомами их средняя скорость в направлении приложенного электрического поля может быть очень мала, поскольку при соударении с элементами структуры металла электроны обмениваются полученной ими в электрическом поле энергией, что выражается в нагреве проводника.

Количество выделяющейся в проводнике теплоты при прохождении по нему электрического тока зависит от сопротивления проводника, электрического тока в цепи, времени его прохождения и определяется законом Ленца—Джоуля:

$$Q = I^2 R \tau,$$

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

$$P = U^2 S / (\rho l), \quad (2.8)$$

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

## § 2.2. Нагревательные элементы

Выбор материала и конструкции нагревательного элемента определяется особенностями технологического процесса и конструкции установки.

Идущие на изготовление нагревателей материалы должны обладать рядом специфических свойств: высоким удельным электри-

ческим сопротивлением; малым температурным коэффициентом удельного сопротивления; постоянным электрическим сопротивлением нагревательного элемента в процессе длительного срока его службы — отсутствием старения.

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 нагревателей с рабочей температурой до 1500 К наиболее распространенными материалами являются нихромы (сплавы никеля и хрома), фехралы (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 нагревательные элементы с рабочей температурой до 1100 К.

Фехралы являются сплавом железа, хрома (до 13%) и алюминия (до 4%). Изготовленные из них нагреватели работают в установках с температурой до 1100 К.

Применение сплавов с содержанием хрома 20—27% и с микродобавками некоторых элементов (бора, титана и др.) способствует получению рабочих температур в диапазоне 1470—1620 К.

Выполняемые из нихромов, фехралей и нержавеющей стали нагреватели могут быть открытыми или защищенными. В первом случае конструкция нагревателя должна быть довольно жесткой, поэтому их изготавливают из проволоки и ленты больших сечений. Открытые нагревательные элементы применяются в печах и бытовых нагревательных приборах, они могут быть *проволочные зигзагообразные, проволочные спиральные и ленточные*. Диаметр и шаг спирали, а также размеры зигзагов зависят от толщин проволоки и ленты, способа их крепления в нагревательной установке и позволяют регулировать в некоторых пределах температуру нагрева. В зависимости от конструкции нагревательного элемента 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 электронагреватели, выполненные в виде цилиндра из *пористого металллокерамического* материала (пористость 40—80 мкм), что обеспечивает проникновение жидкости или газа сквозь его стенки и одновременно их нагрев. Удельная тепловая нагрузка на нагревате-

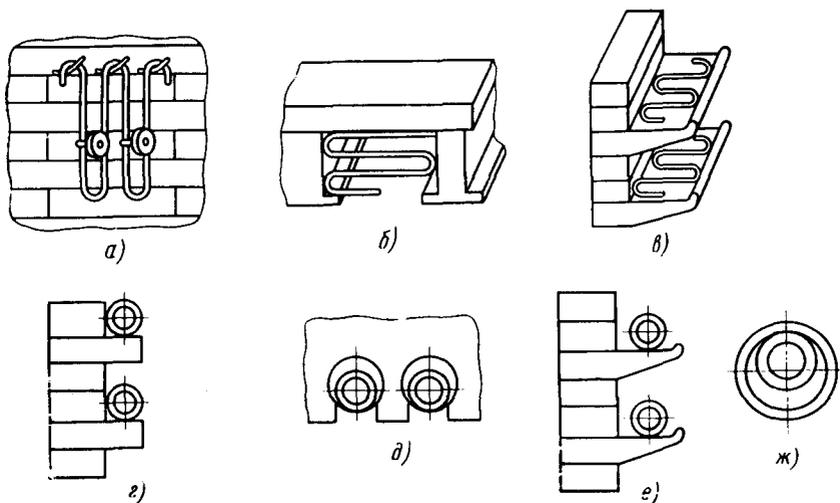


Рис. 2.2. Расположение нагревателей в электрических печах

ле составляет  $1 \text{ кВт/см}^2$ , рабочая температура  $400\text{--}600 \text{ К}$ , напряжение на элементе  $1\text{--}12 \text{ В}$ .

Для обогрева поверхностей, сосудов, труб, панелей существуют нагревательные элементы, изготавливаемые из *полиэфирной смолы* с обеспечивающим электропроводность наполнителем. Электропроводность такого электронагревателя составляет  $0,01\text{--}2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Этот синтетический материал легко формуются, а также используется в виде гибких покрытий, пленок и т. д. Рабочая температура материала  $400\text{--}500 \text{ К}$ .

Для низкотемпературного нагрева широко применяются *трубчатые электронагреватели* — ТЭНы, представляющие собой металлическую трубку 1, заполненную теплопроводным электроизоляционным материалом 2, в котором находится электронагревательная спираль 3 (рис. 2.3). В качестве наполнителя применяется плавный периклаз. По сравнению с открытыми электронагревателями ТЭНы более электробезопасны, могут работать в воде, жидких углеводородах, жидком металле, расплавах солей, оксидов и других средах. ТЭНы стойки к вибрациям и механическим нагрузкам. Мощность ТЭНов составляет от  $100 \text{ Вт}$  до  $15 \text{ кВт}$ , рабочее напряжение  $36\text{--}380 \text{ В}$ , рабочая температура  $400\text{--}1000 \text{ К}$ . Срок службы ТЭНов составляет  $10\text{--}40 \text{ тыс. ч}$ .

Для высокотемпературных печей с максимальной рабочей температурой до  $1700 \text{ К}$  применяются нагре-

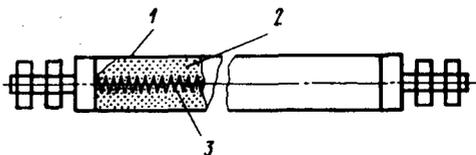


Рис. 2.3. Схема трубчатого электронагревателя (ТЭНа)

вательные элементы из *карборунда* (карбид кремния  $\text{SiC}$ , получаемый спеканием кремнезема и угля при температуре 1900—2000 К). Эти нагреватели известны также под названием *силитовых* или *глобаровых*. Их изготавливают в виде стержней диаметром 6—30 мм различной длины.

Нагреватели из *дисилицида молибдена*  $\text{MoSi}_2$  могут работать при температуре 2000 К в окислительной атмосфере. Их изготавливают методом порошковой металлургии. В окислительной атмосфере при температуре выше 1300 К на поверхности нагревательного элемента происходит образование защитной пленки из оксида кремния. Эксплуатация нагревателя при температуре 2000 К и выше ведет к разрушению старого слоя из  $\text{SiO}_2$  и образованию нового. В результате уменьшается площадь поперечного сечения нагревателя и возрастает его сопротивление. Поэтому их эксплуатация при температуре выше 1900 К не рекомендуется.

В *керамических электронагревателях* используется свойство некоторых керамических материалов приобретать высокую электропроводность с повышением температуры. Таким материалом является, например, оксид циркония, содержащий 4% оксида кальция или 6% оксида иттрия. С помощью керамических нагревателей можно достигать температур до 2300 К.

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

При изготовлении нагревательных элементов из тугоплавких материалов применяют молибден, тантал, вольфрам в виде проволоки, ленты, стержней и листов различных сечений.

Нагреватели из молибдена, тантала и вольфрама могут работать лишь в атмосфере инертных газов: аргона, гелия, водорода, азота, а также в вакууме.

*Графитовые электронагреватели* применяются в установках с рабочей температурой 1800—2700 К. Однако их применение ограничено в связи с тем, что они интенсивно окисляются на воздухе, начиная с температуры 800 К. Эти нагреватели изготавливают в виде стержней круглого или квадратного сечения, а также в виде труб длиной до 1500 мм. Внутренняя часть трубчатых нагревателей используется в качестве рабочего пространства нагревательной печи.

### § 2.3 Установки электроотопления и электрообогрев

Электрические нагревательные установки применяют для: сушки изделий после окраски, пропитки; сушки помещений при строительных работах; подогрева газов для различных технологических целей; отопления помещений; разогрева емкостей с жидкостью, пластичными и вязкими материалами, а также для нагрева

твердых тел и устройств — прессов, штампов; прогрева технологических трубопроводов; прогрева бетона, грунтов и дорожных покрытий.

В электроотоплении и электрообогреве используется большое разнообразие различных электронагревательных устройств. 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 электронагревательный аппарат, состоящий из нагревательного элемента и вентилятора. Он 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 электронагревательных устройств со свободноконвективным способом теплообмена. При невысоких температурах нагревательных элементов (500 К) в калориферах применяется подвешенная на изоляторах открытая проволочная спираль. Калориферы этого типа обладают небольшим гидравлическим сопротивлением.

В калориферах могут применяться простые и оребренные трубчатые электронагреватели, обладающие развитой поверхностью нагрева.

Отопительный калорифер с трубчатыми оребренными 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. Заданная температура выходящего воздуха поддерживается автоматически электроконтактными термометрами, датчики которых установлены на выходе воздуха из калорифера.

Для нагрева воздуха до высоких температур (1200 К) применяется калорифер с нагревательными элементами в виде металлических труб; воздух нагревается, протекая внутри них. Межтрубное пространство заполняется фасонными керамическими блоками. Отдельные трубы соединены между собой на концевых участках.

**Радиационные электронагреватели.** В различных отраслях промышленности и сельском хозяйстве широко используются радиационные нагреватели, передающие энергию в окружающее пространство излучением. 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. Нижняя прилегающая к цоколю часть колбы изнутри алюминирована для создания направленного излучения. 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. По сравнению с ламповым излучателем он имеет больший срок службы, меньшие габаритные размеры при одной и той же мощности и позволяет получить большую плотность лучистого потока (до 60 кВт/м<sup>2</sup>).

*Темный излучатель* представляет собой трубчатый электронагреватель, расположенный в фокусе полированного отражателя. Рабочая температура поверхности 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 (установки конвективно-радиационного типа).

При конструировании сушил следует обеспечить достаточную интенсивность воздухообмена, особенно в тех случаях, когда в результате сушки испаряются взрывоопасные вещества.

В конвективных сушилах применяются различные типы калориферов, которые могут быть расположены и вне пределов камеры нагрева (выносные калориферы).

При большой производительности сушила могут быть непрерывно действующими (методическими). В этом случае высушиваемые изделия или материалы помещены вдоль стенок камеры, на которых расположены нагревательные элементы, и перемещаются с помощью транспортирующих устройств (транспортеров, конвейеров и пр.).

В качестве установок для сушки различного рода поверхностей могут применяться специальные излучательные панели (рис. 2.4). Нагреватели панелей выполняют в виде нихромовой спирали, намотанной на керамические трубки.

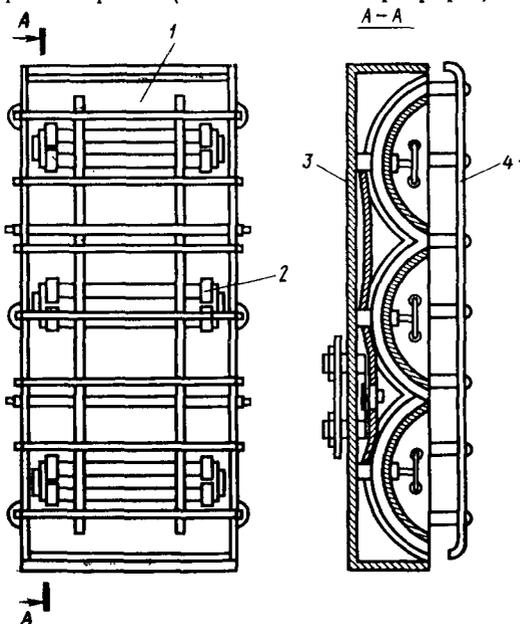


Рис. 2.4. Переносная излучательная панель:  
1 — отражатель; 2 — нагреватель; 3 — корпус; 4 — ограждение

Источником теплоты в панелях могут служить трубчатые электронагреватели, а в отдельных случаях открытые нагреватели и лампы различных типов. Характерной деталью панелей является отражающий экран, располагаемый за источником излучения. Благодаря экрану большая часть теплового потока направляется в сторону нагреваемой поверхности. Для уменьшения тепловых потерь на задней стенке панели устанавливается теплоизоляция.

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.

**Электрические отопительные устройства.** Электрическое отопление экономически оправдано в тех случаях, когда для использования другого вида энергии требуются значительные капитальные затраты (строительство новой котельной), возникают значительные трудности в обеспечении топливом, когда необходимо учитывать экологический фактор — чистоту окружающей среды, а также когда использование электрической энергии в ночное время выравнивает суточный график нагрузки электрической станции и системы.

Можно выделить следующие способы электроотопления: отопление электрокалориферами с подогревом воздуха; отопление с помощью панельных нагревателей; отопление с использованием низкотемпературного лучистого обогрева.

Для отопления зданий или отдельных помещений с повышенными гигиеническими требованиями (больниц, операционных и др.) в ряде случаев применяют воздушное отопление с использованием электрокалориферов. Кроме них для обогрева помещений используют электрические обогреватели с естественной конвекцией (панельные нагреватели), которые выгодно отличаются от калориферов отсутствием вентилятора. Кроме того, при обогреве помещений обогреватели легко могут быть размещены в различных их частях, что позволяет обеспечить без специальной разводки воздуха более равномерное распределение теплоты.

Для отопления помещений используются также теплоаккумулирующие устройства. Они в ночное время подключаются к электрической сети, работают на обогрев помещений и одновременно запасают теплоту в теплоаккумуляторе. Затем в дневное время они отдают запасенную теплоту в отапливаемое помещение, будучи отключенными от электрической цепи. Принципиальная схема электроотопительной установки с теплоаккумулирующим элементом показана на рис. 2.5.

Выбор мощности и теплоаккумулирующей способности установки определяется площадью отапливаемого помещения и климатическими условиями местности. В ряде случаев в качестве теп-

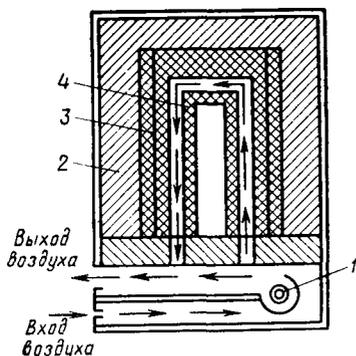


Рис. 2.5. Электрический теплоаккумулирующий нагреватель:  
1 — вентилятор; 2 — теплоизоляция;  
3 — запасящий тепло элемент; 4 — тепловыделяющий элемент

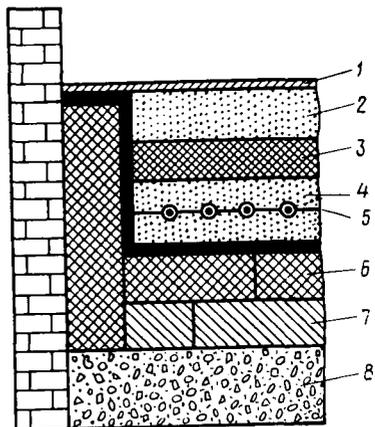


Рис. 2.6. Схема обогрева помещения:  
1 — настил пола; 2, 4 — мастика;  
3 — теплораспределяющий слой; 5 — плоский тепловыделяющий проводник;  
6 — водозащитный слой; 7 — стекловолоконная прокладка; 8 — бетон

лоаккумулирующего элемента могут служить электродоты большой емкости.

Использование систем с теплоаккумуляторами положительно сказывается на работе электростанций, снабжающих электрической энергией данный район, поскольку в этом случае повышается электрическая нагрузка станций в ночное время, что приводит к выравниванию суточного графика нагрузки и более рациональному использованию мощности электрической системы.

При осуществлении электроотопления с использованием низкотемпературного обогрева в качестве нагревающих поверхностей используются пол, потолок и стены помещения, в которые монтируются нагревательные элементы. Такой способ отопления позволяет получить хорошее распределение температуры в помещении, уменьшить массу нагревательной установки, достигнуть хороших гигиенических условий.

Подобные отопительные системы могут быть двух видов:

а) системы, в которых теплота выделяется в жестких или гибких встроенных элементах, когда нагревательный элемент располагается на относительно большой площади теплоизлучающей поверхности;

б) системы с нагревательными кабелями, вмонтированными в теплопроводящий строительный материал, который может перераспределять тепловой поток.

Режим работы нагревательных установок регулируется в зависимости от температуры в помещении. Отопление помещений вы-

полняется также путем укладки в пол специальных тепловыделяющих элементов, как показано на рис. 2.6.

**Установки для обогрева труб, прогрева бетона и грунта.** Для нагрева потока жидкости применяют специальные электрические обогреватели трубопроводов. Они представляют собой плоские металлические обручи толщиной до 5 мм. Между двумя такими обручами размещен нагреватель, намотанный на миканитовую полосу толщиной 0,5 мм. Элементы имеют стяжные обручи, с помощью которых достигается плотное облежание обогреваемой поверхности.

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.

Предпочтителен групповой способ размещения электродов, при котором в каждую фазу питающей сети включается не один, а группа электродов.

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.

При необходимости оттаивать грунт на всю глубину его промерзания более экономично применение вертикальных глубинных электродов. Электроды забивают в грунт сквозь толщу мерзлого слоя на 15—20 см в слой талого грунта.

В начале прогрева ток, проходящий в талом слое, нагревает его и оттаивает расположенную непосредственно над ним часть мерзлого слоя. В связи с этим сечение, по которому проходит ток, постепенно увеличивается и происходит последовательное оттаивание мерзлого грунта.

Электроды диаметром 12—20 мм забивают в грунт и соединяют в три группы для подключения к трехфазной сети. Длина электродов должна превышать глубину промерзания грунта к моменту начала оттаивания на 0,2—0,3 м. Продолжительность нагрева зависит от толщины оттаиваемого слоя и влажности грунта.

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.

При этом в качестве нагревательного элемента используется кабель, который располагается в дорожном покрытии в специальных каналах на глубине нескольких сантиметров от поверхности покрытия.

#### § 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.

При технологических процессах, проводимых в ЭПС, используется только нагрев посредством электричества. В ряде случаев используется возможность нагрева в вакууме или защитных газах. Поэтому рассмотрим общие принципы построения печных установок без детального рассмотрения конструкций, а также схемы электроснабжения и принципы автоматизации.

Электропечи 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 можно расположить в следующем порядке: низкотемпературные (900—1000 К), среднетемпературные (1000—1600 К) и высокотемпературные (выше 1600 К). В ранжированных по признаку достигаемых температур 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 периодически и непрерывно действующие. В свою очередь, печи периодического действия, обслуживающие различные технологические процессы, могут быть камерные, шахтные, колпаковые, камерные с выдвижным подом, элеваторные. Среди ЭПС непрерывного действия различают конвейерные, толкательные, рольганговые, карусельные, с шагающим подом, пульсирующим подом, барабанные, протяжные.

Как видно из названий, все ЭПС отличаются друг от друга способом и механизмом, помещающим нагреваемые тела в рабочее пространство печи. Размеры и мощности печей определяются

необходимой производительностью, уровнем нагрева и теплофизическими характеристиками нагреваемого материала.

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 износоустойчивости деталей. Выпускают также печи с водородной средой для различных технологических процессов, в том числе для восстановления металлов из оксидов и спекания изделий из порошков тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, ниобий, тантал и др.).

В печных установках помимо регулирования режима автоматизируются такие вспомогательные операции, как загрузка и выгрузка изделий, их транспортировка внутри печей, автоматизируются насосы, создающие вакуум и регулирующие состав газовой атмосферы в нагреваемом объеме.

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

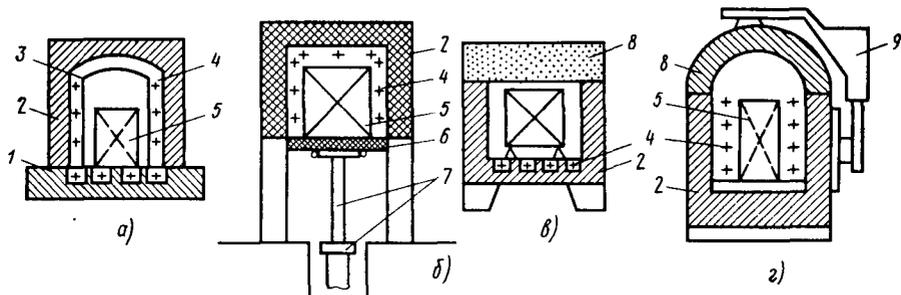


Рис. 2.7. Печи сопротивления периодического действия:

*a* — колпаковая; *б* — элеваторная; *в* — камерная; *г* — шахтная; 1 — стэнд; 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

подъемным нагревательным колпаком и неподвижным стендом (рис. 2.7, 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.

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 электропечь* — печь периодического действия с открытой снизу неподвижной камерой нагрева 2 и с опускающимся подом 6. Она представляет собой цилиндрическую или прямоугольную камеру, установленную на колоннах на высоте 3—4 м над уровнем пола цеха (рис. 2.7, б).

Под печи поднимается и опускается гидравлическим или электромеханическим подъемником, который установлен под камерой нагрева. Нагреваемые изделия — садку 5 нагружают на тележку, затем с помощью лебедки продвигают под печь и поднимают подъемником 7, вдвигая в камеру. По окончании технологического процесса под опускается и изделие снимается.

В низкотемпературных печах нагреватели 4 расположены на стенках. В высокотемпературных печах нагреватели расположены на стенках и в поду.

Элеваторные печи служат для отжига, эмалирования, цементации, обжига керамических изделий, спекания и металлизации деталей.

Печи комплектуются многоступенчатыми трансформаторами.

Элеваторные печи рассчитаны на емкости в десятки тонн, на мощности до 600 кВт и температуру до 1500 К.

*Камерная электропечь* (рис. 2.7, в) — печь периодического действия с камерой нагрева, загрузка и разгрузка садки которой производятся в горизонтальном направлении. Камерная печь состоит из прямоугольной камеры 2 с огнеупорной футеровкой и теплоизоляцией, перекрытой сводом 8 и помещенной в металлический ко-

жух. Печь загружается и выгружается через закрываемое дверцей отверстие в передней части.

В поду камерной печи обычно имеется жароупорная плита, на которой расположены нагреватели 4. В печах до 1000 К теплообмен обеспечивается за счет излучения или вынужденной конвекции, обеспечиваемой замкнутой циркуляцией печной атмосферы.

Печи с номинальной температурой до 1800 К работают как с воздушной, так и контролируемой атмосферой. В крупных печах загрузка и разгрузка механизированы.

*Шахтную печь* выполняют в виде круглой, квадратной или прямоугольной шахты, перекрываемой сверху крышкой. Нагревательные элементы в ней установлены обычно по боковым стенкам. Принципиальная схема такой печи показана на рис. 2.7, г.

**Электропечи сопротивления непрерывного действия (методические печи).** При установившемся технологическом процессе термообработки для увеличения производительности предпочтительно применять непрерывно действующие печи. В зависимости от требований технологического процесса 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. 2.8).

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.

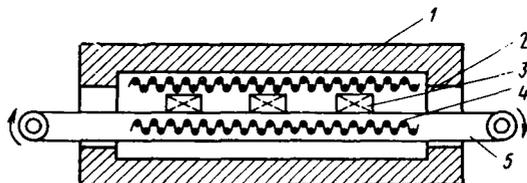


Рис. 2.8. Схема конвейерной электропечи:  
1 — теплоизолированный корпус; 2 — загрузочное окно; 3 — нагреваемое изделие; 4 — нагревательные элементы; 5 — конвейер

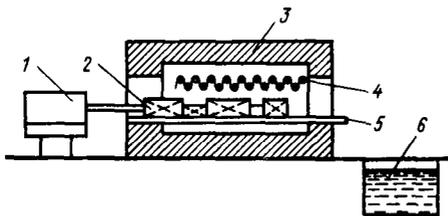


Рис. 2.9. Схема толкательной печи:  
 1 — толкатель с приводным механизмом; 2 — нагреваемые изделия; 3 — теплоизолированный корпус; 4 — нагревательные элементы; 5 — подина печи; 6 — закалочная ванна

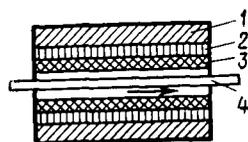


Рис. 2.10. Протяжная электропечь:

1 — теплоизолирующий корпус; 2 — нагреватель; 3 — муфель; 4 — нагреваемое изделие

Конвейер размещается целиком в камере печи и не остывает. Однако валы конвейера находятся в очень тяжелых условиях и требуют водяного охлаждения. Поэтому часто концы конвейера выносят за пределы печи. В этом случае значительно облегчаются условия работы валов, но возрастают потери теплоты в связи с остыванием конвейера у разгрузочных и загрузочных концов. Нагреватели в конвейерных печах чаще всего размещаются на своде или в поду под верхней частью ленты конвейера, реже на боковых стенках.

Конвейерные нагревательные печи в основном применяются для нагрева сравнительно мелких деталей до температуры около 1200 К.

Для высоких температур (выше 1400 К) применяются печи непрерывного действия с перемещением садки путем проталкивания вдоль рабочего пространства — *толкательные печи* (рис. 2.9). Они применяются для нагрева как мелких, так и крупных деталей. На поду таких печей устанавливаются направляющие в виде труб, рельсов или роликового пода, изготовленных из жароупорного материала, и по ним в сварных или литых специальных поддонах перемещаются нагреваемые изделия.

Перемещение поддонов обеспечивается электромеханическими или гидравлическими толкающими устройствами. Основное преимущество таких печей перед другими типами — их относительная простота, отсутствие сложных деталей из жароупорных материалов. Их недостатки — наличие поддонов, применение которых ведет к увеличению тепловых потерь и к повышенному расходу электрической энергии, ограниченный срок службы поддонов.

Толкательные печи, предназначенные для нагрева крупных заготовок правильной формы, выполняют без поддонов. При этом нагреваемые изделия укладывают в печь вплотную непосредственно на направляющие.

Толкательные водородные печи предназначены для различных технологических процессов, требующих нагрева в водороде или диссоциированном аммиаке. Они широко применяются в электро-

ламповом производстве, при производстве металлокерамических деталей и твердых сплавов, для обжига и спекания керамики, для обжига и пайки металлических деталей и т. д.

При использовании в качестве защитного газа водорода или диссоциированного аммиака на загрузочных и разгрузочных камерах печи предусмотрены «свечи» для контроля заполнения ее рабочим газом. Состав рабочего газа каждой печи регулируется самостоятельно и расход его контролируется с помощью расходомеров для водорода и азота. Разгрузочные камеры печей имеют предохранительные клапаны для защиты от разрушения в случае образования в них взрывоопасной смеси.

*Протяжная электропечь* — печь непрерывного действия для нагрева проволоки, прутков или ленты путем непрерывной протяжки через камеру нагрева. Она представляет собой муфель с нагревателями, через который пропускается нагреваемое изделие (рис. 2.10).

Печи с рабочей температурой до 1500 К оборудованы металлическими муфелями, а при более высокой температуре — керамическими. Печи с температурой 1600 К оборудованы многоканальным алундовым муфелем, поверх которого намотан молибденовый нагреватель.

В протяжных печах применяется также смешанный способ нагрева; прямой — с помощью контактных приводных роликов и косвенный — с помощью нагревателя. Косвенный нагрев обеспечивает термообработку концов прутка в начале и в конце процесса, когда прямой нагрев не может быть осуществлен.

**Электропечи сопротивления для плавки металлов.** В установках этого типа производится выплавка олова, свинца, цинка и различных сплавов на их основе, а также других металлов, имеющих температуру плавления 600—800 К. Важное значение имеют ЭПС для плавки алюминия и его сплавов, поскольку позволяют достичь высокой степени очистки. Большим достоинством печей является простота конструкции, источников питания и технологического процесса. Это дало возможность создать автоматизированные разливочные агрегаты с применением микропроцессоров и роботоманипуляторов. С большой эффективностью они используются при изготовлении поршней двигателей внутреннего сгорания и других деталей.

По конструктивному исполнению ЭПС можно подразделить на тигельные и камерные (или ванны).

*Тигельные печи* (рис. 2.11) представляют собой металлический сосуд — тигель (из чугуна с внутренней обмазкой оксидами), помещаемый в цилиндрический корпус, выполненный из огнеупорного материала 5, покрытый снаружи металлическим кожухом 6. Между тиглем и футеровкой размещены электрические нагреватели 4.

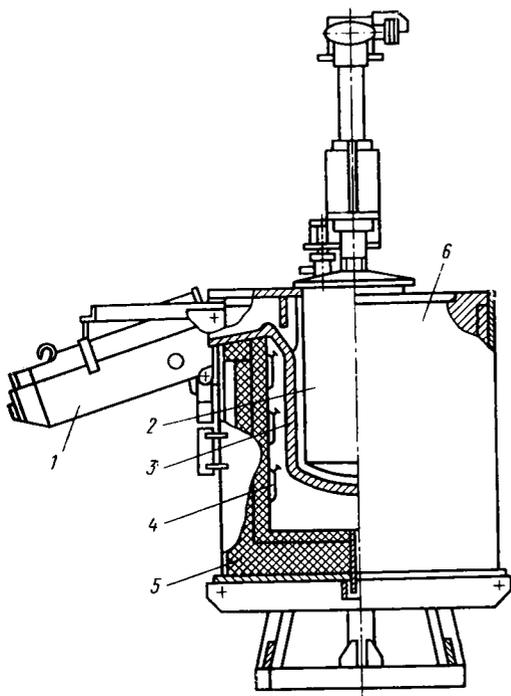


Рис. 2.11. Тигельная электрическая печь сопротивления:

1 — желоб; 2 — механический вытеснитель; 3 — тигель; 4 — нагреватель; 5 — футеровка; 6 — корпус

Приведенная на рисунке конструкция тигельной ЭПС оборудована механическим дозатором и применяется в числе многих других конструкций при массовом производстве, где дозирование металла в промежуточный ковш робота-манипулятора или литейную форму производится с помощью механических, пневматических или электромагнитных устройств. В нашем примере механический вытеснитель 2 размещен на каретке, движущейся вверх и вниз по направляющей колонке. После расплавления металла и доведения его температуры до необходимого уровня вытеснитель опускается в тигель и вытесняет порцию металла, которая по обогреваемому желобу 1 поступает в литейную машину.

Удельный расход электроэнергии при плавке алюминия 700—750 кВт·ч/кг, КПД печи 50—55%. Тигельные ЭПС других конструкций имеют механизм наклона, позволяющий наклонять печь и сливать расплавленный металл.

*Камерные печи* по объему больше тигельных и применяются для переплавки алюминия на слитки.

Удельный расход электроэнергии при работе ЭПС ванного типа составляет 600—650 кВт·ч/кг, а КПД — 60—65%. Во всех типах ЭПС возможны два способа обогрева — внутренний и внешний. При внутреннем обогреве нагреватели—ТЭНы размещены в расплавленном металле и работают при температуре не выше 800—850 К. При внешнем расположении открытые высокотемпературные нагреватели позволяют получить температуры в рабочем пространстве печи 1100—1200 К.

**Установки прямого (контактного) нагрева.** Установками прямого нагрева принято называть такие, в которых 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 значительным омическим сопротивлением. Прямой нагрев не имеет пределов по достижимым температурам, обладает высокой скоростью, пропорциональной вводимой мощности, и высоким КПД. Принципиальная схема прямого нагрева показана на рис. 2.12.

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.

Установка прямого нагрева включает в себя следующие основные узлы:

- а) понижающий трансформатор, монтируемый в кожухе установки с обмоткой, охлаждаемой водой, и несколькими ступенями напряжения в диапазоне 5—25 В, обеспечивающий нагрев тел, имеющих разное сопротивление;
- б) токопровод от выводов обмотки низкого напряжения трансформатора до водоохлаждаемых зажимов;
- в) зажимы, обеспечивающие крепление нагреваемого изделия и необходимое давление в контактах подвода питания;
- г) привод контактной системы;
- д) приборы контроля и автоматического регулирования процесса нагрева.

В установках непрерывного действия для нагрева проволоки, труб, прутков применяются твердые роликовые или жидкостные контакты.

Печи прямого нагрева используются также для графитизации углеродных изделий, получения карборунда и т. д.

Графитировочные печи выполняют однофазными, прямоугольной формы с разъемными стенками. В них достигается температура 2600—3100 К в вакууме или нейтральной атмосфере. Диапазон регулирования вторичного напряжения 100—250 В, потребляемая мощность 5—15 тыс. кВт·А.

Коэффициент полезного действия установки прямого нагрева зависит от сопротивления нагрузки в цепи питания. Действительно, если сопротивление силовой цепи

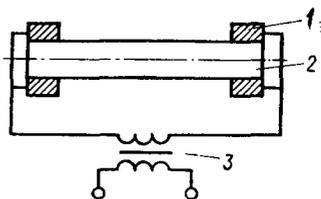


Рис. 2.12. Схема прямого нагрева:

1 — водоохлаждаемые зажимы; 2 — нагреваемое изделие; 3 — печной трансформатор

$$r_{\text{сц}} = r_{2\text{т}} + r_{\text{сп}} + r_{\text{к}} + r_{\text{нт}},$$

где  $r_{2\text{т}}$  — сопротивление вторичной обмотки трансформатора;  $r_{\text{сп}}$ ,  $r_{\text{к}}$  — сопротивления соединительных проводов и контактов;  $r_{\text{нт}}$  — сопротивление нагреваемого тела, то

$$\eta = r_{\text{нт}}/r_{\text{сц}}.$$

Это определяет необходимость изготовления вторичной обмотки трансформатора из проводников с минимальным сопротивлением и приближения (совмещения) к нагревательной установке.

Реальный КПД установки 70—80%,  $\cos \varphi = 0,8$ . Максимальное значение КПД получено при применении автоматических приборов контроля температуры и отключения установки при ее достижении.

### § 2.5. Электрооборудование и регулирование параметров печей сопротивления

Мощность современных электропечей сопротивления колеблется от долей киловатта до нескольких мегаватт. Печи мощностью более 20 кВт обычно выполняют трехфазными и подключают к сетям напряжением 220, 380, 660 В непосредственно или через печные трансформаторы. Коэффициент мощности печей сопротивления близок к единице, распределение нагрузки по фазам в трехфазных печах равномерное.

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

Все промышленные печи сопротивления работают в режиме автоматического регулирования температуры, что позволяет приводить в соответствие мощность печи с требуемым температурным

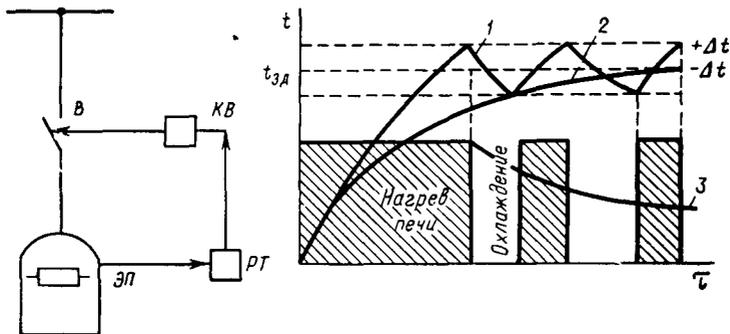


Рис. 2.13. Функциональная схема включения печи, изменение температуры и мощности при двухпозиционном регулировании:  $B$  — выключатель; 1 — температура печи; 2 — температура на ЭП — электропечь; РТ — регулятор температуры; КВ — катушка выключателя; 3 — средняя потребляемая печью мощность

режимом, а это, в свою очередь, ведет к снижению удельного расхода электроэнергии по сравнению с ручным регулированием.

Регулирование рабочей температуры в электрических печах сопротивления производится изменением поступающей в печь мощности.

Регулирование подводимой к печи мощности 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 термопарами, термометрами сопротивления, фотоэлементами. Функциональная схема печи и график изменения температуры и мощности при таком способе регулирования показаны на рис. 2.13.

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.

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:

а) применение регулировочных трансформаторов и автотрансформаторов с плавным бесконтактным регулированием под нагрузкой;

б) использование потенциал-регуляторов;

в) включение в цепь нагревателей дополнительных сопротивлений в виде дросселей и реостатов;

г) импульсное регулирование с использованием тиристорных регуляторов.

Использование трансформаторов с плавным бесконтактным регулированием под нагрузкой, автотрансформаторов и потенциал-регуляторов связано со значительными капитальными затратами, наличием дополнительных потерь и потреблением реактивной мощности. По этой причине такое регулирование температуры применяется сравнительно редко.

Включение в цепь нагревателей дополнительного индуктивного или активного сопротивления связано с дополнительными потерями и потреблением реактивной мощности, что также ограничивает применение этого способа регулирования.

Импульсное регулирование на базе тиристорных регуляторов осуществляется с помощью управляемых полупроводниковых вентилей, периодичность работы которых выбирают в зависимости от тепловой инерционности электропечи. Можно выделить три основных способа импульсного регулирования мощности, потребляемой от сети переменного тока (рис. 2.14).

1. Импульсное регулирование при частоте коммутации  $f_k = 2f_c$  ( $f_c$  — частота тока питающей сети) с изменением момента отпирания

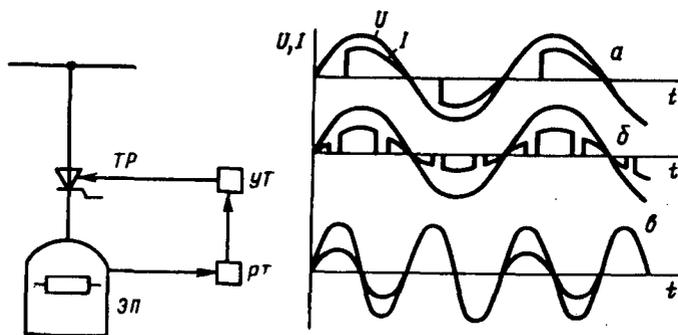


Рис. 2.14. Схема импульсного регулирования мощности печи: ЭП — электропечь; РТ — теплорегулятор; УТ — блок управления тиристорным регулятором; ТР — тиристорный регулятор

ния тиристора называется *фази́мпульсным* или *фа́зовым* (кривые *a* на рис. 2.14).

2. Импульсное регулирование с повышенной частотой коммутации (кривые *b* на рис. 2.14).

3. Импульсное регулирование с пониженной частотой коммутации ( $f_k < f_c$ ) (кривые *в* на рис. 2.14).

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 — вода, расплавы солей, щелочей, оксидов 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 располо-

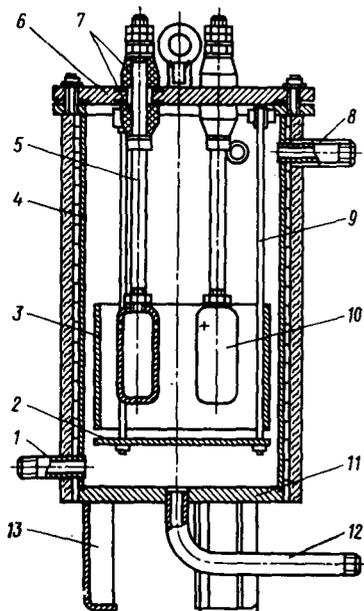


Рис. 2.15. Схема электродного парогенератора:

1 — подвод воды; 2 — дно обечайки; 3 — нулевой электрод; 4 — корпус; 5 — токоподвод; 6 — крышка; 7 — изоляторы; 8 — отвод пара; 9 — шпилька; 10 — фазный электрод; 11 — днище; 12 — дренаж; 13 — опора

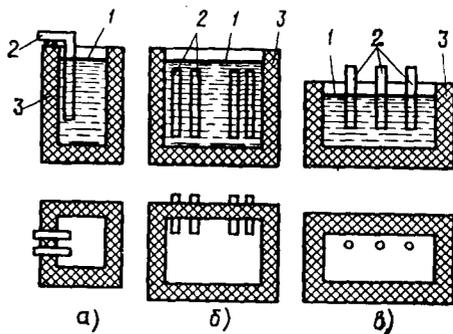


Рис. 2.16. Схемы однофазных электродных ванн с близко расположенными электродами:

*a, б* — однофазные; *в* — трехфазные; 1 — уровень расплава соли; 2 — электроды; 3 — футеровка

жены стержневые электроды и охватывающие их трубчатые анти-электроды. Между ними находятся стеклотекстолитовые цилиндры. Мощность, развиваемую котлом, регулируют, изменяя положение изоляционных цилиндров относительно системы электродов и антиэлектродов.

Номинальный режим работы котла рассчитан на нагрев воды с удельным электрическим сопротивлением 3000 Ом·см. Изменение соледержания в рабочей воде для получения номинального значения удельного электрического сопротивления достигается добавлением в систему либо раствора соли, либо дистиллированной воды. Возможна работа котла и на воде с иным удельным сопротивлением, однако во избежание чрезмерного увеличения поверхностной плотности тока на электродах и образования гремучего газа значение его должно составлять 1000—5000 Ом·см.

Температура выходящей воды автоматически поддерживается в нужных пределах датчиком регулирующего термометра.

Электрический парогенератор представляет собой комплект оборудования и аппаратов, в который входит сам парогенератор, питательный бак, насос, соединительные трубопроводы, приборы контроля и управления. Принципиальная схема электродного парогенератора приведена на рис. 2.15. Парогенератор имеет электроды цилиндрической формы 10 и нулевой электрод 3, выполненный в форме обечайки. Мощность парогенераторов регулируется за счет изменения уровня воды между электродами и нулевым электродом. Работа парогенераторов осуществляется в автоматическом режиме.

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. Как правило, ванна имеет три зоны — варочное отделение, где происходит расплавление шихты и получение жидкой стекломассы, перетекающей по придонному каналу во второе — выработочное отделение, в котором уточняется рецепт стекла, перетекающего на выдачу с заданной температурой. Во всех отделениях в стекломассе находятся электроды из стали, молибдена, графита, обеспечивающие протекание тока через стекломассу и нагрев ее по закону Джоуля — Ленца. Стекловаренные печи имеют мощности от нескольких сотен до нескольких тысяч киловатт и питаются от понижающих трансформаторов со вторичным напряжением 50—200 В. Печи работают круглосуточно,

обладают большой тепловой инерцией и являются спокойной электрической нагрузкой.

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

Теплофизические свойства расплавленных солей, щелочей, оксидов определяют интенсивный теплообмен между средой и погруженными в нее металлическими предметами, а также высокую однородность температурного поля ванны. Находясь в расплаве, изделия защищены от окисления, эта защита сохраняется и после выемки изделий из расплава, так как тонкая пленка его, остающаяся на изделиях, прочно закрывает их поверхность.

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. По расположению электродов в объеме различают ванны с широко- и близко расположенными электродами. При широком расположении электродов возможно попадание изделий в межэлектродное пространство, шунтирование ими тока и перегрев изделий. Поэтому такие ванны применяются ограниченно. Наиболее широкое применение получили ванны с близким расположением погруженных или утопленных электродов.

В однофазных электродных ваннах электроды расположены парно; расстояния между электродами 12—45 мм.

Вследствие возникновения конвективных потоков и магнитогидродинамических явлений происходит интенсивное перемешивание электролита и выравнивание температурного поля ванны. Схема электродной ванны показана на рис. 2.16.

Допустимая плотность тока на электродах устанавливается в пределах 1—2 А/см<sup>2</sup>. В качестве рабочей среды наиболее часто применяют хлористые, фтористые, азотно-кислые соли, щелочи либо в чистом виде, либо в различных смесях, преследуя цель снижения температуры плавления, обеспечения необходимого уровня электропроводности. Для запуска ванны или расплавления застывшего электролита применяют пусковые нагреватели, представляющие собой блок открытых нагревательных элементов, установленных на каркасе и погружаемых в ванну.

К достоинствам соляных ванн следует отнести:

а) высокую скорость нагрева и большую производительность по сравнению с другими нагревательными установками при равных габаритных размерах;

б) легкость осуществления различных способов термической и термохимической обработки;

в) защита изделий от окисления в процессе их нагрева.

Недостатками соляных ванн являются:

а) повышенный удельный расход электроэнергии вследствие увеличенных тепловых потерь с зеркала ванны и необходимости непрерывной работы установки;

б) высокий расход расплавообразующего материала;

в) тяжелые условия труда обслуживающего персонала.

## § 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). Эти процессы разработаны в институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР и в значительной мере усилиями этого института распространены во многих странах.

Сущность ЭШП состоит в следующем (рис. 2.17). Расходуемый электрод из переплавляемого металла 1 погружается в слой электропроводного шлака 2, находящегося в водоохлаждаемом кристаллизаторе 3, закрытом водоохлаждаемым поддоном 4. Электрический 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

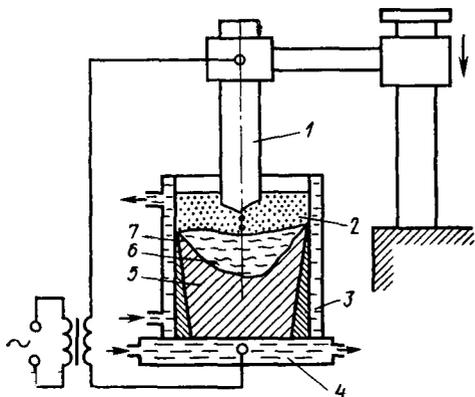


Рис. 2.17. Схема установки электрошлакового переплава

но разогреваются, очищаются от нежелательных примесей и собираются на дне кристаллизатора в виде слитка 6. В результате отвода теплоты в поддон и стенки кристаллизатора скапливающийся металл застывает в виде слитка 6, в верхней части которого находится ванна расплавленного металла 5. По мере оплавления электрод подается вниз. Между стенкой кристаллизатора и слитком образуется слой гарнисажа 7.

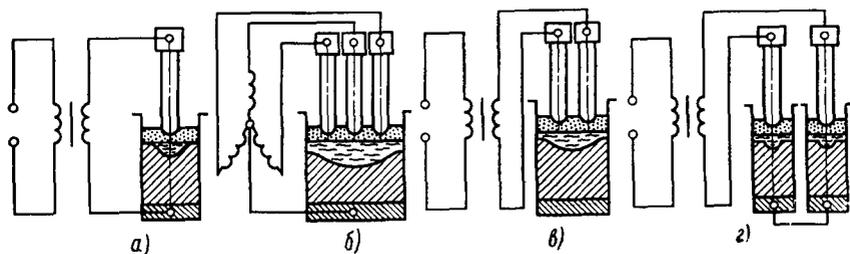


Рис. 2.18. Электрические схемы печей ЭШП:

*a* — одноэлектродная однофазная; *б* — трехэлектродная трехфазная; *в* — двухэлектродная однофазная с бифилярным токопроводом; *г* — то же, для получения двух слитков

Основными факторами, определяющими улучшение качества металла при обработке в установках ЭШП, являются: химическое взаимодействие со шлаком; направленная кристаллизация слитка; формирование слитка в шлаковом гарнисаже с образованием гладкой поверхности.

Поэтому основное назначение установок ЭШП — производство слитков из высококачественных сталей — валковых, шарикоподшипниковых, нержавеющей, жаропрочных.

Электрический режим печей характеризуется наличием периодических пульсаций тока, связанных с образованием капель и переменным значением межэлектродного промежутка.

В зависимости от массы и формы выплавляемого слитка (круглая, прямоугольная, квадратная, трубчатая, фасонная и др.) печи для производства таких слитков имеют различные параметры и конструктивные решения. По количеству одновременно переплавляемых в один кристаллизатор электродов различают одно-, двух-, трех- и многоэлектродные печи. Количество и форма переплавляемых электродов определяются условиями производства и электрической схемой ЭШП. При выборе ЭШП необходимо стремиться к увеличению коэффициента заполнения кристаллизатора, представляющего собой отношение суммарного сечения переплавляемых электродов к сечению слитка. Это позволяет уменьшить высоту установки.

Для большинства промышленных ЭШП коэффициент заполнения кристаллизатора составляет 0,2—0,65 и растет с увеличением массы слитка. Одно- и двухэлектродные печи выполняют по однофазной схеме, а трех- и многофазные — по одно- и трехфазной (рис. 2.18).

Наиболее широкое распространение имеют одноэлектродные однофазные печи (рис. 2.18, *a*). Трехфазные печи (рис. 2.18, *б*) отличаются от однофазных одноэлектродных лучшими энергетическими показателями, но характеризуются меньшим коэффициентом заполнения кристаллизатора, что приводит к увеличению длины электрода и высоты печи.

Двухфазная бифилярная печь (рис. 2.18, в) предназначена для получения слитков прямоугольного сечения. По сравнению с обычными однофазными печами она имеет более высокий коэффициент мощности (до 0,9); у нее меньший удельный расход электроэнергии. Одновременное выплавление двух слитков возможно по схеме с последовательным подключением двух печей к одному трансформатору (рис. 2.18, г). Такая схема обеспечивает высокие технико-экономические показатели вследствие бифилярности электродов и короткой сети, сокращения протяженности токопроводов и уменьшения потребной производственной площади.

Некоторые параметры ЭШП приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Параметр	ЭШП-2,5 ВГ	ЭШП-10 Г	ЭШП-20 ВГ
Мощность источника питания, кВт·А	1600	2500	5000
Максимальный ток, А	21000	28 000	50 000

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). В отечественных конструкциях преимущество отдается печам с перемещаемым кристаллизатором, что облегчает воздействие на шлаковую и металлическую ванны и слиток.

Для осуществления технологических операций ЭШП могут снабжаться четырьмя приводами: перемещения электрода, кристаллизатора, поддона и тележки поддона для выгрузки слитка.

*Привод перемещения электродов* обеспечивает непрерывную или периодическую подачу электродов в шлаковую ванну. Этот привод должен обеспечивать регулируемую в нужном диапазоне скорость подачи электродов.

*Приводы перемещения кристаллизатора* подразделяют на два типа: приводы для монтажных перемещений и приводы для монтажных и рабочих перемещений кристаллизатора во время плавки. Привод тележки поддона обеспечивает транспортировку поддона со слитком из-под печи.

*Кристаллизаторы* могут быть кристаллизаторами — изложницами и скользящими. Первые используются при плавке с неподвижным кристаллизатором, вторые — при плавке с перемещаемым кристаллизатором или вытягиваемым слитком.

*Поддоны* служат для охлаждения торца слитка и иногда для подвода электрического тока к слитку. Они состоят из медной плиты и стального корпуса, к которому подводится охлаждающая вода.

Таблица 2.2

Марка флюса	Химический состав, %				Температура плавления, °С	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO		
АНФ-1П	95	—	5	—	1300—1410	0,0015—0,002
АНФ-6	70	30	—	—	1320—1340	0,003—0,0035
АН-291	18	40	25	17	1450	0,0037—0,004

На медной плите имеется контакт для подсоединения токопровода. Печи ЭШП питаются от специальных печных трансформаторов, отличающихся высоким коэффициентом трансформации и значительным числом ступеней напряжения, переключаемых под нагрузкой. Токпровод печи состоит из короткой сети и электродов. К короткой сети относятся шинопровод из медных шин, верхняя и нижняя кабельные гирлянды и трубошины для подведения тока к электрододержателям.

Процесс переплавки на печи ЭШП делится на основной и вспомогательный периоды. В течение основного периода плавки производится наплавление слитка, включающее в себя переплав металла и вывод усадочной раковины. Для вывода раковины в конце плавки постепенно снижают вводимую в ванну мощность. Длительность периода переплава зависит от химического состава переплавляемого металла и шлака, а также от размеров слитка.

Во вспомогательный период производят подготовку печи к плавке и наведение ванны жидкого шлака в кристаллизаторе. При этом производят следующие операции: охлаждение слитка в кристаллизаторе после предыдущей плавки; выгрузку слитка и застывшего шлака из печи, снятие огарков электрода и установку новых электродов в электрододержатель, чистку кристаллизатора и поддона, окончательную сборку и подготовку печи к следующему циклу. После окончания подготовительного периода приступают к наведению шлаковой ванны в кристаллизаторе. На установках ЭШП применяют твердый и жидкий старты процесса. При твердом старте шлак расплавляют непосредственно в кристаллизаторе печи с помощью расходуемого электрода и запальных смесей. При жидком старте предварительно расплавляют шлак в специальных печах, после чего его заливают в кристаллизатор.

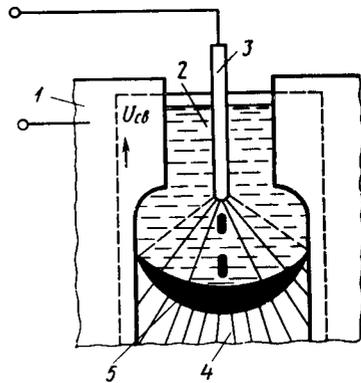


Рис. 2.19. Схема электрошлаковой сварки

Химический состав и свойства некоторых флюсов приведены в табл. 2.2.

**Электрошлаковая сварка (ЭШС).** Она 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. 2.19.

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. Они имеют соответствующую аппаратуру управления. У источников питания ЭШС бывают разные внешние характеристики от крутопадающей до жесткой, мощность их 60—550 кВ·А, вторичное напряжение 8—63 В.

## Глава 3

### УСТАНОВКИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

#### § 3.1. Физические основы электрической контактной сварки и ее разновидности

Электрическая контактная сварка представляет собой процесс образования неразъемного соединения в результате нагрева металлических деталей протекающим по ним электрическим током, расплавления и сдавливания 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  $T_r$  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. Общее количество энергии  $Q$  (Дж), выделяющейся между электродами,

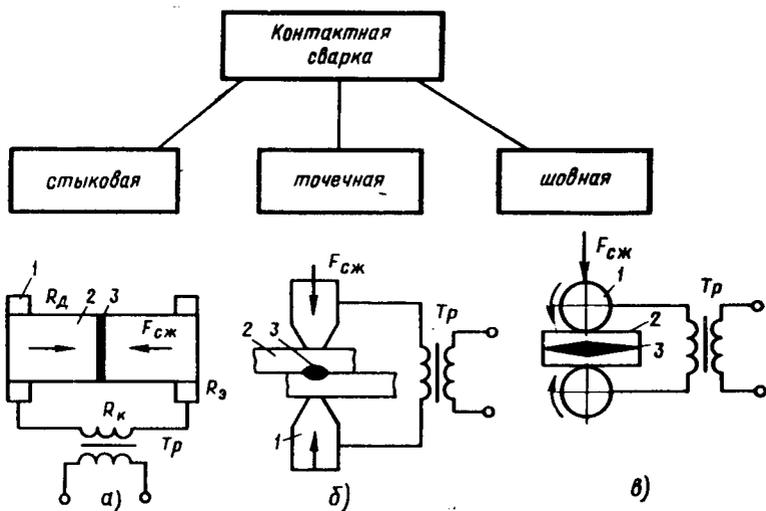


Рис. 3.1. Виды контактной сварки:  
 а — стыковая; б — точечная; в — шовная

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

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 тысячи 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 пло-

щадь 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:  $j=160\div 400$  А/мм<sup>2</sup>;  $p=0,4\div 1,2$  ГПа;  $t_{св}=0,1\div 1,0$ 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:  $j=80\div 160$  А/мм<sup>2</sup>;  $p=0,15\div 0,4$  ГПа;  $t_{св}=0,5\div 3$  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 токопроводах 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 ( $0,8\text{—}0,9 T_{пл}$ ). Затем резко увеличивают усилие сжатия (осадка деталей), в результате чего в твердой фазе образуется сварное соединение.

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

При сварке *непрерывным оплавлением* детали сближаются при включенном сварочном трансформаторе и путем сжатия осуществ-

ляется 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. Избыточный расплавленный металл выдавливается из зазора между свариваемыми деталями («грата»).

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

Сварка с оплавлением стыка деталей по сравнению со сваркой без оплавления имеет следующие преимущества: более прочный шов, не требующий большой механической обработки; меньшая мощность сварочной установки; пониженный удельный расход электроэнергии; возможность сваривания различных металлов.

К недостаткам следует отнести неизбежную хотя и небольшую потерю металла и наличие «грата» на стыке свариваемых деталей.

Конструктивная схема и сварочный контур машины стыковой сварки показаны на рис. 3.2.

Машины для стыковой сварки могут быть подразделены по *способу сварки* (без оплавления стыка и с его оплавлением), *назначению* (универсальные и специализированные) и *способу установки* (стационарные и переносные).

Машины различают также по мощности, типу зажимных устройств и механизму подачи.

Машины общего назначения подразделяют на три группы: неавтоматические малой мощности для сварки сопротивлением, средней мощности для сварки сопротивлением и оплавлением и автоматические средней и большой

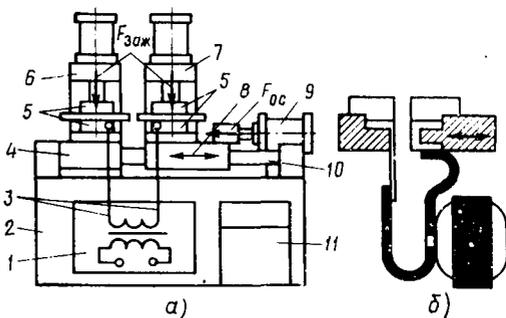


Рис. 3.2. Конструкция (а) и сварочный контур (б) машин стыковой сварки:

1 — источник тока; 2 — станина; 3 — токоподводы; 4 — неподвижная плита; 5 — губки; 6, 7 — зажимные устройства; 8 — подвижная плита; 9 — привод подачи; 10 — направляющие; 11 — аппаратура управления

мощности для сварки оплавлением (оплавлением с подогревом).

Машины первой группы снабжаются рычажно-эксцентриковым механизмом подачи и осадки, а также устройством для отжига металла зоны сварки непосредственно в зажимах машины.

Сварочные машины второй группы предназначены для сварки оплавлением и оплавлением с подогревом деталей из сталей и цветных сплавов. Их можно использовать и для сварки сопротивлением, для чего предусмотрен отдельный пружинный привод осадки.

Машины этих двух групп имеют ручной рычажный привод подачи и осадки. Сварочный ток выключается в конце осадки конечным выключателем.

К третьей группе относятся машины, производящие сварку непрерывным оплавлением в автоматическом и полуавтоматическом цикле с предварительным подогревом концов свариваемых деталей. Машины имеют электромеханический привод, обеспечивающий непрерывное оплавление и осадку. Для зажатия деталей используется пневмогидравлический привод, для подачи и осадки — гидравлический.

Универсальные машины используются для сварки различных деталей в мелкосерийном и индивидуальном производстве, а специализированные — для сварки однотипных деталей в условиях крупносерийного и массового производства.

### § 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. 3.3.

Машины точечной сварки различаются по способу подвода тока. Наиболее широко распространена *одноточечная двусторонняя* (нормальная) сварка (см. 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. 3.4, а—в). Это достигается увеличением рабочей поверхности одного из электродов (рис. 3.4, а), сваркой на плоском электроде (рис. 3.4, б) либо введением промежуточной плоской пластины между одним из электродов и деталью (рис. 3.4, в). Необходимая плотность тока для обеспечения концентрированного нагрева создается вторым электродом с нормальной рабочей поверхностью.

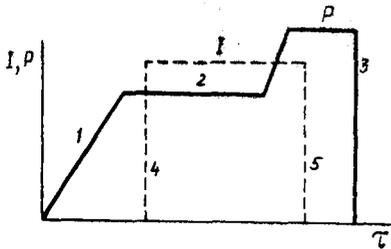


Рис. 3.3. Цикл точечной сварки:  
 1 — сжатие деталей электродами ( $P$ );  
 2 — удержание электродов в сжатом состоянии и повышение давления в конце импульса тока; 3 — снятия давления;  
 4 — включение тока; 5 — выключение тока

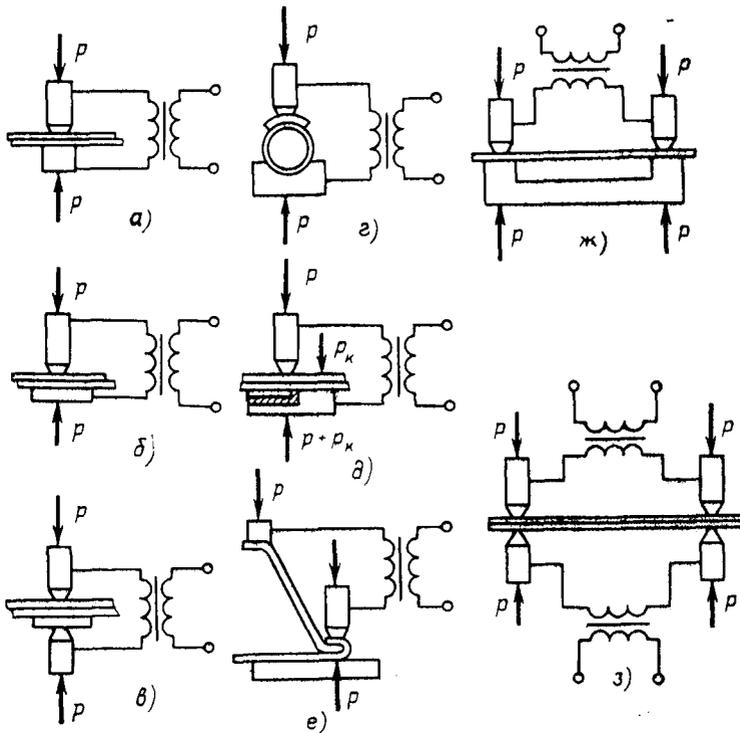


Рис. 3.4. Принципиальные схемы основных способов точечной сварки

В случае невозможности осуществления нормальной односточечной 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. 3.4, г). Для уменьшения местных остаточных деформаций от сварки применяются способы, показанные на рис. 3.4, д, е.

При сварке тонколистовых изделий применяется *односторонняя многоточечная* сварка (рис. 3.4, ж). Одновременная сварка двух точек при двустороннем токопроводе от спаренного трансформатора (рис. 3.4, з) позволяет сваривать металлические изделия большой толщины.

Существует довольно много конструкций машин для точечной сварки, отличающихся устройством механизмов для сжатия электродов — с педальным, электрическим или пневматическим механизмом сжатия. Кроме того, машины точечной сварки бывают стационарные универсальные, переносные универсальные, стационарные специализированные (многоточечные) и прессы для рельефной сварки.

Работа механизмов сжатия деталей в машинах точечной сварки связана с моментами включения и выключения тока. Обычно принимается такая последовательность операций в машинах: сжатие деталей электродами без пропуска тока, пропускание сварочного тока через сжатые детали, выключение тока, подъем верхнего электрода. Если не соблюдать этой последовательности операций, то возможен непровар или прожог деталей в месте сварки.

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.

При сварке точками громоздких изделий, а также при сварке в неудобных местах применяют переносные сварочные машины — *сварочные клещи и сварочные пистолеты*.

Машины для *многоточечной сварки* последовательно сваривают несколько точек за одну установку изделия и обеспечивают высокую производительность процесса точечной сварки. Существует два типа многоточечных машин. В машинах первого типа на свариваемые листы одновременно опущены только два электрода, через которые в данный момент идет сварочный ток. В машинах второго типа на листы опускаются одновременно все электроды, ток же проходит последовательно через каждую отдельную пару электродов, осуществляя сварку металла.

*Специальные машины* бывают многоэлектродными или обычными со специальными поворотными столами, устройствами для подачи деталей и механизмами их вращения. Многоэлектродные машины выполняют с последовательным зажатием электродов через

гидрораспределитель и подачей тока токораспределителем; с одновременным зажатием электродов при последовательном включении трансформатора в сварочной цепи с токораспределителем или с одновременным или групповым включением нескольких трансформаторов с первичной стороны. Многотрансформаторные машины нашли наиболее широкое применение в промышленности в робототехнических устройствах, снабженных микропроцессорами. Машины с поворотными столами применяются при совмещении операций сборки и сварки.

Электроды точечных машин вставляются в электрододержатели, которые крепятся в хоботах точечной машины. Электрододержатели изготовляют из латуни. В них имеются каналы для охлаждающей воды. Охлаждающая вода имеет доступ к внутреннему каналу сменных электродов, которые изготовляют из холоднотянутой красной меди или из специального хромоцинкомедного сплава.

### § 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. 3.5. 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).*

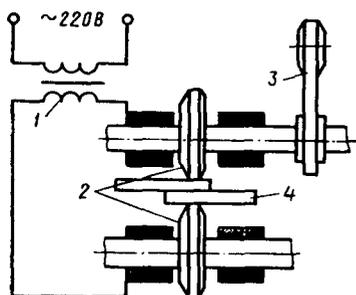


Рис. 3.5. Схема шовной сварки:  
1 — сварочный трансформатор; 2 — контактные ролики; 3 — прижимное устройство; 4 — свариваемые детали

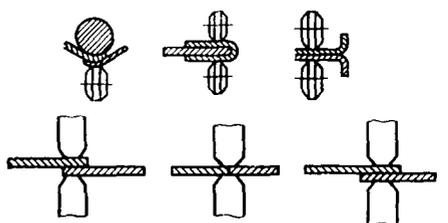


Рис. 3.6. Схема расположения роликов и свариваемых деталей при различных способах шовной сварки

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

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

Наиболее эффективно применение шовной сварки при изготовлении тонкостенных сосудов, сварных металлических труб и других подобных изделий.

Взаимное расположение роликов и свариваемых деталей при осуществлении различных способов шовной сварки показано на рис. 3.6.

От стационарных точечных сварочных машин установки шовной сварки отличаются типом электродов (ролики с механическим приводом).

По характеру монтажа установки шовной сварки подразделяют на стационарные и передвижные, по расположению роликов — продольные и поперечные, по приводу — рычажно-пружинные и с механическим приводом нажатия, по расположению роликов относительно изделия — с дву- и односторонним расположением, по количеству роликов — на одно-, двух- и многороликовые.

### § 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* с целью повышения надежности широко применяются сварочные трансформаторы с витыми сердечниками и обмотками, залитыми эпоксидным компаундом, используется аппаратура управления на элементах «Логика» и с интегральными схемами; прерыватели тока с применением тиристоров, высокопроизводительная пневматическая и гидравлическая аппаратура и уплотнительные манжеты повышенной надежности.

По роду питания, преобразования или накопления энергии различаются следующие машины контактной сварки: а) однофазного переменного тока промышленной или пониженной частоты; б) постоянного тока (с выпрямлением тока во вторичном контуре);

в) трехфазного тока, низкочастотные с тиристорным преобразователем; г) 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. По сравнению с низкочастотными машинами они более универсальны и надежны в работе, имеют меньшие расход энергии и металлоемкость. Применение постоянного тока в шовных машинах позволяет значительно повысить скорость сварки при высоком качестве, а в многоэлектродных машинах поочередное или групповое питание электродов можно осуществлять от одного источника тока. Это позволяет располагать электроды более компактно и таким образом улучшить конструкцию многоэлектродных машин, прессов, сварочных комплексов и линий.

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 кВ·А.

Схема электрической части машин контактной сварки показана на рис. 3.7. Для подвода сварочного тока к детали 1 служит состоящий из различных элементов токопровода вторичный контур 2.

Форма кривой и значение силы сварочного тока получают 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 вентилей контактора 5 (выпрямители 6) относительно фазы напряжения сети в каждой полувольтне. Аппаратура управле-

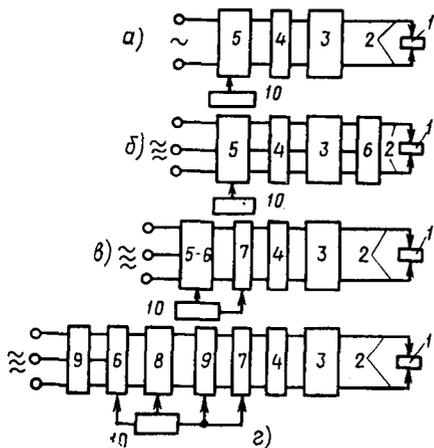


Рис. 3.7. Структурная схема электрической части основных типов машин контактной сварки

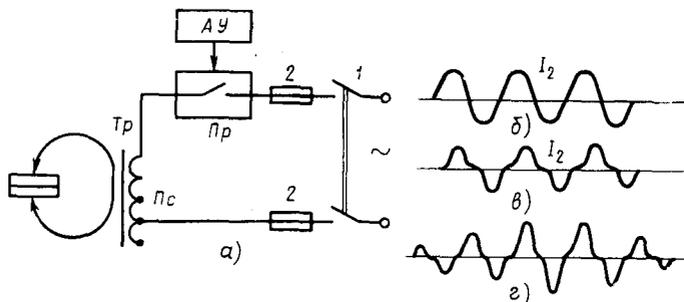


Рис. 3.8. Электрическая схема силовой части машины переменного тока (а) и форма импульсов сварочного тока (б—г)

ния обеспечивает заданную последовательность и продолжительность всех или части операций сварочного цикла.

В *однофазных машинах переменного тока* (рис. 3.8) сварочный трансформатор ТС включается в электрическую сеть рубильником  $I$  через предохранители 2 и переключателем ступеней ПС посредством контактора-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. 3.8, б, в). При наличии специальных модуляторов тока можно получить импульс тока с плавным изменением амплитуды (рис. 3.8, г).

Применение однофазных машин контактной сварки ограничивается возможностями включения в заводские трехфазные сети однофазных нагрузок большой мощности вследствие возможного перекаса фаз. Сложность электроснабжения однофазных сварочных машин обусловлена повторно-кратковременным режимом их

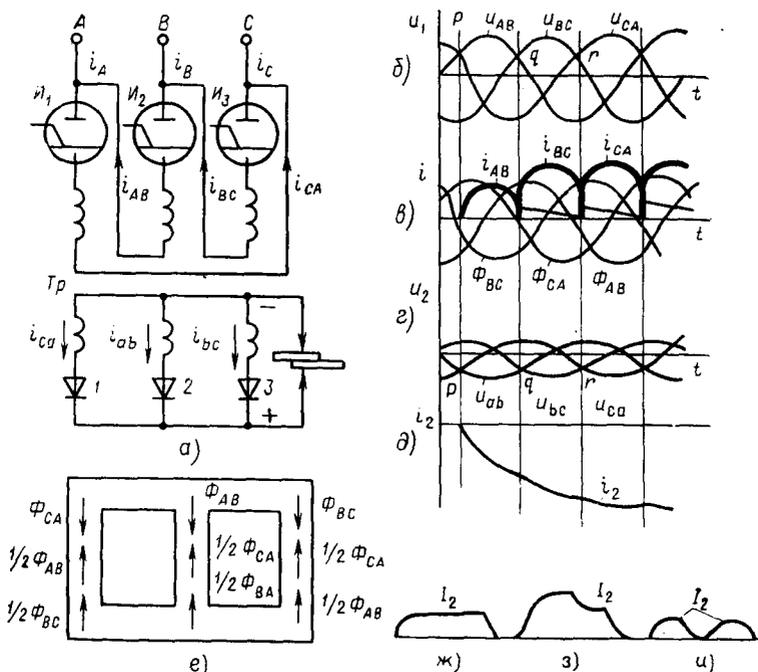


Рис. 3.9. Схемы выпрямителей сварочных машин постоянного тока

работы, вызывающим периодические изменения напряжения сети, что оказывает вредное влияние на работу параллельно с машиной других электроприемников.

Коэффициент 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 понижения частоты вторичного напряжения сварочного трансформатора.

В сварочных машинах постоянного тока (трехфазные с выпрямителем тока во вторичном контуре) (рис. 3.9) первичную обмотку включают по схеме «треугольник», а к соединенной по схеме «звезда» вторичной обмотке через вентили 1—3 (рис. 3.9, 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  $Tp$  и регулирование тока — осуществляется игнитронами или тиристорами, включенными после-

довательно с первичными обмотками. При мгновенной коммутации ток через игнитрон  $I_1$  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. 3.9, б). В эту треть периода ток через два других игнитрона 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. 3.9, в) происходит в момент пересечения положительных полусинусоид напряжения (точки  $p, q, r$  на диаграмме рис. 3.8, б). Аналогично, коммутация тока проходит и в сварочной цепи (рис. 3.9, г, д). Несмотря на униполярное протекание тока в первичной обмотке (рис. 3.9, в), магнитные потоки в стержнях трехфазной магнитной системы (рис. 3.9, 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;  $T = L_2/R_2$  — эквивалентная постоянная времени;  $L_2$  — индуктивность, Гн.

При включении выпрямителя происходит спад тока до нуля по экспоненте, крутизна которой определяется значением  $T$  (рис. 3.9, ж). После выключения выпрямителя через некоторую паузу возможно его повторное включение. В зависимости от длительности паузы и угла поджигания игнитронов (тиристоров)  $\alpha$  импульс тока имеет различную форму (рис. 3.9, з, и).

Преимуществами машин постоянного тока являются: равномерная загрузка фаз, широкая возможность регулирования формы и длительности импульса тока, а также получение многоимпульсного режима; меньшая потребляемая мощность по сравнению с однофазными машинами, особенно при больших вылетах и при сварке материалов с малым удельным сопротивлением; отсутствие влияния вносимых в сварочный контур ферромагнитных масс на значения сварочного тока.

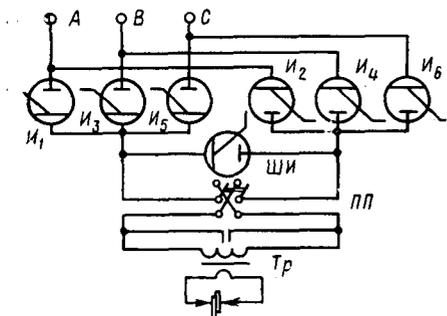


Рис. 3.10. Схема преобразователя однополупериодной низкочастотной машины

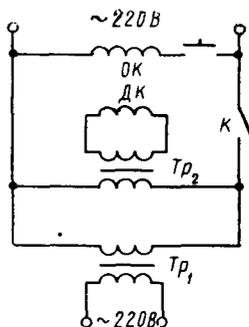


Рис. 3.11. Схема синхронного электромагнитного контактора

В низкочастотных сварочных машинах используется преобразование трехфазного тока промышленной частоты в импульсы тока низкой частоты (5—20 Гц). Это достигается кратковременным включением силового игнитронного выпрямителя в первичную обмотку сварочного трансформатора  $ТС$  машины (рис. 3.10). Их преимуществами являются: благоприятная форма импульса сварочного тока — плавное его нарастание и спад, равномерная нагрузка трехфазной сети при пониженной потребляемой мощности вследствие пониженной индуктивности контура и повышенный коэффициент мощности по сравнению с однофазными машинами.

В машинах контактной сварки с накоплением энергии во время паузы происходит медленное накопление энергии в накопителе с потреблением небольшой мощности из сети и кратковременное использование ее во время процесса сварки.

Для обеспечения заданной производительности контактных сварочных машин и высокого качества сварки необходимо строго соблюдать определенное время протекания сварочного тока для каждого цикла сварки. Это достигается соответствующими элементами схем управления сварочных установок.

Одним из таких элементов являются выключатели сварочного тока. Они выполнены в виде механических выключателей, асинхронных электромагнитных контакторов, синхронизированных электромагнитных контакторов, игнитронных выключателей и т. д.

а. Механический выключатель тока имеет систему подвижных и неподвижных контактов, которые включаются в первичную цепь трансформатора сварочного тока. Механизм привода контактов связан с устройством зажатия свариваемых изделий. При малой скорости коммутации контакты механического выключателя подгорают и требуют частой замены, что ограничивает их применение в маломощных машинах контактной сварки.

б. Применяющиеся в сварочных машинах асинхронные электромагнитные пускатели имеют ограниченный срок службы контактов, поскольку они разрывают рабочий ток в произвольной точке синусоиды.

в. Синхронный электромагнитный контактор (рис. 3.11) разрывает электрическую цепь в момент прохождения тока через нуль, что исключает подгорание контактов контактора. Контактор  $K$  подключает сварочный трансформатор  $Tr_1$ . Кроме основной катушки  $OK$  он имеет дополнительную катушку  $DK$ , которая включается во вторичную цепь вспомогательного трансформатора  $Tr_2$ . После разрыва цепи основной катушки протекание тока в ней прекращается, но дополнительной катушкой якорь контактора удерживается в притянутом положении до момента прохождения тока через нуль.

Время протекания сварочного тока обеспечивается специальными регуляторами времени, которые делятся на электромеханические, электропневматические и электронные.

При *электродвигательном* приводе контактных машин обычно применяются электромеханические регуляторы времени. Их рабочими органами являются кулачки, воздействующие при вращении вала электродвигателя своими выступами на механические выключатели тока.

В контактных сварочных машинах с *пневматическим механизмом* сжатия применяются электропневматические регуляторы времени.

Схема электронного регулятора времени показана на рис. 3.12.

Цепь управления электромагнитным контактором  $KЦ$  сварочного трансформатора  $Tr_1$  приводится в действие замыканием контактов кнопки  $K$ , а ее отключение осуществляется автоматически электронной схемой через определенный промежуток времени. До замыкания контактов кнопки  $K$  ток от зажима сети  $1$  протекает через регулируемое сопротивление  $R$  — сетку и катод триода  $L$ , нормально замкнутые контакты реле  $Э$  и катушку контактора  $KT$  во второму полюсу сети  $2$ . Шунтирующий сопротивление конденсатор заряжается при протекании тока через триод  $L$ . Поскольку сеточный ток мал, включение контакта  $KT$  не происходит. Сеточный ток лампы прекращается при нажатии кнопки  $K$ , при этом сетка оказывается соединенной с внешней частью через отрицательно заряженный конденсатор и катушку реле. По мере разрядки конденсатора н

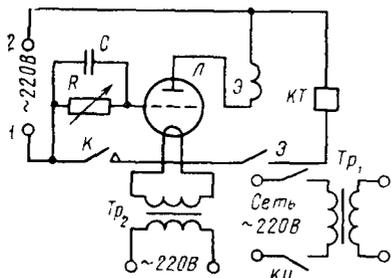


Рис. 3.12. Схема электронного регулятора времени

регулируемое сопротивление отрицательное смещение на сетке уменьшается и по истечении некоторого времени после нажатия кнопки  $K$ , которое необходимо для проведения сварки, триод  $L$  отпирается. Анодный ток проходит через реле  $\mathcal{E}$ , которое размыкает свои контакты, обесточивая тем самым катушку контактора  $KT$ . Вследствие этого сварочный трансформатор отключается от сети независимо от того, замкнута ли кнопка  $K$ .

После размыкания контакта кнопки  $K$  анодная цепь триода  $L$  разрывается, реле  $\mathcal{E}$  обесточивается и восстанавливается исходное положение схемы.

Контактные сварочные установки являются массовыми потребителями электроэнергии, поэтому совершенствование организации их использования является важным направлением экономии электроэнергии. Для достижения положительных результатов необходима совместная работа энергетиков и технологов. Наилучшие результаты дают следующие мероприятия: совершенствование технологии сварки, включающее подготовку деталей под сварку, ускорение компоновки деталей, оптимизация цикла сжатия деталей, ограничение холостого хода источников питания, периодическая ревизия контактных соединений в цепи сварочного тока, установление норм расхода электроэнергии на сварочные работы.

## 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  $I$ , 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

$$P = I^2 r = E^2 r / z^2.$$

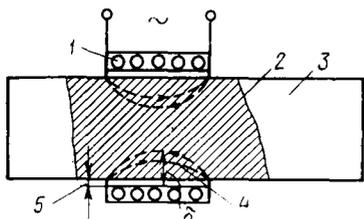


Рис. 4.1. Принципиальная схема индукционного нагрева:  
 1 — индуктор; 2 — магнитный поток в нагреваемом теле; 3 — нагреваемое тело; 4 — наведенный ток; 5 — воздушный зазор

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 ма-

териалов и получения плазмы.

Режим выделения мощности при индукционном нагреве обладает большим быстродействием и легко поддается автоматизации по требованию технологических процессов, проходящих в открытой атмосфере, в защитных газах и вакууме.

Особенностью индукционного ввода энергии является возможность регулирования пространственного расположения зоны протекания вихревых токов. Во-первых, вихревые токи протекают в пределах площади, охватываемой индуктором. Нагревается только та часть тела, которая находится в магнитной связи с индуктором независимо от общих размеров тела. Во-вторых, глубина зоны циркуляции вихревых токов и, следовательно, зоны выделения энергии зависит кроме других факторов от частоты тока индуктора (увеличивается при низких частотах и уменьшается с повышением частоты). Эффективность передачи энергии от индуктора к нагреваемому току зависит от величины зазора между ними и повышается при его уменьшении. Как и нагрев сопротивлением, индукционный нагрев обеспечивает высокую производительность и хорошие санитарно-гигиенические условия труда, хотя для его осуществления требуются более сложные источники питания и повышенный удельный расход электроэнергии на технологические операции.

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. В большинстве случаев индукторы имеют много витков и изоляцию между витками.

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 распространенным является внешнее расположение индуктора на цилиндрическом нагреваемом теле. При прохождении по индуктору переменного тока в соответствии с теорией, изложенной в [33], напряженность магнитного поля в полости одинакова во всех его точках. Поток энергии (квар) внутрь полости индуктора через его поверхность на единицу длины составляет

$$P_{q1,0} = 7,9 \cdot 10^{-9} (I\omega_{1,0})^2 f (\pi D_b^2/4),$$

где  $(I\omega_{1,0})^2$  — квадрат ампер-витков индуктора;  $f$  — частота тока;  $\pi D_b^2/4$  — площадь поперечного сечения полости индуктора.

Отсюда следует, что мощность в полости индуктора чисто реактивная и идет на создание переменного магнитного поля.

Потери в многовитковом индукторе, создаваемые поглощением электромагнитной энергии на 1 м его длины,

$$P_{н1,0} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega_{1,0})^2 D_a \sqrt{\rho_{и}} f F_{и}/k_{эи};$$

$$P_{и1,0} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega_{1,0})^2 D_a \sqrt{\rho_{и}} f G_{и}/k_{эи}.$$

Здесь  $D_a = 2R_a$  — «активный» диаметр индуктора (для индуктора снаружи нагреваемого тела  $D_a = D_b = 2R_a$ , для индуктора, помещенного в полость цилиндра,  $D_a = D_{и} = 2R_{и}$ );  $\rho_{и}$  — удельное сопротивление материала индуктора;  $F_{и}$ ,  $G_{и}$  — комплексы, образованные из функции Бесселя, приведены в виде таблиц и графиков в справочной литературе. Потери мощности в зазоре между индуктором и нагреваемым телом зависят от взаимных размеров сопрягающихся деталей. Если в полости индуктора находится нагреваемый металлический цилиндр, то потери в зазоре

$$P_{з1,0} = 6,2 \cdot 10^{-9} (I\omega_{1,0})^2 f d_0^2 [(D_{и}/d_0)^2 - 1].$$

При нахождении индуктора в полости нагреваемого цилиндра потери энергии в зазоре

$$P_{з1,0} = 6,2 \cdot 10^{-9} (I\omega_{1,0})^2 f d_b^2 [1 - (D_{и}/d_b)^2].$$

Здесь  $d_0$ ,  $d_{и}$ ,  $D_b$  и  $D_{и}$  — 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

$$P_{1,0} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega_{1,0})^2 d_0 \sqrt{\rho_{и}} f F_{он}$$

и реактивной мощности

$$P_{q1,0} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega_{1,0})^2 d_0 \sqrt{\rho_{и}} f G_{он},$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление нагреваемого материала;  $\mu$  — магнитная проницаемость;  $f$  — частота поля;  $(I\omega_{1,0})$  — ампер-вит-

ки 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

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

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

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  $P_{1,0}$ , выделяющейся в металле, и активных потерь в индукторе  $P_{и1,0}$ :

$$\eta_0 = 1 / (1 + P_{и1,0} / P_{1,0}).$$

Максимальное значение КПД составляет 0,70—0,881. Для получения высоких КПД частота при уменьшении диаметра цилиндра должна повышаться до некоторого предела, после которого КПД остается неизменным.

Потери энергии в зазоре снижают КПД системы приблизительно на 10% (при больших зазорах). Эффективность нагрева тем выше, чем меньше соотношение  $\rho_{и}/(\rho\mu)$ , поэтому индукционный нагрев сплошных металлических цилиндров из хорошо проводящих материалов меди или алюминия неэкономичен.

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:

$$\cos\varphi = 1 / \sqrt{1 + \frac{(P_{q1,0} + P_{зq1,0} + P_{иq1,0})^2}{P_{1,0} + P_{и1,0}}}$$

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  $\Delta_0$  меньше потока на поверхности в  $e^2$  раз и составляет  $0,136P_0$ , где  $P_0$  — поток энергии на поверхности.

В слое металла толщиной  $\Delta_3$  поглощается 86,4% энергии, прошедшей через поверхность тела. Используя соотношение  $\mu_a = \mu\mu_0$  и  $\omega = 2\pi f$ , где  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость нагреваемого металла;  $\mu_0$  — магнитная постоянная, равная  $0,4\pi 10^{-6}$  Гн/м, глубина проникновения

$$\Delta_3 = 503\sqrt{\rho/(\mu f)}.$$

Отсюда следует, что глубина нагрева тела увеличивается с ростом его удельного сопротивления и понижается с ростом частоты тока. Кроме того, эта формула 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.

Наличие в системе индуктор — нагреваемое тело двух потоков магнитной энергии — прямого и встречного, вызванного наведенными токами, приводит к возникновению механической силы, действующей на каждый элемент нагреваемого тела, называемой электродинамической силой.

Сжимающее усилие

$$p_{сж} = 6,28 \cdot 10^{-7} (I\omega_{1,0})^2 \mu (1 - e^{-2z/\Delta_3}),$$

где  $z$  — координата.

Для немагнитного или любого расплавленного металла, когда  $\mu = 1$ ,

$$p_{сж} = 6,41 \cdot 10^{-12} (I\omega_{1,0})^2 (1 - e^{-2z/\Delta_3}).$$

Сжимающее усилие при прочих условиях обратно пропорционально глубине проникновения  $\Delta_3$  и прямо пропорционально магнитной проницаемости  $\mu$ . Максимальное значение сжимающих усилий находится в точках, наиболее удаленных от индуктора, с уменьшением частоты  $p_{сж}$  возрастает.

Указанные свойства системы приводят к деформации нагретых тел и перемещению расплава и плазмы.

При выводе приведенных формул были приняты некоторые допущения и учитывалось взаимное влияние отдельных факторов друг на друга, которые необходимо предусматривать в инженерных расчетах. Кроме этого, в индукционных нагревательных установках имеют место: *поверхностный эффект* — вытеснение тока к поверхности проводника при увеличении частоты изменения тока; *эффект близости* — повышение плотности тока на внутренних сторонах двух проводников; *катушечный эффект* — повышение плотности тока на внутренней стороне кольцевого проводника с током.

Рассмотренные элементы системы индукционного нагрева могут иметь следующее техническое исполнение.

Индуктор с точки зрения электротехники представляет собой в большинстве случаев соленоид, имеющий один или несколько добачочных 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>. Потери энергии в индукторах могут достигать 20—30% полезной мощности установки. В силу того что индуктор находится под напряжением и охлаждается хладагентом, а изделие нагревается до высокой температуры, между индуктором и изделием создается зазор, влияние которого на энергетические характеристики установок мы рассмотрели ранее. В этом зазоре помещается электрическая и огнеупорная изоляция, толщина которой зависит от свойств применяемых материалов. Нагреваемое тело может быть в твердом (металлы), жидком (расплавы металлов и неметаллов) и плазменном состояниях. В силу этого 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 два типа: *канальные* и *тигельные*. Конструкция этих печей в значительной мере определяют их электрические параметры, энергетические характеристики и технологические возможности.

Необходимость получения полупроводниковых материалов, металлов высокой чистоты, сплавов на основе химически активных и тугоплавких металлов, а также плавящихся огнеупорных материалов повышенной чистоты, получение которых в печах с керамической футеровкой весьма затруднительно, привела к созданию новых методов и установок индукционной плавки, обеспечивающих получение указанных материалов без примесей и при гораздо более высоких температурах, чем в тигельных или канальных индукционных печах. К такого типа процессам относятся индукционная гарниссажная плавка, индукционная струйная плавка, плавка во взвешенном состоянии, зонная плавка в холодном тигле, кристаллизационная плавка.

**Индукционные канальные печи.** 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 харак-

теристикам каналные печи подобны силовым трансформаторам с распределенной по длине вторичной обмотки нагрузкой. Принципиальная схема индукционной каналной печи (ИКП) приведена на рис. 4.2. С целью уменьшения потока рассеяния  $\Phi_s$  первичную  $w_1$  и вторичную  $w_2$  обмотки располагают на одном стержне магнитопровода  $M$ , по которому протекает основной магнитный поток  $\Phi_1$ .

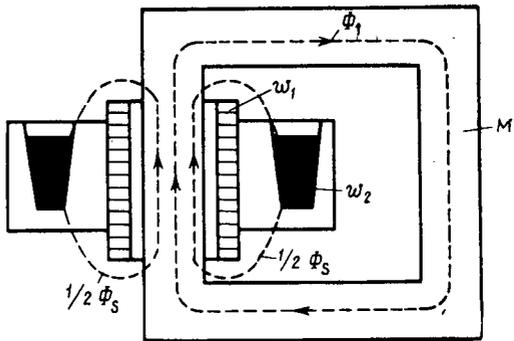


Рис. 4.2. Схема индукционной каналной печи

Индукционная каналная печь имеет следующие отличия от силовых трансформаторов:

1) вторичная обмотка совмещена с нагрузкой и имеет только один виток с относительно малой высотой по сравнению с высотой первичной обмотки;

2) из-за наличия большого потока рассеяния  $\Phi_s$ , вызванного необходимостью футеровки печи, она имеет низкий  $\cos \varphi$ .

Магнитный поток первичной обмотки  $\Phi_1$ , пересекая канал с металлом, наводит в нем электродвижущую силу  $E_2$ .

Возникающий в короткозамкнутом витке (канал с расплавленным металлом) ток  $I_2$ , проходя по металлу, выделяет теплоту согласно закону Джоуля — Ленца.

Поток рассеяния  $\Phi_s$  составляет приблизительно 25—30% от основного потока  $\Phi_1$ , поэтому  $E_2 < E_1 k_{тр}$  ( $k_{тр}$  — коэффициент трансформации:  $k_{тр} = w_1/w_2$ ; для каналных печей  $k_{тр} = w_1$ ).

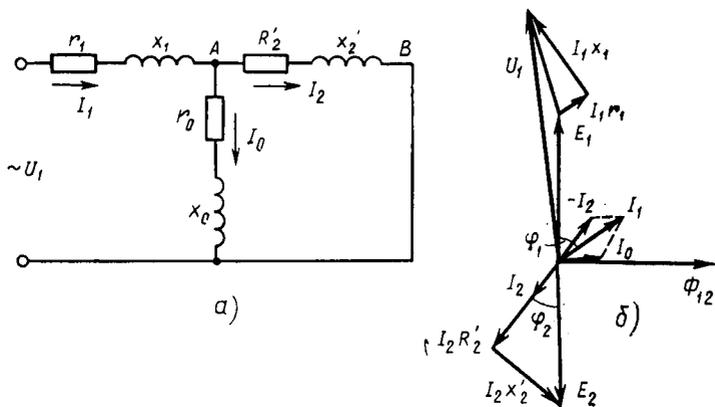


Рис. 4.3. Схема замещения и векторная диаграмма ИКП

Эквивалентная схема замещения и векторная диаграмма индукционной канальной печи показаны на рис. 4.3, а, б. Она соответствует схеме замещения трансформатора в режиме короткого замыкания.

В соответствии с векторной диаграммой

$$E_2 = \sqrt{(I_2 R_2')^2 + (I_2 x_2')^2} = I_2 z_2,$$

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 печи

$$\cos \varphi_{\text{п}} = R_2' / z_2' = R_2' / \sqrt{R_2'^2 + x_2'^2}.$$

Из формулы следует, что  $\cos \varphi_{\text{п}}$  уменьшается с увеличением потока рассеяния и уменьшением активного сопротивления металла. Вследствие большого зазора между индуктором и каналом печи, что вызвано необходимостью футеровки, реактивная мощность печи в несколько раз превосходит ее активную мощность, а естественный  $\cos \varphi_{\text{п}} = 0,3 \div 0,7$ . Меньшие значения коэффициента мощности соответствуют канальным печам для плавки металлов с низким удельным электрическим сопротивлением (медь, алюминий), а большие значения — с высоким (сталь, чугун).

В канальных печах однородный химический состав и одинаковая температура жидкого металла обеспечиваются интенсивным перемешиванием металла, вызываемым взаимодействием магнитного поля индуктора с током в канале, что приводит к возникновению магнитогидродинамических явлений в печах.

Проанализируем взаимодействие тока канала с магнитным полем на двух участках канала  $K$  (рис. 4.4, а):  $I$  — участок постоянного поперечного сечения канала  $S_{\text{к}}$ , коаксиальный индуктору  $И$ , и  $II$  — участок с непостоянным по длине и неаксиальным по отношению к индуктору поперечным сечением. Допускаем равномерное распределение тока по сечению канала.

На участке  $I$  (рис. 4.4, б) вследствие круговой симметрии системы вектор плотности тока имеет только одну аксиальную компо-

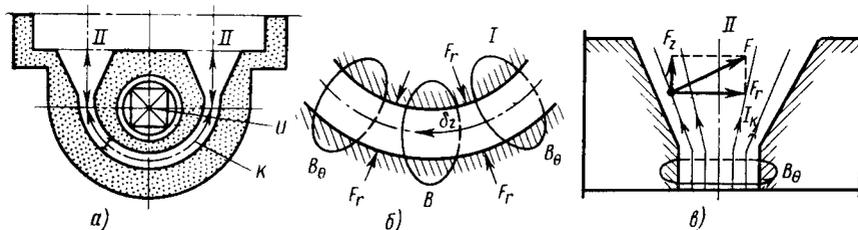


Рис. 4.4. Схема взаимодействия тока канала с магнитным полем

ненту  $\delta_z$  (ось  $z$  расположена вдоль оси канала по всей его длине), а магнитная индукция — одну тангенциальную компоненту  $B_\theta$ . Электромагнитная сила в этом случае также имеет лишь радиальную компоненту  $F_r$ , направленную от поверхности к оси канала. Эта сила вызывает сжатие металла (явление пинч-эффекта). На всей длине участка  $I$  значения этих сил постоянны, поэтому они не могут вызвать движение металла в канале, а оказывают лишь статическое воздействие на металл, сжимая его по радиусу канала. Для исключения пережата расплава необходимо, чтобы силы гидростатического давления металла в соответствующей точке канала и силы атмосферного давления на поверхности ванны металла были больше силы электромагнитного сжатия.

На участке  $II$  (рис. 4.4, *в*) индукция также имеет одну составляющую  $B_\theta$ , но вектор плотности тока имеет две компоненты — осевую  $\delta_z$  и радиальную  $\delta_r$ . Взаимодействие  $B_\theta$  и  $\delta_r$  создает силу сжатия, в то время как взаимодействие  $B_\theta$  и  $\delta_z$  создает аксиальную компоненту электромагнитной силы  $F_z$ , действующей на расплав вдоль оси и заставляющей его перемещаться в направлении силы  $F_z$  (вдоль канала).

Таким образом, изменение формы и размеров канала вдоль его оси позволяет обеспечить сквозное течение металла в канале вследствие возникающей при этом аксиальной составляющей электромагнитной силы. Это дает возможность исключить перегрев металла в канале и повысить мощность индукционной единицы.

Наиболее важным достоинством индукционных канальных печей является их высокий энергетический КПД, достигающий в зависимости от рода переплавляемого металла значений 60—95 %.

Следует также отметить малый угар металла в индукционных канальных печах, поскольку здесь нет большого перегрева металла и его сильного окисления на поверхности ванны печи.

Выбор типа канальной печи определяется рядом их особенностей, из которых выделим основные:

- 1) необходимость непрерывного режима работы;
- 2) необходимость оставления несливной части металла — «болота» (обычно 25—30 % от полной емкости печи);
- 3) сложность перехода к плавке других металлов.

В конструктивном отношении современные типы ИКП, как правило, выполнены с закрытым каналом. Их характерная особенность — наличие двух зон — зоны выделения энергии («индукционная единица») и плавильной зоны (ванны печи). Индукционной единицей в ИКП является трансформатор, вторичной обмоткой которого служит металл в канале печи. По конструкции индукционные единицы бывают *одинарные* и *сдвоенные* (рис. 4.5), с одним или двумя каналами на один индуктор. Канал изготавливается с помощью специальных шаблонов. Футеровку канала выполняют из набивных масс различного состава в зависимости от выплавляемого металла или сплава.

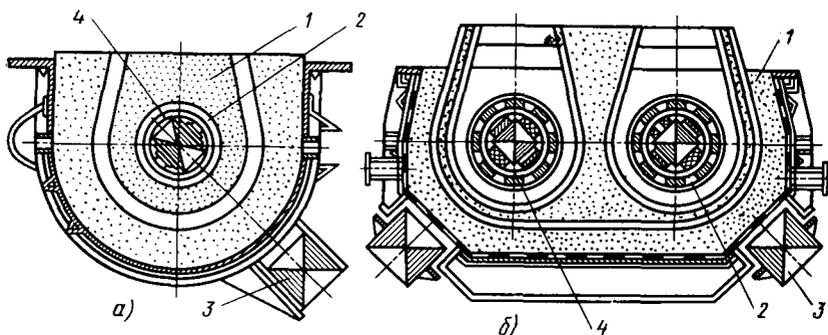


Рис. 4.5. Конструкции индукционных единиц канальных печей:  
 а — одинарная; б — двоянная; 1 — футеровка; 2 — водоохлаждаемый кожух;  
 3 — магнитопровод; 4 — индуктор

Футеровка индукционных единиц имеет меньший срок службы по сравнению с футеровкой ванны, поскольку испытывает большую термическую нагрузку. Поэтому в современных ИКП используются съемные индукционные единицы, что позволяет произвести ее замену без перефутеровки ванны, а порой и без вывода печи из эксплуатации. Каналы выполняют в виде колодца, прямоугольных участков и полукольца или только из прямоугольных участков (для облегчения чистки каналов при их «зарастании»). Сечения каналов бывают круглой, прямоугольной или овальной формы.

Магнитопровод изготавливается из листов трансформаторной стали и делается разборным для удобства установки и демонтажа катушки-индуктора.

Параметры и конструкции ИКП зависят от рода переплавляемых металлов и их назначения. Получили распространение три основные конструктивные разновидности канальных печей: шахтная, барабанная и двухкамерная (рис. 4.6).

В ИКП *шахтного* типа плавильная камера имеет форму вертикального цилиндра, в донной части которого присоединена плавильная единица (рис. 4.6, а). При разливке металла печь наклоняют с помощью гидравлического устройства. Достоинством конструкции печей такого типа является простота выполнения, ремонта и замены футеровки ванны печи.

В ИКП *барабанного* типа плавильная камера выполнена в виде горизонтально расположенного цилиндра. Она установлена на цапфах или катках с различными приводами механизма наклона. Печь имеет несколько индукционных единиц, которые установлены в нижней части печи (рис. 4.6, б).

*Двухкамерные* канальные печи выполнены с наклонными или горизонтально расположенными каналами, соединяющими между собой две ванны. При этом одна из них используется как плавильная, а другая как раздаточная.

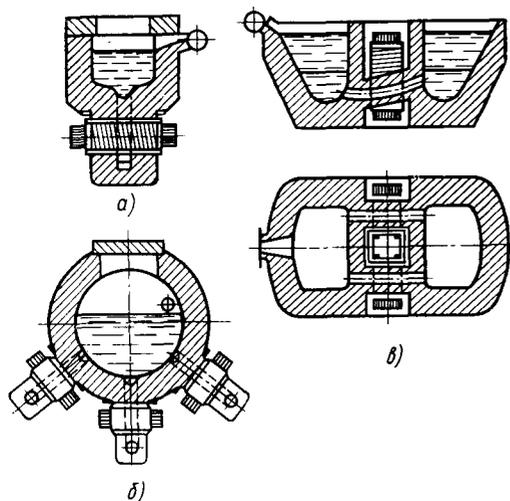


Рис. 4.6. Основные типы конструкций ИКП:  
 а — шахтная; б — барабанная; в — двухкамерная

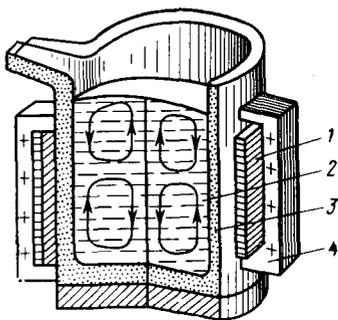


Рис. 4.7. Схема индукционной тигельной печи

В промышленности находят применение также *электромиксеры* и *копильники* жидкого металла — устройства для подогрева и выравнивания его температуры перед разливкой, когда объем отливаемой детали больше емкости плавильной печи. Электромиксеры могут быть использованы для литья в кристаллизатор машин непрерывного действия, требующих регулирования скорости литья. Миксеры всегда работают в комплексе с плавильными печами.

В ИКП тепловая энергия выделяется в жидком металле в канале и передается в ванну печи в результате теплопроводности и конвекции. Конвекция обусловлена как разностью температур металла, так и действием электромагнитных сил, возникающих в металле канала. Из-за недостаточной циркуляции металла его температура в канале может на 100—200 К превосходить температуру в ванне. Это обстоятельство в основном определяет удельную мощность ИКП, их производительность, а также срок службы футеровки канала.

Так, для плавки меди и ее сплавов печи имеют максимальную емкость до 16 т, максимальную удельную мощность 30 кВт/т, производительность до 10 т/ч при плавке меди и 13—15 т/ч при плавке латуни. В зависимости от емкости печи удельный расход электроэнергии при плавке меди в них составляет 270—330 кВт·ч/т, а при плавке сплавов на медной основе 190—210 кВт·ч/т. Для плавки цинка применяются ИКП емкостью до 100 т и производительностью 30 т/ч, удельный расход электроэнергии при этом составляет 95—110 кВт·ч/т. Алюминий и его сплавы переплавляются в ИКП емкостью от 170 кг до 40 т, производительностью от 75—100 кг/ч до 10 т/ч при удельном расходе электроэнергии 360—500 кВт·ч/т.

При разливе чугуна применяют ИКП-миксеры емкостью до 250 т, мощностью 4400 кВт. Удельная мощность при плавке твердой шихты составляет 30—100 кВт/т, а в дуплекс-процессе при жидкой загрузке 20—50 кВт/ч. Максимальная производительность находящихся в эксплуатации в чугунолитейном производстве ИКП составляет 10 т/ч, емкость 100 т.

Для плавки катодного цинка применяются ИКП емкостью до 100 т с шестью индукционными единицами общей мощностью 3000 кВт, производительностью 30 т/ч и удельным расходом электроэнергии 100 кВт·ч/т.

**Индукционные тигельные печи.** Характерным электротехническим признаком индукционных тигельных печей 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 (ИТП) (рис. 4.7) состоит из следующих основных частей: индуктора 1, подключаемого к источнику переменного тока, расплавляемого металла 2, находящегося внутри огнеупорного тигля 3, и внешнего магнитопровода 4, применяемого в печах большой емкости для экранирования и уменьшения потерь энергии, а также токопроводов и устройства для наклона печи при сливе металла.

Нагрев и расплавление металлической загрузки происходят за счет прохождения в ней индуцированного электромагнитным полем электрического тока и выделения при этом в загрузке теплоты по закону Джоуля—Ленца.

Плавка металла в ИТП характеризуется распределением выделения энергии по большей части периферии садки и интенсивным ее перемешиванием. Характерной особенностью ИТП в отличие от ИКП является возможность опорожнения печи при переходе на другую марку сплава или при длительном простое печи.

Кроме того, можно отметить следующие положительные свойства индукционных тигельных печей:

а) возможность получения чистых по химическому составу металлов и сплавов, поскольку отсутствует соприкосновение с топливом или электродами;

б) возможность проведения плавки в нейтральной среде или вакууме для получения металлов высокого качества;

в) отсутствие перегрева футеровки, что повышает срок службы печи.

В индукционных тигельных печах имеет место движение расплава в тигле, что определяется взаимодействием электромагнитного поля индуктора и наведенного в металле электрического тока. Это приводит к возникновению в расплаве двухконтурной циркуляции, когда расплав движется вдоль оси вверх (в верхнем контуре) и вниз (в нижнем контуре) по отношению к средней плоскости индуктора. Такая циркуляция в ИТП называется *естественной*. Скорость металла при этом пропорциональна напряженности магнитного поля, а также зависит от частоты тока индуктора,

удельной мощности печи, геометрических соотношений тигля и расплава.

Практически вся поглощаемая энергия выделяется в слое металла толщиной  $\Delta_{э.гор}$  — глубина проникновения тока в горячий металл. По мере нагрева садки меняются магнитная проницаемость и удельное электрическое сопротивление металла, поэтому частота тока индуктора определяется из условий оптимального режима плавки, соответствующего максимальной скорости расплавления.

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

$$f \approx 25 \cdot 10^6 \rho_{гор} / d^2_0.$$

Эта формула справедлива при условии

$$r_0 \sqrt{2} / \Delta_{э.гор} \geq 7,$$

где  $r_0 = d_0 / 2$  и  $\Delta_{э.гор} = 503 \sqrt{\rho_{гор} \mu f}$ , м ( $d_0$  — диаметр тигля, м);  $\rho_{гор}$  — удельное электрическое сопротивление горячего металла, Ом·м.

Из формулы следует, что частота источника питания печи зависит от геометрических размеров (диаметра  $d_0$ ). В ИТП большой емкости (больших диаметров) применяются источники питания промышленной частоты, в печах средней и малой емкости — повышенной и высокой частот.

Коэффициент полезного действия печи  $\eta_n$  определяется зазором между индуктором и садкой. При уменьшении толщины стенки тигля электрический КПД  $\eta_э$  увеличивается, а тепловой — уменьшается, поскольку при этом возрастают тепловые потери. Индукционные тигельные печи имеют  $\eta_э = 0,6 \div 0,8$  [большее значение относится к печам большой емкости для плавки металлов с высоким удельным электрическим сопротивлением (сталь, чугун), а меньшее — к печам для переплавки цветных металлов (медь, алюминий)]. Тепловой КПД определяется видом футеровки и температурой расплава и составляет  $\eta_{теп} = 0,8 \div 0,85$ . Общий КПД тигельной печи  $\eta_n = \eta_э \eta_{теп} = 0,48 \div 0,68$ .

Индукционные тигельные печи имеют естественный коэффициент мощности  $\cos \varphi_n = 0,8 \div 0,3$  и требуют установки батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности.

Тигельные электропечи могут работать с «болотом» и без «болота». «Болото» по объему обычно составляет 25—30 % емкости тигля. При этом в тигель можно загружать шихту любых габаритных размеров: отходы литейного производства, чушки, мелкую стружку и т. д.

Конструкция современных тигельных электропечей средней емкости предусматривает возможность изготовления отдельного выемного узла, состоящего из индуктора и тигля, что сокращает время при их замене. Плавильные тигельные печи вне зависимости от

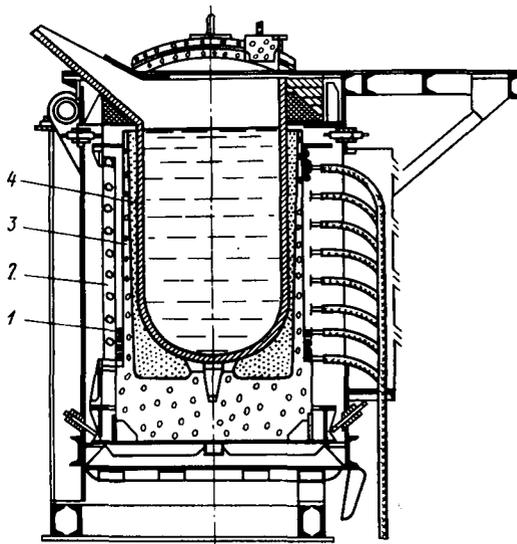


Рис. 4.8. Индукционная тигельная печь со стальным тиглем для плавки магния:  
1 — индуктор; 2 — магнитопровод; 3 — набивная футеровка; 4 — стальной тигель

частоты питающего тока, начиная от 50 Гц до 400 кГц при емкости тигля от десятков тонн до нескольких килограммов расплавленного металла, имеют одни и те же конструктивные элементы.

*Неэлектропроводные тигли* из кварцитовых, магнезитовых, циркониевых масс, изготавливаемые непосредственно во внутреннем объеме индуктора, не поглощают энергии электромагнитного поля и одновременно являются теплоизоляторами между расплавляемым металлом и охлаждаемыми стенками индуктора.

*Электропроводящие тигли* из жароупорных сталей, легированных чугунов и графитов, поглощая наибольшую часть энергии переменного электромагнитного поля, являются как бы нагревателями косвенного действия (рис. 4.8). При загрузке этих тиглей раздробленной шихтой с малым коэффициентом заполнения до ее расплавления энергия от стенок тигля передается в основном излучением, а после расплавления — контактным способом благодаря теплопроводности. В электропроводящих тиглях наружные стенки изолированы от внутренних стенок индуктора.

*Индукторы* из медной водоохлаждаемой трубки круглого, квадратного или прямоугольного сечения изготавливают однослойными, состоящими из нескольких катушек, имеющих отдельное водяное охлаждение. Толщина стенок медной трубки не должна быть менее  $1,3\Delta_{эи}$  ( $\Delta_{эи}$  — глубина проникновения тока в медь при рабочей частоте).

Для защиты каркаса печи от нагрева магнитным полем в конструкциях тигельных печей предусматриваются *магнитопроводы*. Крупные печи оснащены специальными устройствами для измерения массы печи совместно с массой расплавляемого материала (*прессдукторы*), что позволяет регулировать ход подачи шихты и слива расплава, повышает точность поддержания режима и значительно упрощает работу по обслуживанию печи.

Удельные мощности ИТП лимитированы интенсивностью реакций на границах расплава с футеровкой и атмосферой печи. Удельный расход электроэнергии на тонну переплавляемого металла в индукционной печи складывается из трех компонент — энергии для нагрева и расплавления металла, тепловых и электрических потерь.

В плавильных индукционных печах тепловые и электрические потери составляют 15—20 и 30—35 % соответственно. В печах для выдержки расплавленного металла (миксерах) расход энергии обусловлен лишь тепловыми и электрическими потерями. Их активная мощность гораздо меньше, чем у плавильной печи, а средняя за цикл температура больше, что увеличивает долю тепловых потерь в удельном расходе электроэнергии.

Индукционные тигельные печи 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.

При индукционной гарнисажной плавке металла с введением энергии через боковой гарнисаж предусматривается создание внутри цилиндрического индуктора или охватываемого им тигля слоя гарнисажа из порошка переплавляемого металла.

Наружные слои порошка, соприкасающиеся с относительно холодным индуктором или тиглем, охлаждаются в процессе плавки, не спекаются, остаются мало электро- и теплопроводными и выполняют функцию футеровки.

*Индукционная струйная плавка* заключается в том, что переплавляемый материал в виде чешуек, губки, гранул или порошка прессуется в заготовки-стержни, которые затем перемещаются с определенной скоростью через индуктор.

Нагрев и расплавление заготовки осуществляются за счет протекания индуцированного (кольцевого) тока по боковой поверхности заготовки на глубине проникновения.

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. При достаточных усилиях, являющихся результатом взаимодействия индуцированных в металле токов с электромагнитным полем индуктора,

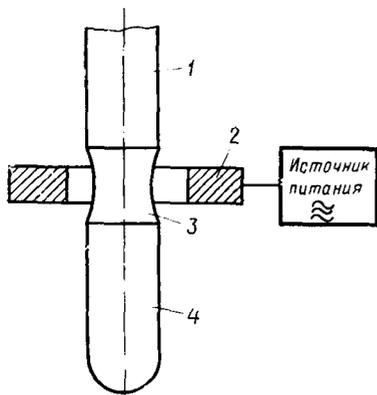


Рис. 4.9. Схема зонной плавки: 1 — поликристалл; 2 — индуктор; 3 — расплавленная зона; 4 — монокристалл

возникает состояние парения металла в магнитном поле. Металл стремится расположиться в зоне с минимальной напряженностью магнитного поля (потенциальной яме).

При достаточной подводимой к индуктору мощности металл расплавляется в переменном электромагнитном поле и висит в потенциальной яме без каких-либо поддерживающих конструкций.

Высококачественные монокристаллы выращивают и с помощью *бестигельной зонной плавки* с индуктивным способом передачи энергии в расплав (рис. 4.9). Для зонной плавки характерно медленное перемещение узкой расплавленной

зоны через сравнительно длинный твердый образец, в результате чего достигается перераспределение примесей и изменение кристаллической структуры исходного материала. Из-за излучения с поверхности, а также вследствие небольшой теплопроводности переплавляемых материалов (кремний, германий и др.) и сильной зависимости их удельного сопротивления от температуры зона максимальной температуры, образующаяся под поверхностью кристалла, имеет форму кольца.

Большие возможности при выращивании высокотемпературных кристаллических веществ открывает *индукционная плавка в металлических водоохлаждаемых тиглях*.

### § 4.3. Индукционные нагревательные установки

Индукционные нагревательные установки широко применяются в различных технологических процессах в машиностроительной и других отраслях промышленности. Их подразделяют на два основных типа: установки *сквозного* и *поверхностного* нагрева.

Индукционные установки сквозного нагрева применяются для нагрева заготовок под последующую пластическую деформацию: ковку, штамповку, прессовку, прокатку и т. д.

По сравнению с другими видами нагрева (в пламенных печах и печах резисторного нагрева) индукционный нагрев имеет малый угар металла и меньший брак из-за попадания окалины в обрабатываемое изделие.

В зависимости от геометрических параметров нагреваемых деталей и их материала источники питания индукционных установок выполняют на частоту 50—10 000 Гц. Для установок сквозного на-

грева выбор рабочей частоты производят таким образом, чтобы выделение теплоты происходило в слое достаточной толщины по сечению детали при отсутствии большого градиента температуры между поверхностью и слоем определенной толщины. При этом будет меньше перегрев поверхности заготовки и выше КПД установки.

Нагрев считают глубинным, если соблюдается условие  $r_0\sqrt{2}/\Delta_{э,гор} = 3 \div 5$ , где  $r_0$  — радиус нагреваемой заготовки;  $\Delta_{э,гор}$  — глубина проникновения тока в металл горячей заготовки. Необходимая частота для сквозного нагрева цилиндрических стальных заготовок ориентировочно может быть определена по соотношению

$$f = 3 \cdot 10^4 / d_0^2,$$

где  $d_0$  — диаметр нагреваемой заготовки, см.

По режиму работу установки сквозного нагрева подразделяют на установки периодического и непрерывного действия. В установках *периодического действия* нагревается только одна заготовка или ее часть. При нагреве заготовок из магнитного материала происходит изменение потребляемой мощности: вначале она возрастает, а затем по достижении точки Кюри снижается до 60—70 % от начальной. При нагреве заготовок из цветных металлов мощность в конце нагрева несколько увеличивается за счет роста удельного электрического сопротивления.

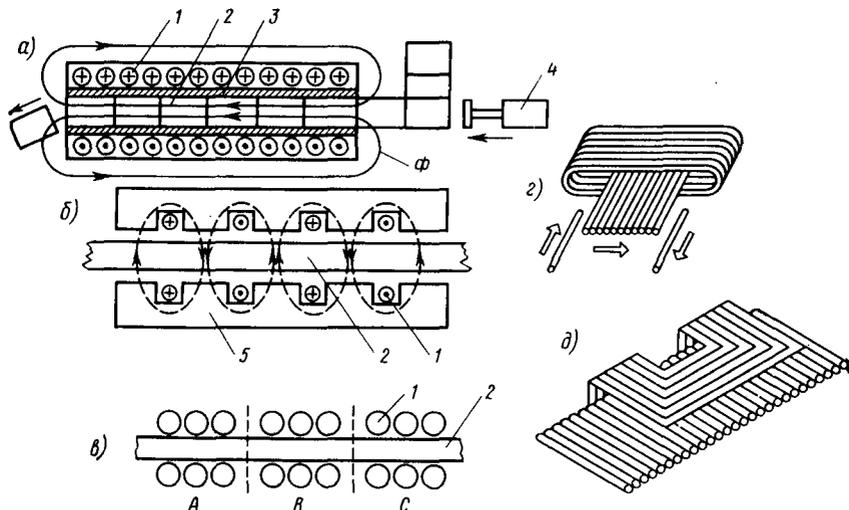


Рис. 4.10. Схемы индукционных нагревательных установок непрерывного действия:

а, в, г — в продольном; б, д — в поперечном магнитном поле; 1 — индуктор; 2 — нагреваемое изделие; 3 — теплоизоляция; 4 — механизм перемещения заготовки; 5 — магнитопровод

В установках *непрерывного действия* одновременно находится несколько заготовок, расположенных в продольном или поперечном магнитном поле (рис. 4.10). В процессе нагрева они перемещаются по длине индуктора, нагреваясь до заданной температуры. В нагревателях непрерывного действия полнее используется мощность источника питания, поскольку средняя мощность, потребляемая ими от источника питания, выше, чем средняя мощность, потребляемая нагревателем периодического действия.

Индукционные нагреватели непрерывного действия имеют более высокий КПД источника питания и производительность их выше, чем установок периодического действия. Применяется питание нескольких нагревателей от одного источника, а также подключение нескольких генераторов к одному нагревателю, состоящему из нескольких секций (рис. 4.10, в, секции А, В, С).

Конструкция индуктора для сквозного нагрева зависит от формы и размеров деталей. Индукторы выполняют круглого, овального, квадратного или прямоугольного сечения. Для нагрева концов заготовок индукторы выполняют щелевыми или петлевыми (рис. 4.10, г, д).

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 изделия. Рост плотности тока от центра к поверхности проводника происходит по экспоненциальному закону:  $\delta_x = \delta_0 e^{-x/\Delta}$ , где  $\delta_x$  — среднеквадратичное значение плотности тока на расстоянии  $x$  от поверхности проводника;  $\delta_0$  — среднеквадратичное значение плотности тока на поверхности проводника;  $\Delta$  — глубина проникновения — расстояние от поверхности проводника по направлению к его центру, на котором плотность тока убывает в  $e$  раз по сравнению с плотностью тока на его поверхности.

Из этого следует, что при использовании высокой частоты в поверхностных слоях можно получить большие плотности тока, обеспечивающие быстрый нагрев металла.

Индукционные установки *поверхностного нагрева* применяются для нагрева деталей под последующую термохимическую обработку (закалка, цементация, азотирование и т. п.).

Индукционная закалка заключается в быстром нагреве поверхности изделия с последующим быстрым охлаждением на воздухе, в воде или масле. При этом поверхность приобретает высокую твердость и способность хорошо работать на трение, а «сырая» (мягкая) сердцевина обеспечивает высокую сопротивляемость ударным нагрузкам. При таком нагреве удается во много раз уменьшить объем нагреваемого металла (по сравнению со сквозным нагревом) и значительно сократить расход электроэнергии.

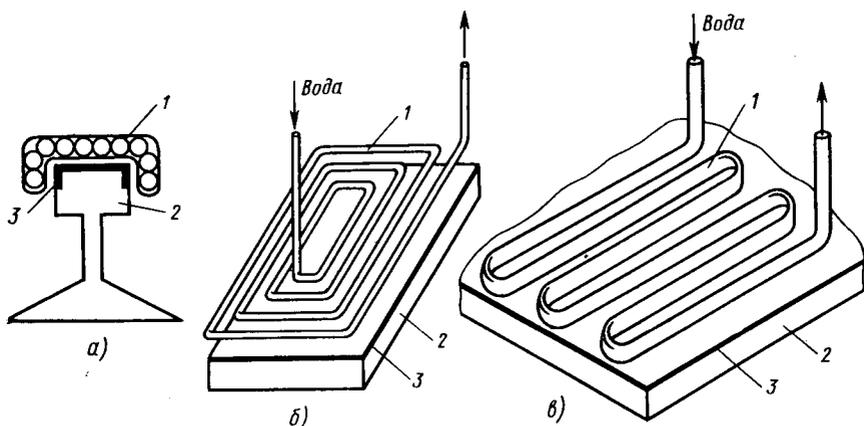


Рис. 4.11. Технологические схемы поверхностного индукционного нагрева:  
 1 — индуктор; 2 — нагреваемое изделие; 3 — нагретый слой изделия

Необходимость поддержания высокого электрического и теплового КПД системы индуктор—нагреваемое тело определяет исключительно большое количество форм и размеров индукторов. Схемы некоторых индукторов для поверхностного нагрева показаны на рис. 4.11, а—в.

Индукторы характеризуются удельной поверхностной мощностью (Вт/м<sup>2</sup>), которая зависит от частоты тока, глубины прогрева, размеров нагреваемых изделий и изменяется в очень широких пределах.

Выбор основных геометрических соотношений индуктора, т. е. его внутреннего диаметра и длины, а также размеров его теплоизоляции производят следующим образом (рис. 4.12). Внутренний диаметр огнеупорного цилиндра определяют из соотношений

$$d_3 = (1,1 - 1,2) d_2; \quad d_3 - d_2 > 5 \text{ см.}$$

Между индуктором и огнеупорным цилиндром проложен слой теплоизолирующего материала (2—5 мм), что снижает тепловые потери и защищает электрическую изоляцию индуктора.

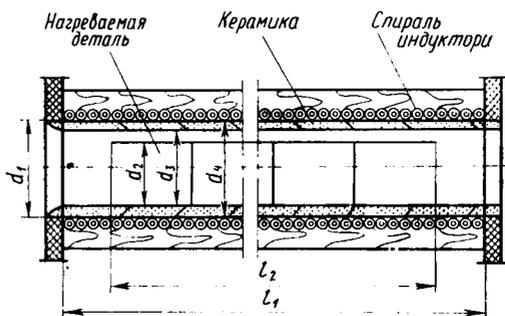


Рис. 4.12. Схема индукционного нагревателя:  
 $d_1$  — внутренний диаметр индуктора;  $d_2$  — диаметр детали;  $d_3$  — внутренний диаметр огнеупорного цилиндра;  $d_4$  — внутренний диаметр теплоизолирующего цилиндра;  $l_1$  — длина индуктора;  $l_2$  — общая длина садки

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

$$P_c = P_{\text{пол}}/\eta_c = P_{\text{пол}}/(\eta_{\text{и}}\eta_{\text{кб}}\eta_{\text{л}}\eta_{\text{ип}}),$$

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

$$P_{\text{пол}} = C_p(t_k - t_0)gn/\tau,$$

где  $C_p$  — средняя интегральная удельная теплоемкость в интервале температур  $t_0 - t_k$ , 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  $l_2$ . При несоблюдении этого условия концы заготовок могут оказаться недогретыми, поскольку на концах индуктора магнитное поле сильно искажено, а также вследствие тепловых потерь в концевых зонах нагреваемых заготовок, где экранирующее действие футеровки меньше.

Оптимальный диаметр индуктора  $d_1$  обусловлен поддержанием максимального КПД, а также конструктивными соображениями, учитывающими, что внутри индуктора должны быть расположены тепловая и электрическая изоляции, а в большинстве случаев и специальные направляющие.

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

$$f_{\text{опт}} = \rho / (\pi \mu \Delta_{\text{э}}^2),$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление нагреваемого материала, Ом·м.

Для поверхностного нагрева сталей под закалку ( $\mu = 1$ )

$$f_{\text{опт}} = 4\Delta_{\text{э}}^2.$$

Выбор оптимальной частоты для нагрева металла осуществляют по максимальному значению общего КПД, соответствующему минимальному удельному расходу энергии.

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

$$\eta_{\text{э}} = 1 / [1 + (d_1/d_2) \sqrt{\rho_1 / (\rho_2 \mu_2)}]$$

Чем больше  $\rho$  нагреваемого изделия, тем выше  $\eta_{\text{э}}$ . Так, при нагреве стали предельный  $\eta_{\text{э}} = 0,7 \div 0,8$ , а при нагреве цветных металлов могут быть случаи, когда он только несколько выше 0,5.

Тепловой КПД индуктора при неизменной удельной мощности падает с повышением частоты и с увеличением диаметра нагреваемой заготовки, так как относительная глубина проникновения тока в металл уменьшается и для нагрева изделия требуется большее время, что приводит к увеличению тепловых потерь.

При нагреве металлов, имеющих низкую теплопроводность (например, титана и его сплавов), длительность нагрева увеличивается, а доля тепловых потерь становится больше и тепловой КПД снижается.

При высокотемпературном нагреве тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена, ниобия и др.) до 2100—2300 К тепловые потери увеличиваются во много раз, а тепловой КПД может снизиться до 0,5—0,3.

**Коэффициент мощности системы индуктор—садка и реактивная мощность конденсаторной батареи.** Индукционные установки имеют, как правило, низкий естественный коэффициент мощности, причем значения его изменяются в довольно широких пределах в зависимости от частоты тока, зазора между индуктором и изделием, магнитной проницаемости, удельного сопротивления и размеров нагреваемых изделий.

Зависимость коэффициента мощности от частоты тока и диаметра нагреваемых изделий позволяет правильно выбрать реактивную мощность компенсирующей конденсаторной батареи, руководствуясь не только минимальным расходом электроэнергии, но и снижением стоимости установки и сокращением необходимых производственных площадей.

Коэффициент мощности системы индуктор—садка

$$\cos \varphi_{\text{и}} = 1 / \sqrt{1 + [(Q_{\text{с}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{з}}) / (P_{\text{с}} + P_{\text{и}})]^2}$$

где  $P_{\text{с}}$ ,  $Q_{\text{с}}$  — соответственно активная и реактивная мощности, потребляемые цилиндрической садкой;  $P_{\text{и}}$ ,  $Q_{\text{и}}$  — соответственно активная и реактивная мощности индуктора;  $Q_{\text{з}}$  — реактивная мощность, рассеиваемая в зазоре между индуктором и садкой.

Реактивная мощность конденсаторной батареи  $Q_{\text{кб}}$  для компенсации естественного  $\cos \varphi_{\text{и}}$  индукционного устройства

$$Q_{\text{кб}} = P_{\text{к}} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{и}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{к}}),$$

здесь  $P_{\text{к}}$  — его активная мощность;  $\varphi_{\text{к}}$  — сдвиг фаз между током и напряжением в скомпенсированном контуре.

Активные потери в конденсаторах

$$\Delta P_{\text{кб}} = Q_{\text{кб}} \operatorname{tg} \delta,$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь.

Коэффициент полезного действия конденсаторной батареи при компенсации реактивной мощности индукционного устройства

$$\eta_{\text{кб}} = \frac{P_{\text{к}}}{P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{кб}}} = \frac{1}{1 + \Delta P_{\text{кб}} / P_{\text{к}}}$$

Обычно  $\eta_{кб}$  достаточно высок, однако в отдельных случаях при высоких частотах и низком  $\cos \varphi_n$  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, который имеет преимущества перед другими способами нагрева. Это быстрота, равномерность и высокая производительность. С энергетической точки зрения такой нагрев является наиболее эффективным, поскольку при его осуществлении вся энергия вносится в массу нагреваемого материала.

По технологическим признакам установки высокочастотного диэлектрического нагрева подразделяют на три вида.

Установки первого вида используются 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 второго вида применяются для нагрева протяженных плоских изделий: сушка текстильного волокна, рисунков на тканях, бумаги, фотопленки, химических и фармацевтических препаратов, полимеризации клеев, нагрев каучука, пастеризация и т. д.

В установках третьего вида проводятся процессы, не требующие быстрого и однородного нагрева: размораживание продуктов, разогрев и быстрое приготовление блюд, обжиг простых керамических изделий, сушка грибов, чая и т. п.

Использование высококачественного нагрева позволяет повысить качество продукции, ускорить технологические процессы и получить при массовом производстве большую экономию, несмотря на высокую стоимость оборудования.

Частицы диэлектрика, помещенного в электрическое поле, испытывают механическое воздействие, смещающее положительно заряженные частицы в одну сторону, а отрицательно — в другую. В результате центры электрического действия положительных и отрицательных частиц не совпадают и во внешнем пространстве такая молекула воспринимается как диполь, т. е. как система двух равных, но противоположных зарядов  $+q$  и  $-q$ , смещенных друг относительно друга на расстояние  $l$  (рис. 4.13, а). Такой диэлектрик, имеющий ориентированные в одном направлении диполи, называют *поляризованным*. Произведение заряда частицы на

смещение  $l$  называют *электрическим моментом диполя*  $m = gl$  (Кл·м), который связан с напряженностью электрического поля  $E$  соотношением  $m = \alpha E$ , где  $\alpha$  — мера упругой деформации молекулы или атома — их поляризуемость.

Различают несколько видов поляризации.

*Электронная поляризация* атомов вызвана смещением электронного облака относительно ядра атома и приобретением последним индуцированного дипольного момента (рис. 4.13, а). Время собственных колебаний электронов составляет  $10^{-14}$ — $10^{-15}$  с, за это же время устанавливается электронная поляризация.

*Ионная поляризация* молекул вызвана упругим смещением ионов в твердых диэлектриках с ионной кристаллической решеткой (ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в поваренной соли).

Период собственных колебаний решетки составляет  $10^{-12}$ — $10^{-13}$  с. Время ионной упругой поляризации того же порядка.

*Ориентационная поляризация* имеет 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. 4.13, б). Это поляризация упругого смещения, возникающая в твердых или жидких диэлектриках, полярные молекулы которых связаны друг с другом так, что под действием электрического поля могут поворачиваться лишь на небольшой угол.

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. При расположении диэлектрика между обкладками конденсатора, на которые подано напряжение от высокочастотного генератора, цепь тока замкнется через этот генератор.

Поляризация сопровождается потерями энергии, вызванными трением между молекулами (потери трения) и перемещением диполей (дипольные потери). Потери энергии выражаются в нагреве диэлектрика или полупроводника, скорость которого определяется, в частности, частотой изменения поля. Потери при поляризации приводят к запаздыванию смещения молекул по отношению к

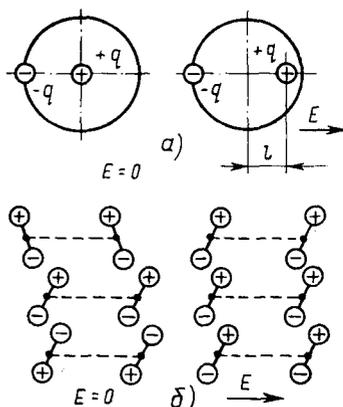


Рис. 4.13. Виды поляризации диэлектрика в электрическом поле:

а — поляризация атомов; б — ориентационная поляризация

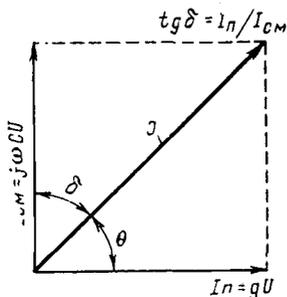


Рис. 4.14. Векторная диаграмма токов в диэлектрике в переменном электрическом поле

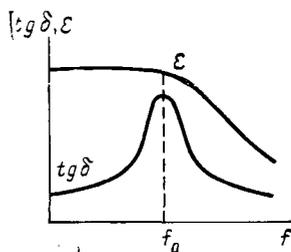


Рис. 4.15. Зависимость  $\epsilon$  и  $tg \delta$  от частоты изменения электрического поля

внешнему полю. С ростом частоты отставание увеличивается, пока не достигнет максимума. Дальнейшее повышение частоты из-за вязкости среды приводит к обратному результату — уменьшению поляризации, что ведет к резкому снижению диэлектрической проницаемости вещества. При отсутствии потерь ток опережает напряженность поля на угол  $90^\circ$ . Если поляризация сопряжена с потерями и несколько запаздывает, ток опережает напряженность на угол, меньший  $90^\circ$ . Разница  $\delta - \theta$  (рис. 4.14) характеризует потери в диэлектрике и называется *углом диэлектрических потерь*.

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

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

$$I = I_n + I_{cm} = (g + j\omega C)U.$$

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

Показатели  $\epsilon$  и  $tg \delta$  зависят от рода и физического состояния вещества (влажности, температуры), а также от частоты поля. Их зависимость от частоты поля показана на рис. 4.15. Величина  $tg \delta$  имеет максимум при так называемой *релаксационной частоте*  $f_0$ , характерной для каждого материала.

Выделяющуюся в диэлектрике мощность можно получить из векторной диаграммы

$$P = UI \cos \varphi \approx UI \operatorname{tg} \delta = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta,$$

где  $\omega = 2\pi f$  — угловая скорость, рад/с;  $C$  — емкость плоского конденсатора, Ф:  $C = \epsilon \epsilon_0 S/d$  ( $S$  — площадь пластин конденсатора, м<sup>2</sup>;  $d$  — расстояние между ними, м;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума). Имея в виду, что объем диэлектрика равен  $Sd$  и напряженность электрического поля  $E = U/d$  (В/м), мощность  $P_0$  (Вт/м<sup>3</sup>), выделяющаяся в единице объема диэлектрика,

$$P_0 = 5,56 \cdot 10^{-11} f E^2 \operatorname{tg} \delta. \quad (4.1)$$

Подводимая удельная мощность  $P_0$  расходуется на нагрев материала, испарение влаги или других летучих компонентов. При затратах теплоты только на нагрев удельная мощность, поступающая в материал, должна соответствовать

$$P_{\text{нагр}} = C_p \gamma (\Delta T / \Delta \tau) / \eta_t, \quad (4.2)$$

где  $C_p$  — удельная теплоемкость материала, Дж/(г·К);  $\gamma$  — плотность материала, г/см<sup>3</sup>;  $\Delta T / \Delta \tau$  — скорость нагрева материала, К/с;  $\eta_t$  — термический КПД процесса, учитывающий потери теплоты в окружающую среду.

При затратах теплоты только на испарение

$$P_{\text{исп}} = (L / \eta_t) \cdot (\Delta M / \Delta \tau), \quad (4.3)$$

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

Анализ уравнений (4.1)—(4.3) позволяет сделать вывод, что мощность, выделяющаяся в диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, определяется только его электрическими характеристиками  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  и параметрами поля: напряженностью и частотой.

Выделяющаяся мощность не зависит от теплопроводности материала, которая у диэлектриков, как правило, имеет низкие значения. Эта особенность является существенным преимуществом диэлектрического нагрева, позволяющим значительно ускорить процесс нагрева материала по сравнению с другими традиционными видами нагрева.

#### § 4.5. Установки диэлектрического нагрева

Установки диэлектрического нагрева подразделяют на два вида: собственно установки диэлектрического нагрева, работающие на высокой частоте (ВЧ-установки — частота 66 кГц — 100 мГц), и установки сверхвысокочастотного нагрева (СВЧ-нагрев — частота 1000 мГц и выше). Последние применяются при нагреве диэлектриков со сравнительно малым коэффициентом потерь, нагреве пищевых продуктов.

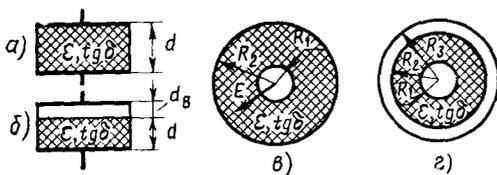


Рис. 4.16. Схемы рабочих конденсаторов установок диэлектрического нагрева

Выбор рабочих параметров установки определяется рядом физических свойств нагреваемого материала.

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:

$$\Delta = 9,55 \cdot 10^{11} \sqrt{\epsilon} \operatorname{tg} \delta.$$

Большинство материалов, нагреваемых в поле конденсаторов, неоднородно по своей структуре. Для материала слоистой структуры, в котором каждый слой отличается от другого значением относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ ) и толщиной ( $d_1$  и  $d_2$ ), при направлении поля вдоль слоев среднее значение

$$\epsilon_{\text{ср}} = (\epsilon_1 d_1 + \epsilon_2 d_2) / (d_1 + d_2). \quad (4.4)$$

При направлении поля поперек слоев

$$\epsilon_{\text{ср}} = \epsilon_1 \epsilon_2 (d_1 + d_2) / (\epsilon_1 d_1 + \epsilon_2 d_2). \quad (4.5)$$

При увеличении числа слоев в числителе и знаменателе уравнений (4.4) и (4.5) соответственно увеличивается число слагаемых.

Напряженность электрического поля в конденсаторе также не является постоянной. В простейшем случае, когда материал по своей структуре однороден и отсутствует зазор между ним и пластинами конденсатора, напряжение, приложенное к материалу  $U_m$ , равно напряжению, подводимому к рабочему конденсатору  $U_{\text{рк}}$  (рис. 4.16, а, в). Напряженность электрического поля в материале для плоского конденсатора (рис. 4.16, а)  $E_m = U_{\text{рк}}/d_m$ . Материал в этом случае нагревается равномерно, поскольку удельная мощность выделяется по всему его объему одинаково.

Если однородный материал помещен в конденсатор коаксиального типа (рис. 4.16, в), то также  $U_m = U_{\text{рк}}$ , а напряженность электрического поля в данной точке материала

$$E_m = U_{\text{рк}} / [R \ln (R_2/R_1)],$$

где  $R$  — расстояние от центра до данной точки.

Если материал занимает не весь объем конденсатора (рис. 4.16, б, г), то для плоского конденсатора

$$E_m = U / (d + \epsilon d_B); \quad E_B = \epsilon E_m,$$

для коаксиального конденсатора (рис. 4.16, з)

$$E_m = U/R \left( \ln \frac{R_2}{R_1} + \varepsilon \ln \frac{R_3}{R_2} \right); \quad E_b = \varepsilon E_m,$$

где  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость данного слоя или ее среднее значение для ряда слоев нагреваемого материала.

Допустимая напряженность поля в воздушном зазоре определяется значением пробивной напряженности  $E_{пр.в}$ . При ее достижении происходит электрический пробой. Напряженность пробоя воздуха ниже, чем  $E_{пр}$  большинства нагреваемых материалов. На практике при процессах сушки с выделением водяных паров или других летучих продуктов напряженность поля в воздушном зазоре не должна превышать 1,0—1,5 кВ/см, в других процессах нагрева она может достигать 5,0 кВ/см.

Допустимую напряженность поля в материале  $E_{м.доп}$  принимают в два раза меньшей пробивной напряженности этого материала:  $E_{м.доп} = E_{м.пр}/2$ .

Выбрав допустимое значение напряженности поля в материале  $E_m$ , по формулам (4.1)—(4.3) определяют рабочую частоту тока (Гц) при нагреве и сушке материала соответственно:

$$f_H = 7,53 \cdot 10^{12} \frac{\gamma C \Delta T}{\varepsilon \operatorname{tg} \delta \eta_l \tau E_m^2};$$

$$f_c = 7,53 \cdot 10^{12} \frac{L \Delta T}{\varepsilon \operatorname{tg} \delta \eta_l \tau E_m^2}.$$

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

Принципиальная схема высокочастотного генератора на триоде и его эквивалентная схема нагрузки показаны на рис. 4.17. Технологический узел — конденсатор с нагреваемым материалом — включен в колебательный контур.

Полное активное сопротивление контура  $R_K = R_H + R_1$ .

Если оно незначительно:

$$R_K \ll 2\sqrt{L_K/C_H},$$

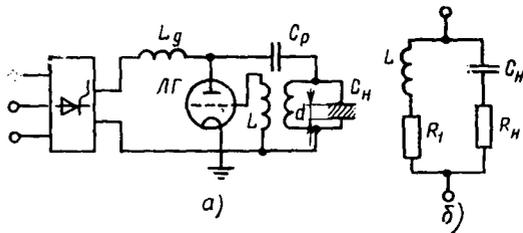


Рис. 4.17. Схема высокочастотного генератора для диэлектрического нагрева (а) и эквивалентная схема нагрузки (б):

$L_d$  — 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 нагрузки;  $R_1$  — активное сопротивление индуктивной катушки и соединительных проводов

то частоту генератора с достаточной точностью определяют по условию резонанса контура без потерь:

$$1/(\omega C_H) = \omega L_K \text{ или}$$

$$f = 1/(2\pi\sqrt{L_K C_H}).$$

Эквивалентное сопротивление контура с учетом потерь

$$R_0 = 1/(\omega C_H) \cdot \omega L_K / R_K = L_K / (C_H L_K),$$

где  $\omega L_K / R_K$  — отношение реактивного и активного сопротивлений, т. е. добротность контура. Эквивалентное сопротивление контура должно соответствовать паспортным данным генератора.

Выходная мощность генератора (Вт)

$$P_r = P_0 v_K / \eta_K,$$

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 диэлектрического нагрева показаны на рис. 4.18.

Схемы технологических узлов для нагрева и сушки крупнобаритных изделий и порошкообразных материалов показаны на рис. 4.18, а, б. При диэлектрическом нагреве температура внутри нагреваемого материала выше, чем в поверхностных слоях, с которых происходит удаление влаги. Совместное влияние градиентов давления, влагосодержания и температуры способствует вы-

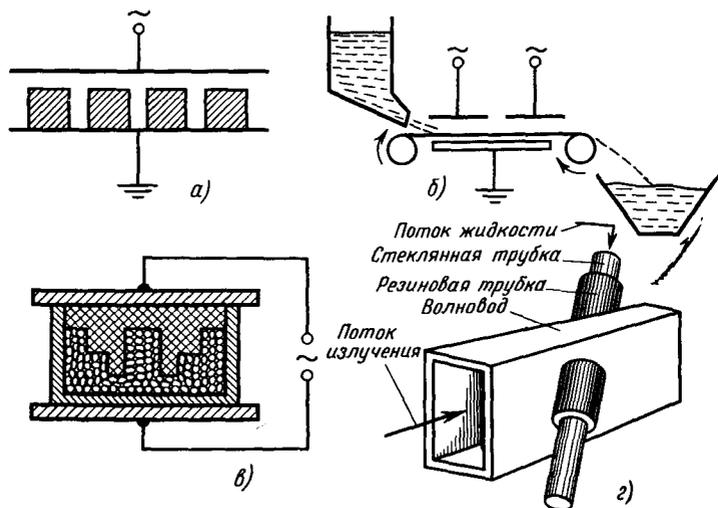


Рис. 4.18. Схемы технологических узлов установок диэлектрического нагрева

сокой производительности сушки с использованием высокочастотного нагрева.

На рис. 4.18, 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.

Существуют установки диэлектрического нагрева для термообработки пористых резин, предварительного нагрева таблетированных пресс-материалов, нагрева в процессе прессования, термообработки изделий и нагрева перед штамповкой, склеивания термоактивными клеями, обработки сельхозпродуктов и т. д.

Применяемые установки диэлектрического нагрева по рабочим частотам условно подразделяют на установки *средневолнового* ( $f=0,3\div 3,0$  МГц), *коротковолнового* ( $f=3\div 30$  МГц) и *метрового* ( $f=30\div 300$  МГц) диапазонов.

Первые из них применяются для нагрева материалов с большим фактором потерь  $\text{ctg}\delta$ , к которым относятся очень влажные изделия при их относительно небольших габаритных размерах. Генераторы этих установок имеют сравнительно высокий КПД (0,5—0,6) и выполнены мощностью до нескольких сотен киловатт. Нагрев производится на низких удельных мощностях ( $p_0=0,01\div 1,0$  Вт/см<sup>3</sup>) при длительности нагрева в десятки часов и высоком напряжении на рабочем конденсаторе (10—15 кВ).

Коротковолновые установки применяются для нагрева материалов со средним значением фактора потерь. КПД таких установок 0,4—0,55. Мощность генератора составляет несколько десятков киловатт, объем одновременно нагреваемого материала небольшой. Удельная мощность  $p_0=1\div 100$  Вт/см<sup>3</sup>. Сушка с испарением длится в течение нескольких часов, без испарения — доли часа. Установки удобны при работе с воздушным зазором и для осуществления методического нагрева.

Установки метрового диапазона имеют КПД, равный 0,3—0,4. Применяются для нагрева материалов с малым значением  $\text{ctg}\delta$ . Объем рабочей камеры невелик ( $p_0=0,1\div 3$  кВт/см<sup>3</sup>), время нагрева — секунды, могут работать с воздушным зазором.

Особенностью установок *сверхвысокой частоты* является соизмеримость геометрических размеров колебательных систем с длиной волны используемых колебаний. Колебательная система автогенератора объединена с генераторной лампой в один вакуумированный блок. Нагрев в электромагнитном поле осуществляется электромагнитным лучом в волноводе или резонаторе. При нагреве лучом нагреваемое тело находится под воздействием электромагнитного луча, излучаемого рупорной антенной, которой заканчивается волновод. Нагрев в волноводе осуществляется бегущей волной и применяется при термообработке листовых материалов, жгутов, лент, жидкостей (рис. 4.18, з). В объемных резонаторах нагреваются предметы произвольной формы.

В установках СВЧ-нагрева напряженность электрического поля меньше, чем в установках метрового диапазона, что снижает опасность электрического пробоя. В таких установках производится нагрев материалов с низким значением фактора потерь — продуктов, слоистых материалов, медицинских препаратов и т. д.

#### § 4.6. Источники питания установок индукционного и диэлектрического нагрева

Индукционная плавильная или нагревательная установка состоит из: источника питания; согласующего устройства (согласующий трансформатор; автотрансформатор); конденсаторной батареи для компенсации реактивной мощности установки; индуктора нагревательной или плавильной установки; сети, связывающей источник питания с индуктором; аппаратуры защиты, регулирования и автоматического управления; механизмов загрузки, выгрузки и перемещения нагреваемого материала.

По частоте потребляемого тока установки индукционного нагрева подразделяют на установки *промышленной, повышенной и высокой частоты*.

Установки канальных и большинство тигельных печей большой и средней мощности имеют промышленную частоту 50 Гц. Питаются они от сетей внутривозовского электроснабжения напряжением 220, 380 или 660 В непосредственно или через специальные трансформаторы или автотрансформаторы. Установки большой мощности питаются от сетей напряжением 6—10 кВ через высоковольтные печные подстанции.

Нормальная эксплуатация канальных индукционных печей специальной регулировки не требует, так как температура жидкого металла в их каналах изменяется незначительно, а следовательно, незначительно меняются и электрические параметры печи. Если в одной и той же печи расплавляются металлы или сплавы с отличающимися параметрами, то требуется регулировка напряжения на зажимах печи в широких пределах. В этих случаях печи подключаются к сети через специальные печные трансформаторы или автотрансформаторы с секционированными обмотками.

Как индивидуальное, так и групповое питание печей имеет свои преимущества и недостатки. К недостаткам группового питания следует отнести: отсутствие возможности индивидуальной подстройки режима каждой печи и при выходе из строя печного трансформатора, что случается очень редко, прекращение работы группы печей. Однако групповое питание обеспечивает более высокий КПД установки и простоту обслуживания.

Включение однофазных печей большой мощности в сеть трехфазного тока не всегда возможно вследствие возникающей при этом недопустимой асимметрии тока.

Подключение однофазных индукционных нагревательных установок промышленной частоты к трехфазной сети вызывает неравномерную загрузку фаз по току, что неблагоприятно сказывается на работе других электрических аппаратов, подключенных к этой питающей системе, так как несимметрия токов вызывает несимметрию напряжений.

На рис. 4.19 показаны схема подключения индукционной печи, схема включения однофазной нагрузки в трехфазную сеть с помощью симметрирующего устройства и векторная диаграмма токов и напряжений.

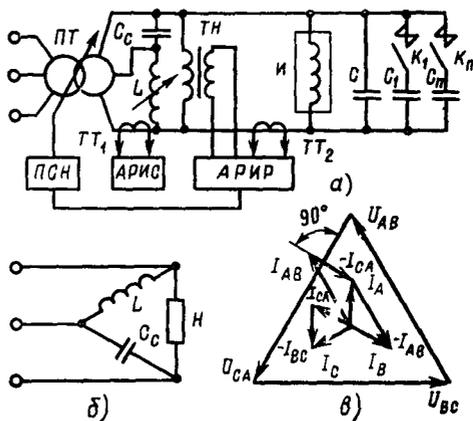


Рис. 4.19. Схема включения индукционной печи через симметрирующее устройство (а), схема включения однофазной нагрузки в трехфазную сеть (б) и векторная диаграмма токов и напряжений (в):

ПСН — переключатель ступеней напряжений;  $C_c$  — симметрирующая емкость;  $L$  — реактор симметрирующего устройства;  $C-C_n$  — компенсирующая конденсаторная батарея;  $И$  — индуктор печи; АРИС — регулятор симметрирующего устройства; АРИР — регулятор режима;  $K_1-K_n$  — контакторы управления конденсаторной батареи  $C_1-C_n$ ;  $ТТ_1$ ,  $ТТ_2$  — трансформаторы тока

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  $I_A = I_B = I_C = I_{CA}/\sqrt{3} = I_{BC}/\sqrt{3} = I_{AB}/\sqrt{3}$ .

При напряжении сети  $U_c$  и токе нагрузки  $I_{AB} = P/U_c$ , где  $P$  — активная мощность нагрузки,

$$X_L = X_C = U_c^2 \sqrt{3}/P. \quad (4.6)$$

Токи индуктивной и емкостной ветвей балансирующего устройства соответственно

$$I_{CA} = I_{BC} = U_c/X_L = U_c/X_C.$$

Следовательно, для включения однофазной нагрузки в трехфазную сеть достаточно по найденным из (4.6) значениям  $X_L$  и  $X_C$  подобрать соответствующий дроссель и конденсаторную батарею.

Если мощность индуктора меняется в широких пределах, то соответственно должны меняться и параметры балансирующего устройства. В этих случаях дроссель и конденсаторную батарею рассчитывают на максимальную мощность индуктора, при этом

предусматривают возможность их регулирования. Конденсаторную батарею балансирующего устройства делят на секции и подключают их с помощью контакторов.

**Источники питания повышенной частоты.** 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.

У машинных преобразователей частоты индукционного типа магнитная индукция  $B$  в какой-либо точке воздушного зазора между ротором и статором изменяется по значению, не изменяя своего направления. Пульсирующий магнитный поток в области зубцовой зоны статора создается с помощью вращающегося ротора, имеющего зубчатую поверхность.

В пазы статора укладывается рабочая обмотка переменного тока индукторного генератора. На статоре также располагается питаемая от отдельного источника постоянного тока обмотка возбуждения. С ее помощью создается магнитное поле, силовые линии которого направлены нормально по отношению к зазору. Число зубцов статора обычно в 2 раза больше числа зубцов ротора. При вращении ротора его зубцы создают местные пульсации магнитной индукции в зазоре. Их частота и частота тока в рабочей обмотке прямо пропорциональны числу зубцов ротора и частоте его вращения. В промышленности применяются машинные преобразователи с рабочей частотой 0,5—10 кГц.

Создание *статических умножителей частоты* стало возможным благодаря появлению трансформаторной стали с малыми потерями и кривой намагничивания, близкой к прямоугольной.

Принцип получения более высоких частот таким методом может быть объяснен следующим образом. Если катушка с железным сердечником питается синусоидальным напряжением, то с увеличением магнитного потока вследствие насыщения сердечника форма тока все больше искажается и появляются нечетные гармоники. При соединении трех таких катушек в трехфазную систему может быть получен ток утроенной частоты, так как основная волна погашается, а результирующая третьих гармоник в 3 раза больше, чем в каждой из фаз.

**Тиристорные преобразователи частоты.** В отличие от машинных генераторов тиристорный преобразователь частоты имеет ряд преимуществ: значительно меньшую массу на единицу мощности; лучшую работоспособность при частичных и полных нагрузках; возможность плавного изменения частоты в зависимости от режима плавки или нагрева.

Принципиальная схема силовой цепи тиристорного преобразователя частоты показана на рис. 4.20. Выпрямительный блок II представляет собой трехфазный мостовой управляемый выпрями-

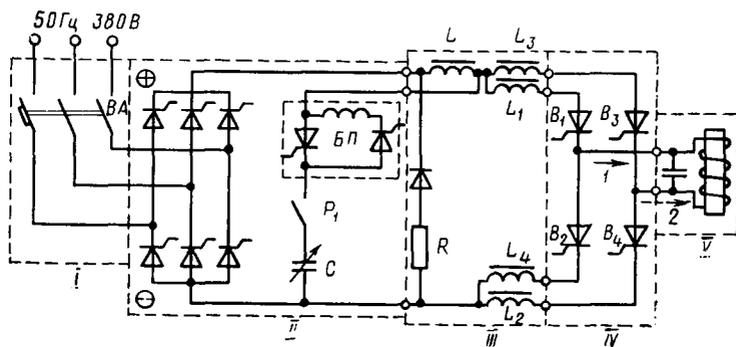


Рис. 4.20. Схема силовой цепи тиристорного преобразователя частоты:

*I* — шкаф ввода питания; *II* — выпрямитель; *III* — блок реакторов; *IV* — инвертор; *V* — нагрузка; *L* — сглаживающий реактор; *БП* — блок пуска; *BA* — выключатель автоматический; *C* — емкость; *R* — резистор; *P<sub>1</sub>* — контактор

тель, 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. В данном устройстве применен двухтактный инвертор, принцип действия которого 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 *B<sub>1</sub>—B<sub>2</sub>* ток через нагрузку протекает в направлении *1*, а при открывании вентилей *B<sub>3</sub>—B<sub>4</sub>* — в направлении *2*. Блок пуска *БП* обеспечивает запуск преобразователя.

Рассматриваемый источник питания является преобразователем с явно выраженным звеном постоянного тока, в котором одна группа вентилей работает в режиме выпрямления, а другая — в режиме инвертирования. Преобразователи, в которых одни и те же вентили участвуют и в инвертировании и в выпрямлении, называют преобразователями с неявно выраженным или открытым звеном постоянного тока.

Тиристорные преобразователи частоты выпускаются на частоты 0,5—10 кГц.

Для индукционного нагрева на высоких частотах (50—5000 кГц) служат *ламповые генераторы*. Питание генераторных ламп постоянным током повышает КПД установки. Питание током промышленной частоты осуществляется только в установках небольшой мощности. Генераторы мощностью выше 20кВт изготавливают в виде четырех отдельных блоков (рис. 4.21). Силовой трансформатор повышает напряжение внутриводской сети до 6000—9000 В, выпрямитель выполнен на тиратронах и преобразу-

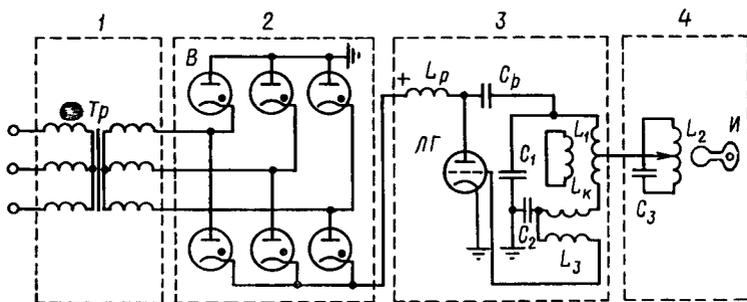


Рис. 4.21. Схема лампового генератора:

1 — блок питания; 2 — выпрямительный блок; 3 — блок генератора; 4 — нагрузочный блок;  $Tp$  — силовой трансформатор;  $B$  — вентили;  $L_p$  — разделительная индуктивность;  $C_p$  — разделительная емкость;  $C_{1,2,3}$  — емкости колебательного и нагрузочного контуров;  $L_k$  — короткозамкнутая катушка индуктивности;  $L_{1,2}$  — индуктивности контуров связи и нагрузочного;  $I$  — индуктор;  $ЛГ$  — генераторная лампа

ет переменный ток в постоянное напряжением до 9000—15 000 В. В зависимости от мощности преобразователя генераторный блок состоит из одной или нескольких трехэлектродных ламп. Он преобразует постоянный ток в ток высокой частоты. Нагрузочный блок включает в себя трансформатор с индуктором и конденсатором.

Высокочастотные ламповые генераторы бывают двух видов: с *независимым возбуждением* и с *самовозбуждением* (автогенераторы). Отличием автогенератора от генератора с независимым возбуждением является то, что в нем напряжение возбуждения на лампу подается не от постороннего источника ЭДС, а от собственной системы колебательных контуров через обратную связь. В индукционных установках обычно применяются генераторы с самовозбуждением. Поэтому в его состав входят элементы, обеспечивающие возбуждение генератора и управление его работой, а также элементы согласования нагрузки с параметрами лампового генератора.

В контур обратной сеточной связи входят конденсаторы, резисторы и катушки связи, подающие напряжение обратной связи на сетку генераторной лампы. К генератору относятся также катушки регулирования мощности в нагрузке, стабилизаторы напряжения накала и регулятор анодного напряжения, контрольно-измерительная, коммутационная аппаратура и измерительные приборы.

Для высокочастотного нагрева диэлектриков применяются ламповые генераторы на более высокие частоты (5,28—300 мГц). Они состоят в основном из тех же узлов, что и генераторы для индукционного нагрева проводящих материалов (рис. 4.17), но в отличие от последних нагрузкой в них является рабочий конденсатор, в котором находится нагреваемый материал. Так как в процессе

нагрева емкость  $C_n$  (рис. 4.17, б) и активное сопротивление  $R_n$  изменяются, то меняются эквивалентное сопротивление контура и режим работы генератора.

Для поддержания неизменным диапазона частот генератора в течение всего режима нагрева необходимо поддерживать неизменным эквивалентное сопротивление нагрузки, что достигается специальными регулированием — согласованием нагрузки.

Существуют различные схемы колебательной системы с обеспечением самовозбуждения, выбор которых определяется в основном необходимой частотой автоколебаний и требованиями к ее стабильности.

В одноконтурных схемах, используемых для генерирования колебаний с частотой до 1 мГц, применяется в основном трансформаторная или автотрансформаторная связь.

Многоконтурные схемы автогенераторов позволяют плавно и в широких пределах регулировать эквивалентное сопротивление контура без заметного снижения его КПД. Однако они имеют несколько резонансных частот, что может вызвать переход генератора с одной частоты на другую, поэтому необходимо осуществлять обратную связь от вторичного контура с индуктивной связью между контурами. Плавное регулирование сопротивления нагрузки осуществляется за счет перемещения короткозамкнутой индуктивной катушки (см. рис. 4.21).

Установки для диэлектрического нагрева выпускают с унифицированными узлами, предназначенными для совместной работы с различным оборудованием (прессовым и т. п.).

Установки для нагрева материалов, свойства которых мало изменяются в процессе термообработки, или для работы в конвейерных линиях выпускают без технологических узлов, так как их конструируют и изготавливают с учетом конкретного обрабатываемого материала и режимов обработки.

**Магнетроны.** В установках СВЧ-нагрева источниками концентрированного электромагнитного излучения служат магнетроны (рис. 4.22). Анодный блок магнетрона 1 представляет собой массивный медный цилиндр с центральным круглым сквозным отверстием и симметрично расположенными и сквозными полостями 2 (8—40), являющимися объемными резонаторами. Каждый из резонаторов соединен щелью с центральным отверстием, в котором расположен катод 5. Резонаторы образуют кольцевую колебательную систему, которая имеет несколько резонансных частот. При этих частотах на кольцевой колебательной системе укладывается несколько стоячих волн от 1 до  $N/2$  ( $N$  — число резонаторов). Наиболее приемлемым является вид колебаний, при котором число полуволн равно числу резонаторов ( $\pi$ -вид колебаний). Он так назван потому, что напряжения на двух соседних резонаторах сдвинуты по фазе на  $\pi$ . Для стабильной работы магнетрона необходи-

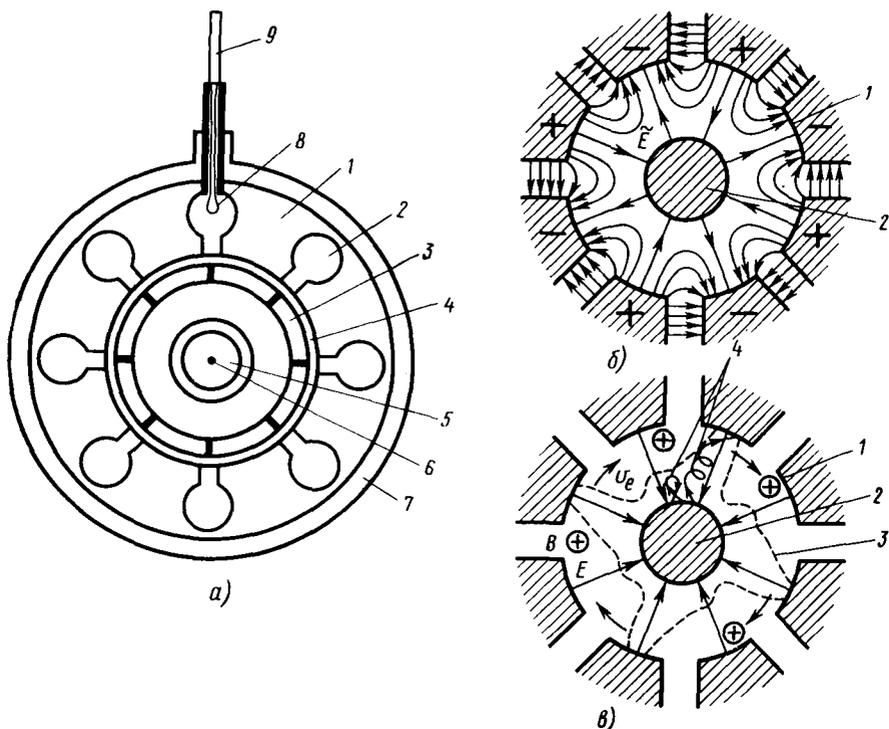


Рис. 4.22. Принципиальная схема многорезонаторного магнетрона (а):

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; распределение высокочастотного электрического поля при колебаниях  $\pi$ -вида (б); форма электронного облака при колебаниях  $\pi$ -вида (в); 1 — заземляющая система (анод); 2 — катод; 3 — граница электронного облака; 4 — форма траектории электронов;  $E$  — силовая линия постоянного электрического поля;  $E$  — силовые линии электрического СВЧ-поля;  $B$  — силовые линии индукции магнитного поля;  $v_e$  — скорость переносного движения электронов

мо, чтобы ближайшая резонансная частота колебаний системы значительно отличалась от рабочей частоты.

В магнетронах с одинаковыми резонаторами эта разность невелика. Ее можно увеличить введением связок в виде металлических колец 4, одно из которых соединяет все четные, а другое — все нечетные ламели анода 3, либо применением разнорезонаторной колебательной системы (четные резонаторы имеют одни размеры, нечетные — другие). В магнетронах движение электронов происходит в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях и в электромагнитном СВЧ-поле (300 МГц — 300 ГГц). Постоянное электрическое поле создается в промежутке анод—катод (см. рис. 4.22, б, в), а постоянное магнитное поле перпендикуляр-

но силовым линиям электрического поля и направлению движения электронов (вдоль оси катода). Под влиянием магнитного поля электроны изменяют направление движения — их радиальная скорость переходит в тангенциальную, перпендикулярную радиальной. Часть электрического СВЧ-поля проникает через щели резонаторов в пространство анод—катод. При движении в тангенциальном направлении электроны тормозятся тангенциальной составляющей СВЧ-поля, поэтому их энергия, полученная от источника постоянного напряжения, преобразуется в энергию СВЧ-колебаний. СВЧ-поле дважды за период колебаний меняет направление. Для непрерывного торможения электронов необходимо, чтобы они от одного резонатора к соседнему перемещались за полпериода в тангенциальном направлении. Это условие (синхронизм) является основным принципом работы многорезонаторного магнетрона. Попадающие в ускоряющее СВЧ-поле электроны увеличивают свою кинетическую энергию и выпадают из синхронизма. Они или возвращаются на катод, или попадают в тормозящее СВЧ-поле и снова входят в синхронизм (см. рис. 4.22, в).

## Раздел второй

### УСТАНОВКИ ДУГОВОГО НАГРЕВА

#### Глава 5

#### ОСНОВЫ ТЕОРИИ И СВОЙСТВА ДУГОВОГО РАЗРЯДА

##### § 5.1. Ионизация газов. Понятие плазмы

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.

Плазмой принято называть вещество, находящееся в четвертом состоянии (в дополнение к твердому, жидкому и газообразному), характеризующееся наличием нейтральных молекул и атомов, а также заряженных частиц — электронов и ионов, проводящее электрический ток и подчиняющееся законам магнитной гидродинамики. Превращение газа в плазму проходит несколько стадий. 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.

Отрицательные ионы образуются при захвате молекулой или атомом свободных электронов, что возможно лишь для электроотрицательных элементов при весьма малой скорости электронов. Положительные ионы возникают при потере нейтральной частицей одного или нескольких электронов.

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

Работа ионизации определяет химическую активность элемента, поскольку при ионизации отрываются валентные электроны;

$A_n = 3,9 \div 26$  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. Энергия ионизации при повышении кратности значительно возрастает и составляет, например, для Li 75,6 эВ (двукратная ионизация) и для трехкратной ионизации, например, для Be она составляет 153,8 эВ.

Движение заряженной частицы в электрическом поле равноускоренное, аналогичное свободному падению тела, но сила, действующая на частицу, зависит от ее заряда, а не от массы.

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

$$e_0 E = m dv/d\tau = ma, \quad (5.1)$$

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  $\tau$   $v_\tau = (e_0/m) E\tau$ . Пройденный путь за время  $\tau$

$$l_\tau = 0,5v_\tau = (0,5e_0/m) E\tau. \quad (5.2)$$

Скорость и пройденный частицей путь определяются ее удельным зарядом — отношением заряда к массе  $e_0/m$ . Поэтому при свободном движении частиц в одном и том же поле скорость электронов много больше скорости ионов.

Подставляя в уравнение (5.2) значение  $E = U/l$ , где  $U$  — разность потенциалов на пути  $l$ , получим скорость электрона

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

Скорость иона с атомной массой  $M$ , несущего  $Z$  зарядов, значительно меньше:

$$v_i = \sqrt{\frac{e_0 Z}{2MM_a}} U = 6,95 \cdot 10^3 \sqrt{Z/MU}.$$

В этих уравнениях  $m_e$  — масса электрона;  $M_a = 1822 m_e$  — атомная единица массы.

Основным видом ионизации при наличии электрического поля является ударная ионизация электроном. Вышедший из катода электрон под действием градиента поля ускоряется и при столкновении с нейтральными атомами или молекулами может выбить один электрон или придать атому или молекуле некоторую скорость. Так, при движении электрона от катода к аноду произойдет ряд столкновений, в результате чего температура газа повысится. При высоком давлении и больших градиентах поля этот вид ионизации может привести к значительному повышению температуры и росту сквозного тока проводимости.

Ионы в принципе тоже могут участвовать в ионизации, но так как их скорости много меньше скоростей электронов, то роль ионной ионизации в дуговых разрядах невелика. Однако при высоких температурах, когда скорость теплового движения молекул значительно возрастает, соударения ионов и нейтральных частиц приводят к термической ионизации газа. Роль этого вида ионизации весьма значительна при высоких температурах и давлениях.

*Фотоионизация*—ионизация атомов излучением возможна лишь в том случае, если энергия фотона  $h\nu$  превышает работу ионизации  $A_n$ :

$$h\nu = c/\lambda \geq A_n,$$

здесь  $\nu$  — частота излучения,  $1/c$ ;  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света, м/с;  $\lambda$  — длина световой волны, м.

Расчет показывает, что для ионизации атома азота ( $U_n = 12,4$  В) максимальная длина волны (красная граница фотоэффекта)  $\lambda_{\max} = 0,085$  мкм, для ионизации цезия —  $\lambda_{\max} = 0,318$  мкм, т. е. только ультрафиолетовые лучи могут вызвать ионизацию атомов.

Так как все виды ионизации: тепловое движение частиц, электрическое поле, световое излучение — повышают скорость взаимного перемещения частиц, то следует предположить, что и наличие высокочастотного напряжения должно приводить к ионизации пространства. Так это и происходит на самом деле. Приложение ВЧ-напряжения приводит к значительной ионизации — появлению ВЧ-короны даже при низких напряжениях.

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

Между этими процессами в стационарных условиях существует равновесие, характеризуемое степенью ионизации  $x$ , определяемой отношением числа ионов и электронов к полному числу нейтральных атомов в единице объема. Зависимость степени ионизации от температуры, давления и рода газа описывается уравнением Саха:

$$\frac{x^2}{1-x^2} p = 2,4 \cdot 10^{-4} T^{2,5} e^{-e_0 U_n / (kT)} = 2,4 \cdot 10^{-4} T^{2,5} e^{-11600 U_n / T},$$

здесь  $p$  — давление;  $T$  — температура;  $e_0 U_n$  — работа ионизации, Дж;  $k$  — постоянная Больцмана, Дж/К.

Из уравнения Саха следует, что термическая ионизация становится заметной при температуре, превышающей 2000—3000 К, и приближается к 100 %-ной при 10 000—30 000 К. Степень ионизации особенно высока при содержании в газовой среде паров щелочных металлов.

Уравнение процесса деионизации атома, потерявшего один электрон  $A^+$ , запишем в виде

$$A^+ + e^- = A_0 + \Delta W,$$

где  $A_0$  — нейтральный атом;  $\Delta W$  — количество теплоты, выделяющееся в результате этой реакции, равное энергии ионизации

$$\Delta W = e_0 U_{и}.$$

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

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

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

$$D = \lambda v / 3,$$

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

Скорость диффузии ионов невелика. Электроны диффундируют заметно быстрее. 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. Отсутствие равновесия может наблюдаться при низких давлениях, а также в сильных электрических полях. Это случай, когда средняя скорость электронов превышает среднюю скорость других частиц, что и соответствует их повышенной температуре.

## § 5.2. Структура электродугового разряда

В ряде электротермических процессов, идущих с поглощением большого количества тепловой энергии, применяется электродуговой разряд, или электрическая дуга, которая позволяет нагревать различные среды до высоких температур, недостижимых при сжигании топлива. Такие возможности электрической дуги пробудили значительный интерес к изучению ее физических свойств и энергетических возможностей.

Термины «разряд», «дуговой разряд» возникли как описание явления потери «заряда» батареей гальванических элементов или конденсаторов через газы и вакуум.

В большинстве случаев формы существования электрической дуги самые разнообразные, однако сохранилось первоначальное название «дуга», данное этому явлению В. В. Петровым еще в 1802 г. при описании разряда между горизонтальными электродами в воздухе, когда высокотемпературный газ в межэлектродном промежутке конвективными потоками воздуха изгибался выпуклостью вверх, принимая форму дуги или арки.

В последние годы все большее количество производственных процессов переводится на дуговой нагрев. Этому соответствует повышение наших знаний о дуговом разряде, найденные возможности регулирования и использования его многочисленных свойств.

Электрическая дуга является одним из явлений, возникающих при прохождении электрического тока через газ, пары или вакуум.

По внешнему признаку и особенностям электрические разряды в газах очень разнообразны. В общем случае их 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  $(3\div 5) 10^3$  К и выше.

В цепи, состоящей из проводниковых материалов, передача электрической энергии осуществляется электронами. Другое дело, если в цепь включен проводник второго рода. В этом случае прохождение электрического тока по такой цепи сопровождается протеканием сложных явлений, в процессе которых электроны превращаются в носители электрических зарядов другого вида, а затем снова в электроны.

Чтобы обеспечить прохождение тока по цепи, в которую включена электрическая дуга, электрон должен покинуть электрод—катод, для чего ему необходимо преодолеть силы притяжения к атому, а затем войти в анод.

Чтобы электрон вышел из катода, ему необходимо преодолеть силу статического взаимодействия с электронной оболочкой атома и потенциальный барьер электрода, т. е. совершить работу выхода. Для различных веществ она неодинакова. Так, для магния работа выхода составляет 1,0 эВ; алюминия — 2,8; ниобия — 4,0; вольфрама — 4,5; железа — 4,77 эВ и т. д.

Работа выхода электронов для данного металла меньше энергии его ионизации. Общая же закономерность расположения металлов по порядку сохраняется.

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 электродов катодом в результате его разогрева называют термоэлектронной эмиссией.

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

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

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.

Значения  $A_1$  и  $B_1$  равны соответственно для кальция 0,12 и 35 000, для углерода 5,03 и 45 700, для вольфрама 60,2 и 52 700 и т. д.

С увеличением температуры ток эмиссии быстро возрастает. Так, для вольфрамового катода в вакууме плотность тока термоэлектронной эмиссии при 1500 К составляет менее 10<sup>-7</sup> А/см<sup>2</sup>, а при 3500 К она возрастает более чем на девять порядков до ~ 220 А/см<sup>2</sup>.

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

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

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 температурах до 1000 К ток эмиссии слабо зависит от температуры. При более высоких температурах начинает проявляться термоэлектронная эмиссия. В этом случае суммарная плотность тока с поверхности электрода

$$j = A(T^2 + cE^2) e^{B/(T+cE)},$$

где  $A = 120,4$  А/(см<sup>2</sup>·К<sup>2</sup>) для чистых металлов.

Для повышения тока эмиссии и снижения работы выхода электронов в основной материал электродов вводят активирующие добавки в виде щелочных или редкоземельных металлов, а также их оксидов. Например, ионизирующими добавками для вольфрама служат ThO<sub>2</sub>, LaO<sub>2</sub>, AlCaO<sub>2</sub>, AlCaBaO, а для углерода Cs, Li, K, Na, Ca.

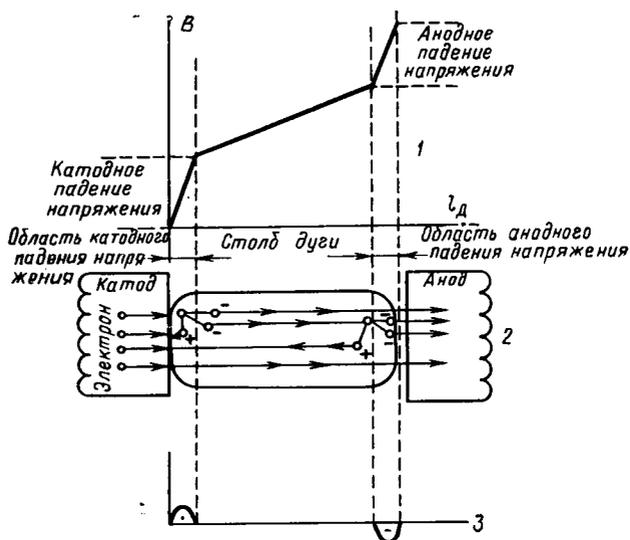


Рис. 5.1. Распределение потенциала и носителей электричества вдоль канала столба дуги

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. Полное падение напряжения между электродами

$$U_d = U_a + U_k + EL,$$

где  $U_a$  и  $U_k$  — анодное и катодное падения потенциала, В;  $E$  — напряженность электрического поля (линейный градиент напряжения) дугового столба, В/м;  $L$  — длина дуги, м.

### § 5.3. Характеристика приэлектродных областей и протекающих в них процессов

Изучение протекающих в приэлектродных областях и на электродах процессов и их закономерностей применительно к электро-технологическим установкам преследует две цели:

1) выявление закономерностей переноса теплоты и материала электрода при электродуговой сварке, плазменно-дуговой и плазменной сварке и резке металлов, переплаве металлов в дуговых печах;

2) создание тугоплавких нерасходуемых или малорасходуемых электродов для электродуговых печей, плазменных генераторов (плазмотронов) и т. д.

Контакт электрической дуги с электродами происходит в электродных пятнах (катодном и анодном), которые различаются проходящими в них явлениями и элементарными процессами.

Из прикатодных участков плазмы ионы движутся к катоду и разогревают его за счет передачи ему энергии нейтрализации и собственной кинетической энергии. Таким образом, у поверхности катода образуется положительный электрический заряд, а у поверхности анода — отрицательный. При прохождении заряженных частиц — электронов и ионов — через эти пространственные заряды образуются анодное и катодное падения потенциалов.

Выделяющаяся на аноде мощность

$$Q_a = I_d(U_a + \varphi), \quad (5.6)$$

где  $I_d$  — ток дуги, А;  $U_a$  — анодное падение потенциала, В;  $\varphi$  — работа выхода электрона, эВ.

Анодное падение потенциала зависит от материала анода, температуры его плавления (повышается с ростом последней) и силы тока.

Выделяющаяся на катоде мощность

$$Q_k = I_d(U_k - \varphi), \quad (5.7)$$

где  $U_k$  — катодное падение потенциала, В.

Для катода работу выхода электрона  $\varphi$  берут со знаком «—», так как электрон, покидающий катод, уносит с собой энергию и катод охлаждается.

Плотность тока в электродных пятнах зависит и от материала электрода. Например, на вольфрамовом и угольном электроде плотность тока в катодном пятне  $j_k = (3 \div 5) 10^3$  А/см<sup>2</sup>. Для легкоплавких металлических катодов  $j_k = 10^4 \div 10^7$  А/см<sup>2</sup>. В анодных пятнах для тугоплавких электродов  $j_k = (1 \div 6) 10^2$  А/см<sup>2</sup>, а для легкоплавких  $j_k = 10^3 \div 10^4$  А/см<sup>2</sup>.

Рассмотрим баланс энергии на электродах. Энергию, поступающую в электрод, можно представить состоящей из компонентов:

1) внутреннего источника ( $I^2R$  — джоулева теплота, выделяющаяся на границе электрода с плазмой);

2) внешнего источника, связанного с приходом электрических зарядов на электрод;

3) излучения плазмы дуги;

4) конвективного нагрева окружающим газом;

5) теплоты от экзотермических реакций материала электродов с окружающими газами.

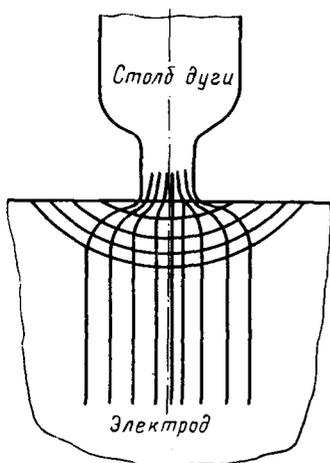


Рис. 5.2. Схема линий тока на границе дугового столба—электрод

1. Рассмотрим первую составляющую. На рис. 5.2 показаны линии тока, по которым электрический ток проходит из электрода в столб дуги. Область, в которой концентрируются токовые линии, расположена непосредственно под электродным пятном и характеризуется повышенной плотностью тока.

Мощность объемного источника энергии в этом случае

$$P_V = 0,48 (2/3\pi r^3)^{r^2/\sigma},$$

где  $r$  — радиус пятна, м;  $\sigma$  — проводимость материала электрода, Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>.

2. Энергия внешнего источника теплоты обусловлена мощностью, выделяющейся в приэлектродных областях. Для определения этих

величин пользуются формулами (5.6) и (5.7).

3. Мощность излучения определяют по формуле радиационного теплопереноса (1.4).

4. Выделение теплоты за счет конвективного теплопереноса наблюдается в том случае, когда высокотемпературный газ обтекает электрод.

5. Теплота, обусловленная прохождением на электродах экзотермических реакций, зависит от химической активности системы плазма — материал электрода.

Пути отвода энергии.

1. За счет теплопроводности в тело электрода.

2. В результате уноса теплоты при испарении и разбрызгивании электрода.

3 В результате уноса энергии электронами, которые эмитируют разогретые поверхности электродов. Вышедшие из электрода частицы обладают определенной энергией, которую они уносят с собой:  $\Delta W_k = \phi I_e$ ,  $\Delta W_a = \phi I_i$ , где  $\phi$  — работа выхода;  $I_e$  и  $I_i$  — электронный и ионный ток соответственно.

4. За счет отвода теплоты от электродов излучением вследствие того, что электродные пятна имеют высокую температуру.

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

**Тугоплавкие электроды** изготовляют из графита и материалов на его основе, металлов, имеющих высокую температуру плавления — вольфрам, молибден, тантал и др., используя их способ-

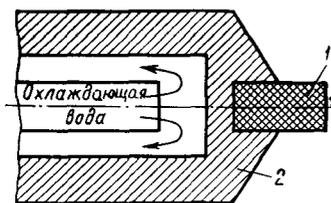


Рис. 5.3. Конструкция катодного узла плазматрона

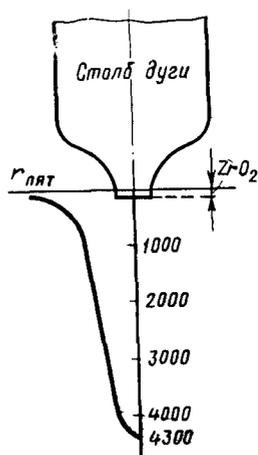


Рис. 5.4. Температурное поле термохимического катода

ность выдерживать большие тепловые потоки и обеспечивать высокий уровень плотности тока термоэлектронной эмиссии.

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 плазматронах, вакуумные дуговые печи, некоторые виды сварки и электрической резки металлов).

Рассмотрим электроды, применяемые в электродуговых нагревателях газа.

На рис. 5.3 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, исключающих 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 плазматронах). Кроме указанных случаев электроды из легкоплавких металлов, в частности из ртути, применяются в выпрямительных устройствах. Для увеличения срока службы нерасходуемых электродов предусмотрено быстрое перемещение электродного пятна по их поверхности. Это может достигаться аэродинамическим воздействием на дугу газового потока, воздействием на дугу

внешним магнитным полем или механическим перемещением электрода.

**Термохимический катод.** При горении дуги в активных газах на поверхности электродов возможно образование соединений, существенно влияющих на электрофизические свойства электродов — работу выхода, плотность тока эмиссии, температуру поверхности.

*Термохимическим катодом* называют электрод, активная зона которого образуется при взаимодействии материала электрода с окружающим газом, расходуется во время работы и регенерируется по мере разрушения.

Анализ свойств лантаноидов (цирконий, гафний и др.) показал, что благодаря наличию соединений, сохраняющихся при довольно высоких температурах и являющихся высокоэффективными электродами, эти металлы наиболее перспективны для создания термохимического катода.

При горении дуги на поверхности электрода (цирконий, гафний или лантан) на катоде в присутствии кислорода образуются оксиды металлов, которые характеризуются более высокой температурой плавления, чем у исходных металлов.

Так, если температура плавления циркония около 2500 К, то диоксид циркония плавится при температуре около 4800 К.

Электрическое сопротивление диоксида циркония с повышением температуры падает от  $1 \cdot 10^4$  Ом·м при температуре 700 К до 0,1 Ом·м при температуре 2300 К. Катодное пятно на цирконии или гафнии, покрытых слоем оксидов, не перемещается и представляет собой концентрированную тепловую нагрузку. Температура максимальна в центре пятна и резко падает к периферии (рис. 5.4). С понижением температуры уменьшается проводимость активного слоя электрода, тем самым положение пятна дуги стабилизируется расплавленными и твердыми слоями соединений на электроде.

Вследствие низкой теплопроводности материала ограничивается значение действующего в пятне теплового потока (около 0,8 кВт для циркония и 1,5—2 кВт для гафния). Стабилизации электродного пятна на цирконии способствует пониженное значение работы выхода материала поверхности электрода. Так, работа выхода циркония составляет 4,4—4,7 эВ, а работа выхода образующейся пленки диоксида циркония — 2,3 эВ.

Термохимический катод не может работать без взаимодействия с окружающей средой.

На рис. 5.5 показан термохимический катод дуговой установки для нагрева газов. В массивную водоохлаждаемую втулку

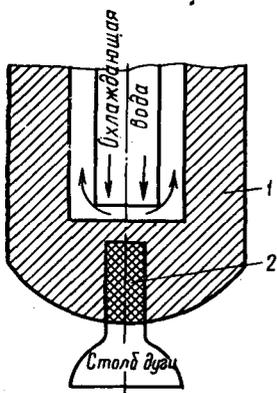


Рис. 5.5. Разрез термохимического катода

ку 1 запрессовывается активная вставка из циркония или гафния 2, так как охлаждение ее возможно лишь методом контактного теплообмена.

При работе на токах, когда пятно дуги занимает 75—85% площади активной вставки, образующаяся лунка окружена пленкой соединений, предотвращающей контакт дуги с медью. При переходе дуги на медную оболочку вследствие роста силы тока дуги оболочка отжигается, что приводит к нарушению теплового контакта в системе оболочка — активная вставка и электрод выходит из строя. Допустимая плотность тока на цирконии составляет 50—60 А/мм<sup>2</sup>.

#### § 5.4. Основные закономерности электродугового столба

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

$$I = \pi r_d^2 n_e e_0 v_e,$$

где  $r_d$  — радиус столба дуги, м;  $n_e$  — концентрация электронов, 1/м<sup>3</sup>;  $e_0$  — 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. 5.6) и сильно затрудняет теоретический расчет ее параметров.

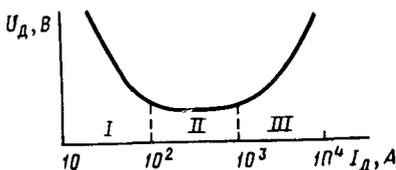


Рис. 5.6. Вольт-амперная характеристика электрической дуги

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

$$\sigma = n_e e_0 \mu_e = \frac{0,81 n_e e_0^2}{\sqrt{3kTm_e}} \frac{1}{\Sigma n_s Q_{eS}}, \quad (5.8)$$

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

В реальных условиях в сильноточных дугах температура свободной горящей дуги  $T_d$  ( $7,5 \div 12,5$ )  $10^3$  К. При таких температурах 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. 5.6 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.

Важные выводы об особенностях вольт-амперной характеристики дуги можно получить из рассмотрения баланса ее энергии. Подводимая к дуговому столбу энергия рассеивается за счет теплопроводности, конвекции и излучения.

Уравнение баланса энергии для единицы объема столба электрической дуги имеет следующий вид:

$$jE = \text{div} \lambda \text{grad} T + \rho C_p v \text{grad} T + S(T) + \dots,$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $\rho$  — плотность;  $C_p$  — теплоемкость среды при постоянном давлении.

Потери энергии на излучение дугой  $\Delta W_{\text{изл}} = C_S T^4$ , где  $C_S$  — константа излучения абсолютно черного тела.

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.

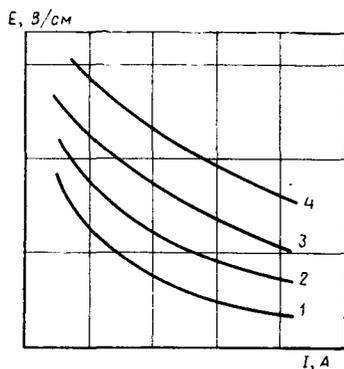


Рис. 5.7. Зависимость градиента напряжения дуги от тока для различных газов:

1 — аргон; 2 — воздух; 3 — азот; 4 — водород

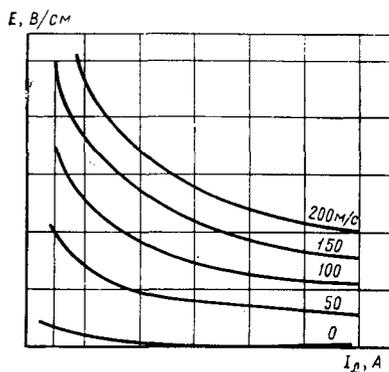


Рис. 5.8. Вольт-амперные характеристики дуги при различных скоростях ее движения в воздухе

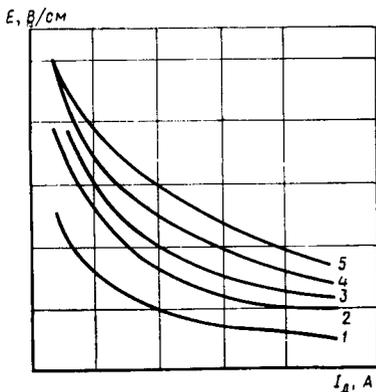


Рис. 5.9. Вольт-амперные характеристики дуги при различных давлениях окружающей среды: 1 —  $10^3$  Па; 2 —  $10^4$  Па; 3 —  $10^5$  Па; 4 —  $10^6$  Па; 5 —  $10^7$  Па

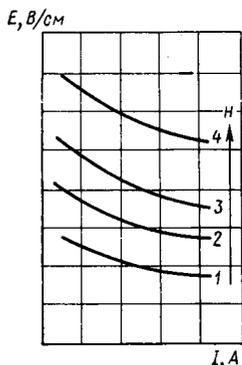


Рис. 5.10. Зависимость градиента напряжения от тока дуги при различных напряженностях внешнего магнитного поля

Расход энергии на нагрев окружающего газа за счет теплопроводности и конвекции взаимосвязаны и реализуются одновременно.

При расчете теплообмена принимают две схемы процесса:

1) дуга, продуваемая газом, — проникаемая область полностью замещается протекающим газом; 2) дуга, не продуваемая газом и обтекаемая как твердое тело.

Очевидно, обе эти схемы в дуге существуют одновременно.

Эффективность использования теплоты дуги для нагрева газов сильно зависит от их свойств.

Зависимость градиента напряжения дуги от тока для различных газов показана на рис. 5.7. У водорода, имеющего высокие значения энергии диссоциации, потенциала ионизации, коэффициента теплопроводности, для рассматриваемых газов линейный градиент потенциала имеет наивысшее значение.

На рис. 5.8 показана зависимость напряженности электрического поля от тока дуги при различной скорости ее движения в воздухе. Аналогичный вид имеют эти зависимости при обдуве неподвижной дуги потоком газа.

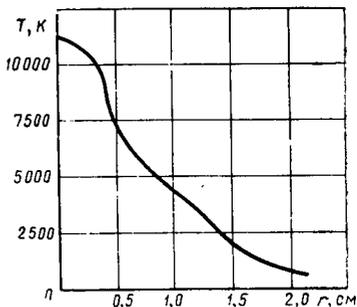


Рис. 5.11. Распределение температуры по радиусу в высокоточной дуге

Таким же образом напряжение на дуге зависит от давления среды, в которой она горит (рис. 5.9).

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  $F$ , действующая на дугу:

$$F = e_0 [E + (1/c)(V \times H)], \quad (5.9)$$

где  $c$  — скорость света;  $e_0$  — заряд электрона;  $E$ ,  $H$  — напряженности соответственно электрического и магнитного полей.

Под действием этой силы дуговой столб интенсивно перемещается в межэлектродном пространстве.

С ростом напряженности магнитного поля и тока дуги увеличивается скорость ее движения, интенсифицируется теплообмен дугового столба с окружающей средой. Вследствие этого изменяется и вольт-амперная характеристика электродугового разряда (рис. 5.10).

Температура по сечению столба дуги распределяется неравномерно. Она имеет максимум на оси столба и понижается к его периферии. На рис. 5.11 показано распределение температуры по радиусу в сильноточной электрической дуге, горящей между угольными электродами. На оси дуги температура достигает 12 000 К, а на расстоянии около 2 см от оси она падает примерно до 1000 К.

Интенсивное внешнее охлаждение дуги приводит к значительному повышению плотности тока и температуры в разрядном канале. Так, для свободногорящей сильноточной дуги плотность тока в столбе составляет около  $10^2$  А/см<sup>2</sup>. Стабилизированная водяным вихревым потоком дуга (дуга Гердиена) имеет плотность тока, достигающую  $5 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup>, и температуру порядка  $70 \cdot 10^3$  К.

Для получения высоких температур необходимо принимать меры по ограничению размеров проводящей зоны дугового столба и увеличению плотности тока в нем.

### § 5.5. 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. 5.12, а. При этом си-

ла тока дуги  $i_d$  и напряжение источника питания  $u_n$  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

$$dE/d\tau \ll dU/d\tau,$$

где  $dE/d\tau$  — скорость нарастания диэлектрической прочности газа межэлектродного промежутка;  $du/d\tau$  — скорость нарастания напряженности электрического поля между электродами.

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. 5.12, б).

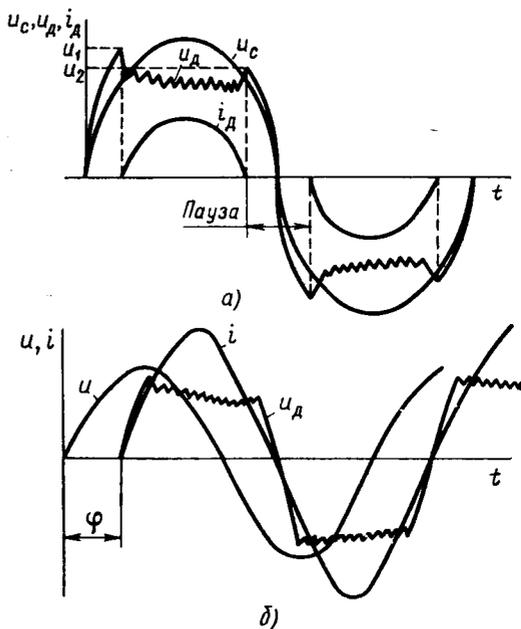


Рис. 5.12. Осциллограммы тока и напряжения дуги в цепи с чисто активным (а) и индуктивным (б) сопротивлением

Анализ кривых показывает, что после снижения напряжения источника питания ниже напряжения дуги ее горение поддерживается за счет электромагнитной энергии, накопленной в индуктивности. Изменяя индуктивность, можно получить такой угол  $\varphi$ , при котором дуга будет гореть непрерывно. Это произойдет при

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

где  $U_m$  — амплитудное значение напряжения источника питания.

Учитывая, что  $\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$ , а

$$\cos \varphi = \pi / 2 u_d / U_m, \quad (5.11)$$

находим

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - (\pi / 2 u_d / U_m)^2}.$$

Подставив (5.10) в (5.11), получим

$$\begin{aligned} u_d / U_m &\leq 0,54 \text{ и} \\ \cos \varphi = (\pi / 2) (u_d / U_m) &\leq (\pi / 2) 0,54 = 0,85. \end{aligned}$$

Таким образом, если отношение  $u_d / U_m$  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). Температура угольного электрода значительно выше, поэтому условия термоэлектронной эмиссии на нем более благоприятные и она обеспечивает достаточную плотность тока. На легкоплавком катоде плотность тока термоэлектронной эмиссии меньше и ток дуги в этом полупериоде меньше или отсутствует вообще. Этому способствует и охлаждение дуги вблизи металлического электрода, а также перемещение конца дуги по нему. Значение и направление постоянной составляющей непрерывно изменяются, 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. 5.13).

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  $di/dt$ , 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 и ей соответствует безгистерезисная характеристика (рис. 5.13, б).

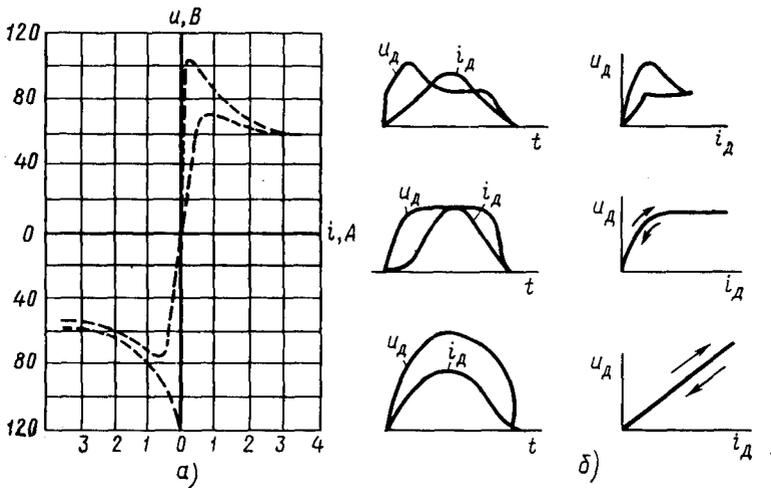


Рис. 5.13. Динамическая вольт-амперная характеристика дуги переменного тока

Гистерезисный характер зависимости (рис. 5.13, 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.

### § 5.6. 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 источника питания не пересекутся, т. е. ток будет стремиться к бесконечности.

Для ограничения силы тока дуги в цепь последовательно с дугой включают сопротивление (рис. 5.14). В этом случае уравнение напряжения источника конечной мощности имеет вид

$$U_{\text{ист}} = U_{\text{д}} + I_{\text{д}}R + LdI_{\text{д}}/dt,$$

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

Прямая линия ( $U_{\text{ист}} - I_{\text{д}}R$ ) пересекает вольт-амперную характеристику дуги в точках А и В. Этим точкам соответствуют токи

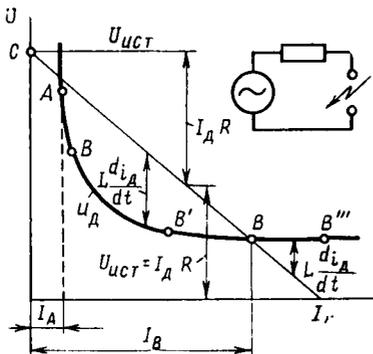


Рис. 5.14. Вольт-амперная характеристика системы дуга — балластное сопротивление — источник питания

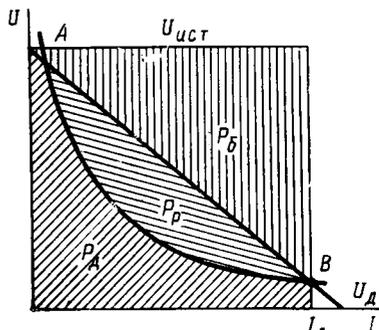


Рис. 5.15. Вольт-амперная характеристика дуги и источника питания

$I_A$  и  $I_B$ . Рассматриваемую характеристику можно разбить на три зоны. Зона левее точки  $A$  — зона устойчивого гашения дуги, между точками  $A$  и  $B$  — зона горения и правее точки  $B$  — зона ограничения тока. Дуга может гореть устойчиво лишь при токе  $I_B$ , точка  $A$  соответствует неустойчивому горению дуги;  $I_k$  — точка короткого замыкания цепи.

При пробое межэлектродного промежутка и загорании дуги по цепи проходит электрический ток. Правее точки  $A$ , например в точке  $B'$ , между вольт-амперной характеристикой дуги и внешней характеристикой питающей сети существует подпитывающая ЭДС, которая способствует увеличению тока дуги. В точке  $B$  ЭДС равна нулю, поскольку напряжения источника и дуги одинаковы. Правее точки  $B$  в точке  $B'''$  горение дуги невозможно, так как напряжение на ее электродах должно быть больше, чем может дать цепь при этом токе. В точке  $A$  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, рассеиваемой на балластном сопротивлении цепи дуги.

На рис. 5.15 показаны вольт-амперная характеристика дуги и внешняя характеристика источника питания с включенным последовательно между ним и дугой балластным сопротивлением. В точке  $B$  баланс энергии источника запишем в виде

$$U_{ист} I_d = U_d I_d + I_d^2 R_б,$$

где  $R_б$  — сопротивление балластного сопротивления, Ом.

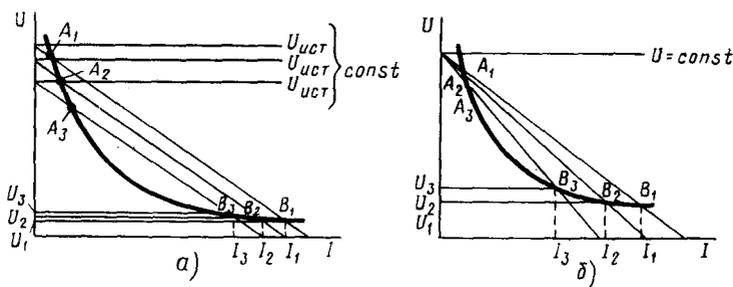


Рис. 5.16. Вольт-амперная характеристика дуги:  
 а — при изменении напряжения источника питания; б — при изменении балластного сопротивления

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

Мощность электрической дуги можно регулировать несколькими способами.

1. Изменением напряжения питающей сети при постоянном балластном сопротивлении (рис. 5.16). Регулировка происходит за счет изменения токов  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  и соответственно напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$ . Для осуществления этого метода напряжение источника питания можно изменять, например, за счет переключения числа витков трансформатора либо изменения сопротивления в цепи возбуждения генератора (рис. 5.16, а).

2. Изменением балластного сопротивления при неизменном напряжении источника питания (рис. 5.16, б).

Для осуществления этого способа регулирования необходимо иметь сопротивление с переключением ступеней. По сравнению с рассмотренным этот способ менее экономичен, поскольку источник вырабатывает постоянную мощность и при уменьшении мощности дуги избыток энергии рассеивается на балластном сопротивлении.

3. Воздействием на дугу различными факторами, в результате чего изменяются условия ее горения при постоянных напряжениях источника и сопротивления в цепи.

Среди факторов, воздействующих на дугу, отметим такие, как наложение на дуговой разряд магнитного поля, поток газа, изменение давления среды и самой среды, в которой горит дуга, а также изменение длины дугового столба.

Влияние этих факторов на вольт-амперную характеристику рассматривалось при обсуждении баланса энергии электродугового 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. С этой целью разработаны специальные источники питания дуги — параметрические источники тока, тиристорные преобразователи, применяемые в конкретных установках.

**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.

1. При касании электродов под напряжением в точке их касания в переходном контакте выделяется тепловая энергия, вызывающая расплавление участка электрода. При последующем разведении мостик из расплавленного металла взрывается. Под действием электрического поля между электродами горячие участки электрода эмитируют электроны, увеличивающие ионизацию продуктов электрического взрыва жидкого металла и создают цепь тока через образовавшуюся плазму. При ожидаемом токе дуги более 50 А скорость разведения электродов не должна превышать 0,01 м/с.

2. В случаях, когда электроды неподвижны или бросок тока, возникающий при их замыкании, превосходит допустимые пределы, зажигание дуги производится включением источника питания на закороченные тонким проводником электроды или электроды, находящиеся под напряжением, замыкаются тонкой проволокой. Для успешного возбуждения дуги необходимо, чтобы проволочка взрывалась при токе, близком к номинальному току дуги. Материал проволочки должен иметь высокую температуру плавления, чтобы после ее взрыва температура продуктов взрыва была близкой к температуре плазмы дугового разряда.

3. Зажигание дуги импульсным пробоем дугового промежутка, находящегося под напряжением источника питания дуги, производится с помощью осциллятора. Осциллятор — это преобразователь тока промышлен-

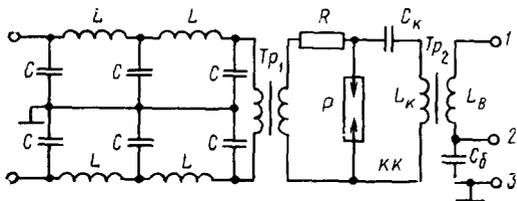


Рис. 5.17. Схема осциллятора

ленной частоты низкого напряжения (60—220 В) в ток высокой частоты (150—500 кГц) высокого напряжения 2000—8000 В.

Принципиальная схема осциллятора показана на рис. 5.17. В его состав входят: повышающий трансформатор  $Tp_1$  с выходным потенциалом 3—8 кВ, искровой разрядник  $P$ , высокочастотный трансформатор  $Tp_2$ , токоограничивающее сопротивление  $R$ , емкости  $C_k$  и индуктивности  $L_k$ , создающие колебательный контур КК, выделяющий из широкого спектра частот, генерируемых искровым разрядом частоту 150—500 кГц, необходимую для пробоя промежутка и безопасную для человека.

Частота колебаний контура определяется его параметрами и описывается выражением

$$f_k = [1/(2\pi)] \sqrt{1/(L_k C_k) - R_k^2/(4L_k^2)},$$

где  $R_k$  — активное сопротивление контура.

Элементы  $L$  и  $C$  препятствуют попаданию высокой частоты в питающую сеть, емкость  $C_b$  препятствует попаданию напряжения источника питания дуги в обмотку высокочастотного трансформатора.

## Глава 6

### ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ И РУДНО-ТЕРМИЧЕСКИЕ 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 них 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.

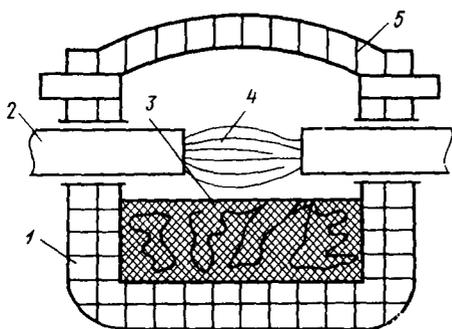


Рис. 6.1. Схема дуговой печи косвенного действия

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.

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.

### § 6.2. 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 машиностроительных 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. Каждая печь имеет рабочие окна и сливное отверстие. Через рабочее окно производится загрузка печи, а через сливное отверстие — ее выгрузка. Иногда печь загружается сверху при снятом или отодвинутом своде. Слив готового металла производится путем наклона печи.

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

Электродуговая печная установка снабжена механизмами наклона печи для слива металла, подъема и отворота свода, перемещения электродов. Они могут иметь электромеханический или гидравлический привод. Электроды крепятся в специальных электрододержателях, которые связаны с механизмом перемещения электродов. Ток подводится к электрододержателю с помощью пакета медных шин или водоохлаждаемых труб.

В качестве примера существующих промышленных дуговых сталеплавильных печей для рис. 6.3 показана схема печи ДСП-200 МО1.

Процесс выплавки электростали в дуговой печи состоит из сле-

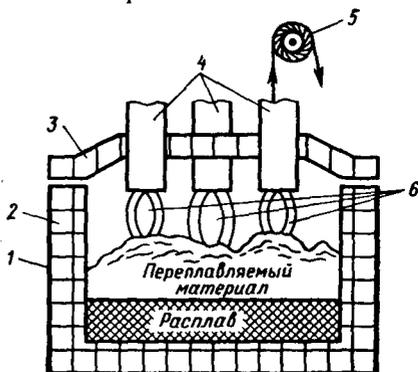


Рис. 6.2. Схема дуговой сталеплавильной печи

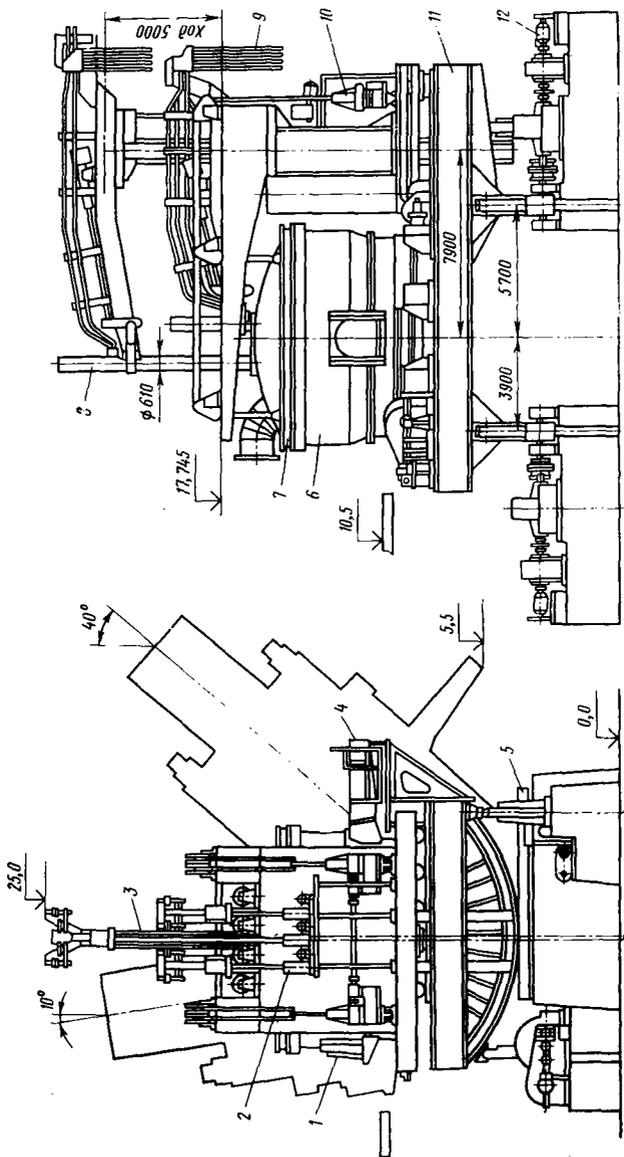


Рис. 6.3. Дуговая сталеплавильная печь ДСП-200 М 01:

1 — рабочее окно; 2 — механизм перемещения электрода; 3 — колонна электродержателя; 4 — сливной носок; 5 — фундаментная балка; 6 — кожух; 7 — свод; 8 — электрод; 9 — кабельная гарлянда; 10 — механизм подвеса свода; 11 — люлька; 12 — привод наклона

дующих операций: расплавление скрапа, удаление содержащихся в нем вредных примесей и газов, раскисление металла, введение в него нужных легирующих компонентов, рафинирование, выливание металла в ковш для последующей разливки.

Под действием развивающейся в опорном пятне дуги температуры скрап расплавляется и жидкий металл стекает в подину. В шихте образуются колодцы, в которые углубляются опускающиеся электроды до тех пор, пока они не достигнут поверхности расплавленного металла на подине печи.

Расплавление скрапа и шихты приводит к повышению уровня расплавленного металла и для предотвращения короткого замыкания электроды поднимаются. Характерной особенностью периода расплавления является неспокойный режим горения дуги. Горящая между концом электрода и холодным металлом дуга нестабильна, длина ее меняется в широких пределах при обвалах и перемещениях скрапа (от короткого замыкания до обрыва дуги). Длительность периода расплавления зачастую составляет более половины всего процесса и при этом расходуется 60—80% всей электроэнергии. Период расплавления считается законченным, когда весь металл в ванне печи перешел в жидкое состояние.

Удаление примесей происходит следующим образом. Сначала вследствие сравнительно низкой температуры ванны в ней интенсивно идут эндотермические реакции окисления железа, кремния, марганца и фосфора. Оксиды всплывают и образуют на поверхности расплава вместе с вводимой известью слой шлака, который имеет в своем составе легкоионизирующиеся компоненты (более низкая работа выхода электрона) по сравнению с расплавленным металлом, поэтому, несмотря на значительное удлинение, дуга здесь горит устойчиво. В шлаке оксиды кремния соединяются с закисью железа и марганца, образуя соответствующие силикаты. Для интенсификации этих процессов в ванну добавляют железную руду или вдувают кислород. При этом углерод металла восстанавливает руду. Образующийся оксид углерода пузырьками всплывает — происходит так называемое «кипение», или «кип», ванны. Важной стадией процесса является рафинирование металла.

В конце периода расплавления для окончательного доведения состава металла до требуемого в него вводят легирующие добавки и приступают к разливке. Плавка в крупных печах длится 4—6 ч: из них 1,5—2,5 ч длится расплавление и 2—4 ч — окисление и рафинирование металла. В зависимости от вида скрапа, шихты, состава футеровки, применения легирующих компонентов режимы работы печи и стадии технологического процесса могут быть различными. Поэтому к конструкции дуговой печи, ее элементам и схеме электроснабжения предъявляют особые требования.

1. Возможность гибкого управления мощностью, поскольку в начальный период необходима максимальная мощность, чтобы ускорить процесс расплавления. В другие периоды нужно иметь

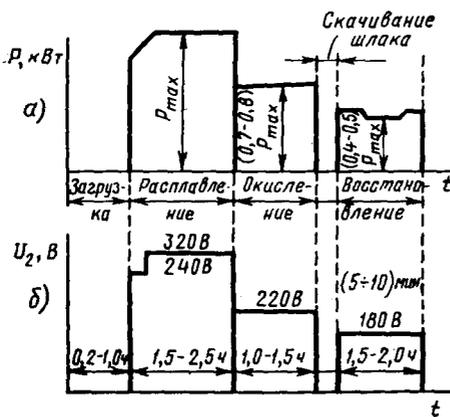


Рис. 6.4. График мощности и напряжения дуговой сталеплавильной печи при выплавке основным процессом с полным раскислением

возможность изменять мощность для управления температурами металла и шлака. При мерный график мощности напряжения дуговой печи при выплавке основным процессом с полным раскислением показан на рис. 6.4, а, б.

2. Поддержание в печи восстановительной атмосферы.

3. Быстрая реакция электрооборудования печи на частые короткие замыкания и обрывы дуги в период расплавления, возможность ограничить ток короткого замыкания до безопасных значений, ликвидировать все отступления от нормального электрического

режима в кратчайшее время. Нарушение нормального режима происходит, как правило, по фазам. Поэтому каждый электрод печи должен быть оснащен механизмами подъема и опускания с автоматическим регулированием.

Дуговые сталеплавильные печи являются трехфазными и имеют подину из непроводящего материала. Ванна с металлом в такой печи образует естественную нулевую точку трехфазной цепи, и печь оказывается включенной по трехпроводной системе трехфазного тока без нулевого провода.

Электроды в дуговых печах служат для ввода электроэнергии в зону ее потребления, для расплавления шихты и получения необходимых материалов. Электроды подразделяют на *нерасходуемые* и *расходуемые*. Основные требования, предъявляемые к ним: достаточная механическая прочность, способность выдерживать высокие температуры, низкое активное сопротивление. В дуговых печах применяются непрерывно наращиваемые графитизированные электроды. Они имеют круглое сечение и обработанные торцы, в которых по оси имеются отверстия с резьбой. В отверстия ввинчены ниппели, выполненные из материала электрода. Ниппели ввинчены до половины своей длины. На выступающую из торца электрода половину ниппеля навинчен следующий электрод и т. д. Таким способом изготавливается электродная свеча, состоящая из нескольких электродов.

В зависимости от диаметра электроды изготовляют длиной 1000—1800 мм. По мере обгорания в печи нижней части свечей электродов она опускается вниз с помощью механизмов перемещения. Когда электрододержатель подходит к своду печи, производится наращивание и перепуск электродов.

Таблица 6.1

Тип печи	Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	Напряжение первичной обмотки трансформатора $U_1$ , кВ	Пределы изменения вторичного напряжения $\Delta U$ , В	Ток вторичной обмотки трансформатора $I_2$ , кА	Удельный расход электроэнергии $w$ , кВт·ч/т
ДС-0,5	400	6,10	213—110	1,085	650
ДСП-1,5	1 000	6,10	225—118	2,57	550
ДСП-3	1 800	6,10	242—122,5	2,25	525
ДСП-6	2 800	6,10	257—197,5	6,3	—
ДСП-12	5 000	6,10	278—202	10,4	500
ДСП-20	9 000	6,10	318—116	16,35	470
ДСП-25	16 000	35	384—148	24—10	—
ДСВ-40	15 000	35	386—126	23,5	—
ДСП-50	20 000—29 150	35	486—152	27,7—34,6	460—440
ДСП-80А	32 000	35	478—161	38,8	420
ДСП-100	45 000	35	591,5—164,1	43,9	—
ДСП-200	45 000	35	—	—	400

Графитизированные электроды изготовляют из искусственного электрографита в специальных электрических печах. Несмотря на то что они дороже угольных, в современных печах в подавляющем большинстве применяются графитизированные электроды. Основное их достоинство — меньшее удельное сопротивление.

Иногда применяемые графитоугольные электроды диаметром 100—1200 мм изготовляют из антрацита, термоантрацита (прокаленного антрацита), нефтяного кокса, каменноугольного пека и смолы в специальных печах путем обжига заготовок без доступа кислорода при температуре до 1600 К.

В нашей стране в эксплуатации находятся дуговые печи для выплавки стали емкостью до 200 т, питаемые от трансформаторов мощностью до 80 МВ·А. В будущем должны быть созданы печи емкостью 300—400 т. Основные данные ряда ДСП приведены в табл. 6.1.

При повышении мощности печи значительно снижается расход энергии на выплавку 1 т металла, что определяет тенденцию укрупнения печных установок.

### § 6.3. Электрооборудование дуговых печных установок

Электродуговая печь представляет собой мощный энергопотребитель, относящийся ко второй категории по надежности электроабжения. Электрооборудование и схемы электроснабжения ДСП имеют ряд особенностей.

Основное электрооборудование дуговых печных установок (рис. 6.5) включает печь с электродами и ванной, в которой горят уголи и находится перерабатываемый материал; отдельный для каждой печи понизительный трансформатор, вместе с которым

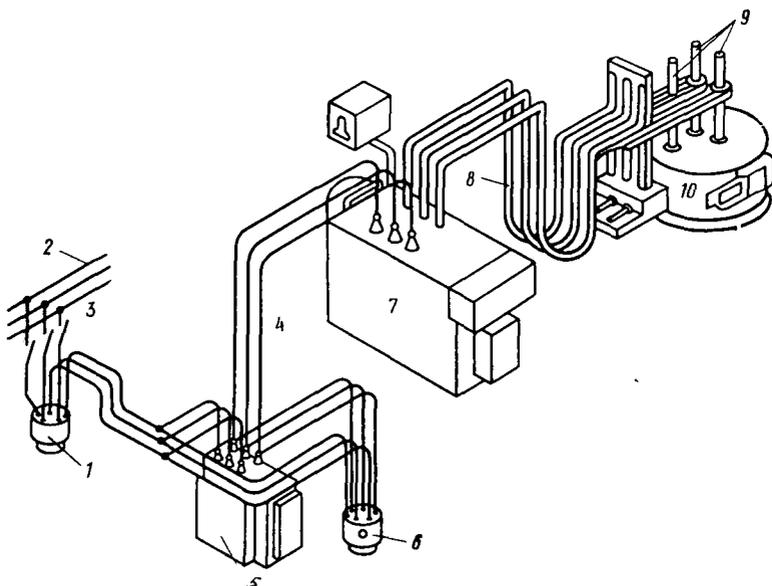


Рис. 6.5. Схема электропечной установки:

1, 6 — выключатели; 2 — высоковольтные шины; 3 — разъединитель; 4 — высоковольтная сеть; 5 — реактор; 7 — печной трансформатор; 8 — короткая сеть; 9 — электроды; 10 — электродуговая печь

часто размещены дроссели; короткую сеть, соединяющую вторичные выводы трансформатора с электродами печи; коммутационную, измерительную и защитную аппаратуру.

В печных установках применяются трансформаторы и дроссели, изготовленные в виде отдельных аппаратов, а также трансформаторы со встроенными дросселями.

В дуговых электропечных установках различают главную и вспомогательные цепи тока (рис. 6.6).

*Главная цепь тока* включает основное электрооборудование и электрические дуги печи. К вспомогательным относятся цепи управления, измерения и защиты, автоматики и т. п.

В главной цепи различают первичную и вторичную стороны. Первичная цепь состоит из последовательно соединенных проводов и аппаратов высокого напряжения, дросселя и первичной обмотки печного трансформатора. Вторичная цепь состоит из последовательно соединенных вторичной обмотки трансформатора, токопроводов короткой сети, электродов и электрических дуг. Все части цепи, расположенные вне печи, получили общее название подводящей сети.

Короткой сетью называют токопровод от выводов вторичной стороны трансформаторов до электродов дуговой печи.

По короткой сети идут очень большие токи (до 100 кА и выше), поэтому токопроводы короткой сети имеют большое сечение и выполнены в виде пакетов медных лент, медных шин или водоохлаждаемых труб.

Короткая сеть состоит из участков жестко закрепленных шинопроводов и гибких проводов, соединяющих концы шинопроводов с передвигающимися во время работы печи электродами.

Подвод питающей линии высокого напряжения от ввода производится через разъединители и выключатели высокого напряжения, установленные вместе с защитными аппаратами в распределительном устройстве электропечной установки.

Электроснабжение трансформаторов печной подстанции производится от сети 6,10—35 кВ, а для мощных подстанций — 110 кВ. Присоединение измерительных и защитных приборов к проводам высокого напряжения производится через трансформаторы тока и напряжения.

Для поддержания наиболее выгоднейшего 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 мощно-

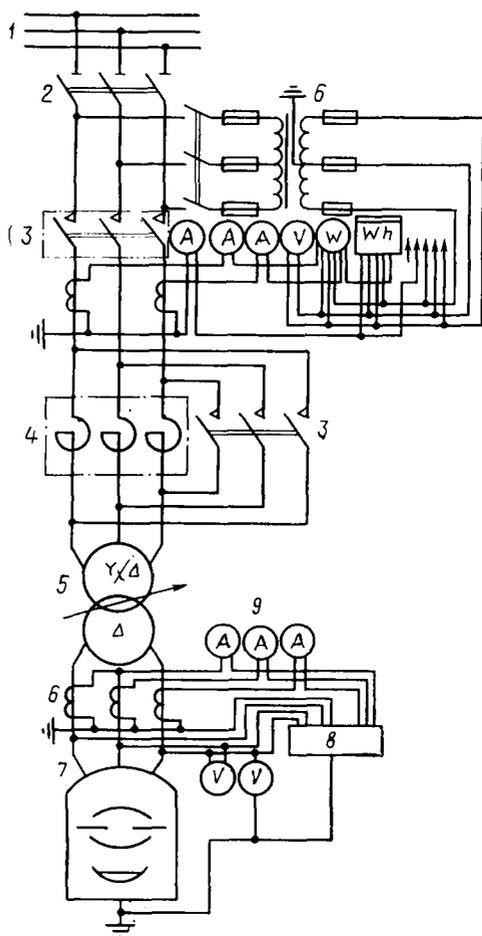


Рис. 6.6. Схема электрических соединений дуговой печной установки:

- 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

сти 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. Печные трансформаторы имеют следующие особенности:

а) высокое значение номинального тока на стороне низкого напряжения (до десятков и сотен килоампер);

б) большой коэффициент трансформации (напряжение с 6,10, 35,0, 110 кВ трансформируется до нескольких сотен вольт);

в) число ступеней напряжения и диапазон его регулирования гораздо больше, чем у силовых трансформаторов (напряжение регулируется примерно на 500 % при числе ступеней до 40 и более);

г) трансформаторы обладают высокой стойкостью против эксплуатационных коротких замыканий с кратностью тока  $(2,5 \div \div 3)I_{\text{ном}}$ , имеют высокую механическую прочность.

Мощные печные трансформаторы оборудованы установками принудительного охлаждения с искусственной циркуляцией масла через теплообменник. Они снабжены регуляторами напряжения под нагрузкой, производящими 100—160 переключений в сутки.

Обмотки трехфазных трансформаторов соединяются по схеме «треугольник — треугольник» с возможностью переключения по схеме «треугольник — звезда», что позволяет регулировать вторичное напряжение.

Регулирование режимов работы печи и ее электрических характеристик осуществляется изменением напряжения за счет изменения числа включенных в сеть витков первичной обмотки трансформаторов с помощью переключателя ступеней.

Переключение ступеней напряжения печных трансформаторов малой и средней мощности осуществляется при снятой нагрузке. Для этого переключатель снабжают блокировкой с главным высоковольтным выключателем. В трансформаторах большой мощности переключение осуществляется под нагрузкой специальным переключателем, установленным на крышке трансформатора. Трансформаторный агрегат включает в себя регулирующий автотрансформатор с обмотками грубой и тонкой регулировки и главный трансформатор с первичной и вторичной обмотками. На первичную обмотку главного трансформатора напряжение сети подается на первой ступени полное, а на остальных ступенях — его определенная доля, которая зависит от положения контактов избирателя переключающего устройства.

Разъединители в схемах электроснабжения дуговых печных установок служат для создания видимого разрыва силовой цепи электропечи. Коммутация цепи разъединителем осуществляется только при отключенном высоковольтном выключателе.

Высоковольтные выключатели совместно с аппаратурой защиты предохраняют печь от токов короткого замыкания и осуществляют оперативное отключение и выключение печи. В существующих пе-

чах применяются масляные многообъемные и воздушные выключатели. Для печных установок напряжением 6 или 10 кВ используются выключатели типа ВМБ-10; для установок напряжением 35 кВ — масляные выключатели типа ВМД-35-600. В последнее время при напряжениях 35 и 110 кВ все чаще применяются воздушные и вакуумные выключатели.

Предусмотрено аварийное отключение печного трансформатора, которое срабатывает при недопустимых токах в первичной обмотке трансформатора, а также при поступлении сигнала от газовой защиты трансформатора или переключателя напряжения.

*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 особенно индуктивное сопротивление является одним из определяющих составных частей общего сопротивления участков печной установки. Они оказывают существенное влияние на энергетические показатели работы печи: мощность, коэффициент мощности, энергетический КПД и т. д.*

Короткая сеть должна иметь минимальную длину и наиболее рациональное расположение проводников для снижения индуктивности, равномерной загрузки фаз и проводников в фазах током (рис. 6.7, а—г).

В короткой сети выделяются четыре основных участка: шинные пакеты (от выходов низкого напряжения печного трансформатора до неподвижных башмаков), гибкая часть (участок гибких кабе-

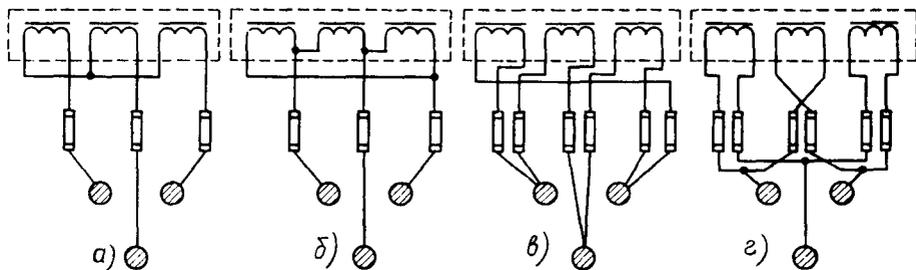


Рис. 6.7. Схемы соединения вторичных токопроводов ДСП

лей), трубошины (от подвижных башмаков до головок электрододержателя), электроды.

В печных дуговых установках необходимы защиты от токов перегрузки и аварийного короткого замыкания. Защиту от перегрузок обычно обеспечивают на стороне низшего напряжения с помощью максимальных реле с зависимой выдержкой времени. Защита от токов аварийного короткого замыкания осуществляется с помощью максимальных реле мгновенного действия на стороне высшего напряжения.

Уставку мгновенных реле выбирают так, чтобы они не реагировали на токи эксплуатационных коротких замыканий  $(2 \div 2,5)I_n$ , поэтому уставку защиты выбирают равной  $5I_n$ . Защита от перегрузки имеет выдержку времени 5—10 с, т. е. включает значительное время работы автоматики, ликвидирующей аварийный режим.

#### **§ 6.4. Рабочие режимы и характеристики электродуговых печей**

Дуговая сталеплавильная печь работает, как правило, круглосуточно с остановками на ремонт и профилактический осмотр. Цикличность работы определяется чередованием плавок с отключением печи для слива металла, заправки и загрузки. Большая единичная мощность печных агрегатов определяет большие расходы электрической энергии, поэтому перед энергетической службой промышленных предприятий и технологами стоят задачи выбора рационального режима работы печи, обеспечивающего, с одной стороны, высокую производительность, а с другой — минимальный расход электроэнергии.

Поскольку лучшие значения этих показателей зачастую не совпадают, установление оптимальных условий эксплуатации дуговой печи основывается на анализе энергетических характеристик. Электрические режимы работы печей характеризуются определенными значениями токов, напряжений, сопротивлений и мощностей. При изменениях длин дуг и их сопротивлений происходят изменения напряжения, причем эти изменения колеблются от нуля (короткое замыкание, длина и сопротивление дуги равны нулю, но нагрузка трансформатора максимальная) до максимума (обрыв дуги, нагрузка трансформатора близка нулю).

В зависимости от силы тока в печи различают следующие режимы работы: а) режим холостого хода (дуги не горят,  $I=0$ ); б) нормальный режим ( $I=I_n$ ); в) режим эксплуатационного замыкания ( $I=I_K$ ).

По периодичности и времени нагрузки принято различать непрерывный режим и режим с нагрузкой, изменяющейся в течение плавки. Производительность печи и расход электроэнергии зависят от мощности дуг, потерь электроэнергии и связаны с рабочим током.

Наиболее полную картину изменения энергетических параметров установки с изменением режима работы печи можно получить при рассмотрении рабочих и электрических характеристик.

Рабочими энергетическими характеристиками печи принято считать зависимость от тока полной активной мощности установки  $P$ ; мощности дуги  $P_d$ ; электрических потерь  $P_э$ ; тепловых потерь  $P_T$ ; электрического КПД  $\eta_э$ ; коэффициента мощности  $\cos \varphi$ ; расхода электроэнергии на плавку  $N$ ; производительности  $g$ ; продолжительности плавки  $\tau$ .

Теоретические расчеты параметров дуговых установок производят на основании их схем замещения. В расчетах отдельные элементы электрической цепи заменены активными и индуктивными сопротивлениями, подобранными таким образом, что при одинаковых напряжениях потребляемые токи и мощности схемы замещения и реальной цепи равны.

В схемах замещения электрические дуги заменяют активными сопротивлениями.

Короткая сеть и электроды в схеме замещения представлены активным  $r$  и индуктивным  $x$  сопротивлениями. Сопротивления проводов цепи высокого напряжения, намагничивающие токи трансформатора и потери холостого хода ввиду их малости не учитываются, печной трансформатор заменяется совокупностью активных и индуктивных сопротивлений.

На рис. 6.8, а представлена схема замещения.

Приведенные сопротивления в схеме замещения рассчитывают следующим образом. *Активное сопротивление первичной обмотки однофазного трансформатора.* Поскольку потери мощности в действительной и приведенной ко вторичной стороне цепи должны быть равны, то

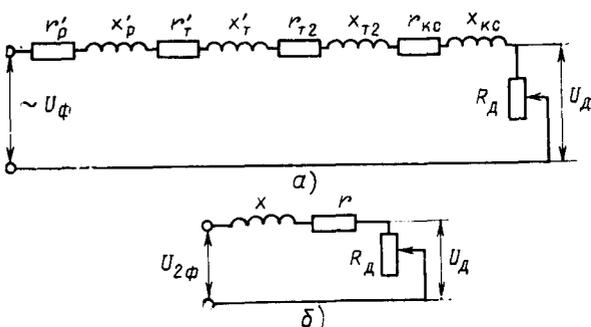


Рис. 6.8. Схема замещения дуговой сталеплавильной печи:

$r_{T2}, x_{T2}$  — активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки трансформатора;  $r_{кc}, x_{кc}$  — сопротивление короткой сети;  $R$  — сопротивление электрической дуги;  $r'_p, x'_p$  — приведенные сопротивления реактора;  $r'_T, x'_T$  — приведенные сопротивления первичной обмотки трансформатора;  $U_\phi$  — фазное напряжение сети;  $U_d$  — напряжение на дуге

$$I_1^2 r_1 = (I_1^1)^2 r'_1 = I_2^2 r'_2, \quad (6.1)$$

откуда

$$r'_1 = (I_1/I_2)^2 r_1 = r_1/k^2, \quad (6.2)$$

так как

$$I_2/I_1 = k.$$

Таким образом, чтобы получить  $r'_1$ , необходимо изменить сопротивление  $r_1$  обратно пропорционально квадрату коэффициента трансформации  $k$ .

*Индуктивное сопротивление первичной обмотки однофазного трансформатора* прямо пропорционально квадрату числа витков обмотки. При постоянной магнитной проницаемости с увеличением числа витков обмотки в  $k$  раз магнитный поток также увеличивается в  $k$  раз и, следовательно,

$$x'_1 = (W_2/W_1)^2 x_1 = 1/(k^2 x_1), \quad (6.3)$$

т. е. для получения  $x'_1$  необходимо  $x_1$  изменить так же, как  $r_1$ , т. е. обратно пропорционально квадрату коэффициента трансформации.

*Сопротивление обмотки реактора*, приведенное ко вторичной стороне,

$$r'_p = r_p/k^2; \quad x'_p = x_p/k^2. \quad (6.4)$$

При расчете сопротивлений в трехфазных цепях необходимо учитывать группы соединений трехфазных трансформаторов.

Полное сопротивление цепи определяется из упрощенной схемы (рис. 6.8, б), полученной после соответствующих преобразований полной схемы.

Приведенный ко вторичной обмотке ток короткого замыкания  $x$  ( $R_d = 0$ )

$$I_2 = U_{2\phi} / \sqrt{r^2 + x^2}.$$

Мощность потерь в трех фазах

$$P_{\text{тп}} = 3I_2^2 r. \quad (6.5)$$

Полезная мощность печи при прохождении тока дуги  $I_2$

$$P_{\text{пол}} = 3I_2^2 R_d = 3U_d I_2. \quad (6.6)$$

Полная мощность цепи

$$P = P_{\text{пол}} + P_{\text{тп}} = 3I_2^2 (R_d + r). \quad (6.7)$$

Электрический КПД

$$\eta_э = P_{\text{пол}}/P. \quad (6.8)$$

Кажущаяся мощность цепи  $S = 3U_2 I_2$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi = P/S$ .

При построении электрических характеристик по перечисленным формулам задаются несколькими значениями тока и рассчитывают для них все величины.

Рабочие характеристики дуговых печей определяют опытным путем при непосредственной нагрузке печи, аналитическим расчетом по формулам, графически по круговым диаграммам.

Аналитический расчет электрических характеристик и рабочих режимов печи производят следующим образом.

Потребляемая активная мощность  $P$  складывается из активной мощности дуг и активных потерь в подводящей сети:

$$P = P_d + P_m,$$

где  $P_d = I^2 R_d$ ;  $P_m = I^2 r$  ( $I$  — полный ток цепи):

$$I = U_\phi / \sqrt{(R_d + r)^2 + x^2}, \quad (6.9)$$

здесь  $R_d$  — активное сопротивление дуги, Ом;  $x$  — индуктивное сопротивление подводящей сети, Ом.

Напряжение на дуге

$$U_d = \sqrt{U_\phi^2 - I^2 x^2} - Ir, \quad (6.10)$$

где  $U_\phi$  — фазное напряжение питающей сети.

Электрический КПД установки

$$\eta_0 = P_d / P = R_d / (R_d + r) = U_d / [I (R_d + r)]. \quad (6.11)$$

Коэффициент мощности установки

$$\cos \varphi = P / S = \frac{R_d + r}{\sqrt{(R_d + r)^2 + x^2}} = \sqrt{1 - (Ix / U_\phi)^2}. \quad (6.12)$$

Ток короткого замыкания установки

$$I_k = U_\phi / \sqrt{r^2 + x^2}. \quad (6.13)$$

По этим формулам определяют параметры, необходимые для построения электрических характеристик печи, при значениях тока от нуля до тока короткого замыкания.

Технологические показатели определяют следующим образом.

Удельный расход электроэнергии

$$N_1 = P / g,$$

где  $g$  — часовая производительность печи:

$$g = P_{\text{под}} / N_1 = (P_d + P_{\text{тп}}) / N_1, \quad (6.14)$$

здесь  $P_{\text{тп}}$  — мощность тепловых потерь;  $N_1$  — теоретическое количество электроэнергии, необходимое для расплавления 1 т стали.

Полный КПД

$$\eta = \eta_0 \eta_T = N_1 / N,$$

где  $N$  — действительное количество электроэнергии, необходимое для расплавления 1 т стали.

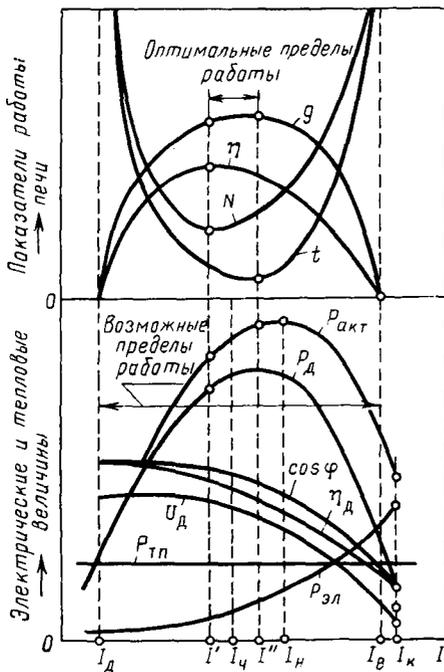


Рис. 6.9. Электрические и рабочие характеристики печи

Электрические характеристики печи и ее технологические показатели приведены на рис. 6.9, из которого следует, что потери в подводящей сети растут пропорционально квадрату тока, а с ростом тока уменьшаются электрический КПД печи и коэффициент мощности. Мощность дуги  $P_d$  и полная активная мощность печи  $P_{акт}$  увеличиваются до максимума и затем снижаются. Удельный расход электроэнергии  $N$  имеет минимум при токе  $I'$ . Этому же значению тока соответствует максимум полного КПД печи. Ток  $I'$  определяет режим минимального удельного расхода электроэнергии. Ток  $I''$  соответствует максимальной мощности дуг и минимальному времени расплавления. Он же определяет режим максимальной производительности. Значения токов  $I'$  и  $I''$  не равны: обычно  $I'' > I'$ .

Оптимальный энергетический режим работы печи устанавливается при токе, меньшем, чем режим максимальной производительности. Таким образом, если предприятие работает в условиях дефицита электроэнергии, решающим является оптимальный энергетический режим, характерный для тока  $I'$ . Если необходима максимальная производительность, то работают при токе  $I''$ .

На основании этого определяют ступени напряжения и уставки токов в различные периоды плавки, что обеспечивает высокие технико-экономические показатели работы печи.

Так, для сверхмощной стотонной печи ДСП-100 И6 рекомендуется следующий энергетический режим:

1. Проплавление колодцев в шихте до удельного расхода  $N = 65$  кВт·ч/т при токе дуги 57 кА, составляющем 51% тока короткого замыкания.

2. Плавление основной массы шихты до удельного расхода энергии  $N = 280 \div 310$  кВт·ч/т при токе 62 кА на второй ступени трансформатора.

3. Подвалка шихты. Проплавление колодцев на режиме по п. 1, затем переход на вторую ступень напряжения и работа на токах

62 кА, до израсходования 300—320 кВт·ч/т для общей массы шихты, находящейся в печи.

4. Переход на третью ступень напряжения и ток в дугах 65 кА до израсходования 380 кВт·ч/т, далее до полного расплавления ванны работа на токе 62 кА.

5. После того как израсходовано 385—400 кВт·ч/т или после окончания режима расплавления шихты в печь вводят удельную мощность (кВт·ч/т):

$$P = 100 + (10 \div 13) dT/d\tau,$$

где  $dT/d\tau$  — желаемая или нормированная скорость нагрева ванны жидкого металла для конкретной марки стали, К/мин.

Ток в дугах в этот период поддерживается на уровне 69—72% тока короткого замыкания соответствующей ступени напряжения.

Себестоимость расплавления 1 т металла

$$C = A + B/g + cN,$$

где  $A$  — величина, не зависящая от тока (стоимость шихты, флюсов и др.);  $B$  — величина, зависящая от производительности (зарплата и т. д.);  $c$  — величина, зависящая от тока.

Ток  $I_c$ , при котором себестоимость плавнения минимальна, больше, чем  $I'$ , но меньше, чем  $I''$ .

Таким образом, рабочие характеристики дуговой печи позволяют проанализировать ее работу, определить оптимальный режим и сделать выводы о правильности эксплуатации применяемого для ее питания электрического оборудования.

### § 6.5. Магнитное перемешивание металла в дуговых сталеплавильных печах

После расплавления большей части шихты перемешивание ванны является эффективным средством ускорения процесса. В последующие периоды перемешивание позволяет выравнять химический состав, ускорить выведение газов и вредных компонентов из расплава.

Жидкий металл в ванне дуговой печи приводится в движение с помощью электромагнитных устройств переменного тока с перемещающимся магнитным полем.

Индукторы электромагнитного перемешивания выполняют в виде цилиндрических или плоских конструкций. Первые охватывают боковую поверхность расплава, вторые располагаются под его донной поверхностью. При расположении статора под дном ванны печи в зависимости от используемой частоты, конструкции статора и направления движения магнитного поля могут быть получены разные схемы движения расплава, эффективные для разных периодов плавки. Скорость движения расплава зависит от тока индуктора и составляет 0,2—1 м/с. Возможность магнитного переме-

шивания достигается только при низких частотах питающего тока, зависящих от глубины ванны расплава. Глубина расплава в печах разных типов приведена в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Марка печи	Диаметр зеркала, м	Глубина, м	Марка печи	Диаметр, м	Глубина, м
ДСП-5 МТ	2,4	0,33	ДСП-50	5,05	0,995
ДСП-12	3,4	0,555	ДСП-100	5,16	1,08
ДСП-12	4,0	0,775	ДСП-200	6,96	1,48

При таких параметрах жидкой ванны ее эффективное перемешивание имеет место при частотах 0,4—1,0 Гц.

Промышленные установки электромагнитного перемешивания состоят из трех компонентов: индуктора, источника питания и системы охлаждения. Данные некоторых индукторов приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Параметры статора	Емкость печи, т			
	25	50	100	200
Тип статора	СЭП-25	СЭП-50	СЭП-100	СЭП-200
Номинальная частота, Гц	0,9	0,65	0,5	0,4
Мощность фазы, кВ·А	575	550	860	525
Сила тока, кА	2,5	2,4	2,4	2,0
Напряжение фазы, В	115	115	180	130
Коэффициент мощности	0,5	0,59	0,58	0,6

Ввиду больших значений немагнитной прослойки в системе статор — металл, созданного огнеупорной футеровкой пода (60—120 см), линейная нагрузка статора составляет 100,0—150,0 кА/м.

В качестве источников питания статоров используют электромагнитные преобразовательные агрегаты и тиристорные преобразователи частоты. Охлаждение статора производится водой, если он изготовлен из медной трубки, или воздухом, по специальным каналам внутри обмотки. Стоимость установки ЭМП составляет 30—100 % стоимости печи, а расход энергии в ней на 1 т выплавленной стали всего лишь 3—5 % полного расхода энергии.

**Автоматизация управления электрическим режимом ДСП.** Задачами автоматизации установки являются следующие: 1) поддержание мощности печи на уровне, определяемом программой; 2) регулирование напряжения трансформатора; 3) быстрое устранение всех отклонений от нормального режима.

Поставленные задачи решаются с помощью автоматических регуляторов мощности, снабженных программно-управляющими уст-

ройствами. Эти системы обеспечивают минимальную продолжительность плавки, оптимальное значение питающего напряжения для получения наименьшего расхода энергии на выплавку 1 т металла, рациональное распределение энергии между фазами — электродами печи, управление компенсацией реактивной энергии, поддержание температуры и химического состава металла в заданных пределах.

Регуляторы снабжаются датчиками контролируемых величин, усилителями сигналов информации, исполнительными устройствами и приводами.

Перспективным направлением автоматизации ДСП является создание АСУ цеха дуговых печей и предприятия в целом.

### § 6.6. Дуговые сталеплавильные печи в системе электроснабжения

Как потребители электрической энергии ДСП относятся ко второй категории по надежности электроснабжения, характеризуются высокой единичной мощностью 0,4—80 МВ·А, имеют коэффициент мощности от 0,85—0,89 (ДСП-5) до 0,7 (ДСП-200), круглосуточный резкопеременный циклический режим работы. Рабочий элемент ДСП — электрическая дуга — является нелинейным активным сопротивлением, параметры ее сильно зависят от условий горения. Регулирование мощности дуги производится индуктивными элементами питающей сети, изменением подводимого напряжения и длины дуги. В период расплавления печь работает с максимальной мощностью и расходует 50—80% всей потребляемой на плавку энергии. Мгновенная мощность колеблется вокруг определенного среднего значения, задаваемого автоматическим регулятором. Колебания реактивной мощности достигают 200% со скоростью до 500 мвар/с и значительно превышают колебания активной мощности. В этот период происходят частые эксплуатационные короткие замыкания за счет замыкания электродов обваливающейся шихтой или жидким металлом. В осциллограмме тока наблюдаются несинусоидальность, броски тока разной амплитуды и продолжительности, носящие случайный характер высшие гармоники.

Индивидуальные графики печи имеют большую неравномерность, объясняемую технологическими снижениями мощности и отключениями печи. Здесь же наблюдается статическая и динамическая несимметрия нагрузки фаз, достигающие 10% колебания токов, вызывающие колебания напряжения в питающей сети, отрицательно влияющие на работу других потребителей — ЭВМ, телевизоров, освещения и др. Для уменьшения вредного влияния ДСП на работу электрической сети применяются организационно-технические мероприятия технологического и электроэнергетического характера: автоматическое регулирование тока и компенса-

ция реактивной мощности, уменьшение колебания напряжения по фазам, фильтрация высших гармоник.

К технологическим мероприятиям следует отнести: сортировку и подготовку скрапа, равномерную его загрузку, использование качественных электродов; использование вместе со скрапом обогащенной и частично восстановленной железной руды в виде окатышей.

Со стороны питающей сети в соответствии с требованиями ГОСТ 13109—67 на качество электроэнергии должны быть приняты следующие меры: применение повышенного напряжения 110—220 кВ; применение глубоких вводов ЛЭП на территорию промышленных предприятий; подключение печи в точке с большой мощностью короткого замыкания.

Применяемые схемные решения для питания индивидуальных печей и цехов предусматривают связь с другими потребителями лишь на напряжении 110—220 кВ.

### § 6.7. Энергетический баланс дуговой сталеплавильной печи

Для повышения экономичности работы ДСП, разработки и реализации мероприятий по экономии электроэнергии и вторичных энергетических ресурсов составляют энергетический баланс — учет прихода и расхода энергии.

Полный приход энергии  $Q_1$  состоит из следующих частей:

1. Теплота  $Q'_1$ , вводимая в печь электроэнергией и соответствующая мощности дуг без мощности, выделяемой участками электродов, находящимися в объеме печи. При плавке без применения кислорода значение  $Q'_1$  достигает  $(0,8 \div 0,9) Q_1$ , при введении кислорода  $Q'_1 = (0,45 \div 0,55) Q_1$ .

2. Теплота  $Q'_2$ , вносимая в печь с шихтой, и физическая теплота кислорода. Для ее измерения необходимо знать массу и температуру всех порций шихты и вводимого кислорода. Значение  $Q'_2$  может быть весьма большим, если применяется подогрев всех поступлений в печь отходящими газами и газовыми горелками. Экспериментальные плавки показали, что удельный расход электроэнергии при этом сокращается на 60—80 кВт·ч/т.

3. Теплота экзотермических реакций  $Q'_3$ , определяемая термодинамическим расчетом процесса.

4. Теплота  $Q'_4$  от сгорания электродов. При известной массе электродов, израсходованной на плавку  $\Delta M_9$ , считают, что 40—50% углерода в реакции горения не участвует. Тогда  $Q'_4 = (4,7 \div 5,6) \times \Delta M_9$  кВт·ч.

5. Теплота  $Q'_5$ , вводимая в печь газокислородными горелками, определяемая теплотехническим расчетом и дающая до 20% экономии электроэнергии.

6. Теплота  $Q'_6$ , выделяющаяся в электродах, на участках в объеме печи длиной  $l$ , при известной площади поперечного сечения  $F_3$  и среднего удельного электрического сопротивления  $\rho_3$  материала электрода:

$$Q'_6 = 3I_3^2 \rho_3 \frac{l}{F_3}.$$

Расход энергии состоит из следующих частей.

1. Теплота  $Q''_1$  сливаемых металла и шлака.  
 2. Теплота  $Q''_2$ , поглощаемая металлом при эндотермических реакциях.

3. Тепловые потери  $Q'_3$ . Из них наиболее значительны следующие:

а) потери теплоты через футеровку; б) потери излучением и конвекцией через открытое рабочее окно и в период открытия свода; в) потери теплоты с водой, охлаждающей элементы конструкции печи; г) потери теплоты с отходящими газами. Их доля может быть велика и использована для предварительного подогрева шихты и скрапа. Общие потери могут составлять до 20—35% и более.

Тепловой КПД печи

$$\eta = \frac{Q''_1 + Q''_2 - Q'_2}{Q'_1 + Q'_3 + Q'_4 + Q'_5}.$$

Электрический баланс печной установки выражается формулой  $Q_{\text{акт}} = Q'_1 + Q'_6 + Q''_4$ , где  $Q''_4$  — потери активной энергии в электрооборудовании,  $Q_{\text{акт}}$  — активная энергия, потребляемая печной установкой от сети высокого напряжения.

Электрический КПД установки

$$\eta_{\text{эл}} = (Q'_1 + Q'_6) / Q_{\text{акт}}.$$

Электрические потери составляют 8—15%, при этом  $\eta_{\text{эл}} = 92 \div 85\%$ .

Анализ рабочих характеристик, энергетических и электрических балансов позволяет повысить технико-экономические показатели ДСП.

## § 6.8. Рудно-термические печи

Рудно-термические печи (РТП) являются основными технологическими агрегатами в металлургии и химии, обладающими высокой единичной мощностью и относящимися ко второй категории по надежности электроснабжения. В РТП нагрев перерабатываемых материалов производится за счет теплоты, возникающей при протекании тока по электродам, шихте, электрической дуге и расплавленному материалу.

Номенклатура продуктов, получаемых в РТП, весьма широка: они могут выпускаться из печи в виде пара или газа, жидкости-расплава, твердого тела, извлекаемого целым слитком.

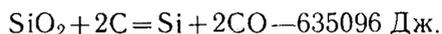
РТП в металлургии черных металлов применяются для получения ферросплавов — сплавов железа с кремнием, марганцем, хромом, вольфрамом и др.

Сырьем для получения ферросплавов служат руды или концентраты. При производстве основных сплавов — ферросилиция, ферромарганца и феррохрома — пользуются рудами с большим содержанием металла.

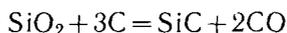
При производстве ферровольфрама, ферромолибдена, феррованадия, ферротитана и т. п. руду вследствие малого содержания в ней полезного компонента обогащают, получая концентрат с высоким содержанием оксидов основного элемента.

Ферросплавы получают восстановлением оксидов соответствующих металлов, используя восстановители — углерод, кремний и алюминий. Реакции восстановления углеродом требуют подвода большой теплоты.

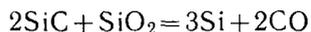
Для производства ферросилиция кремний восстанавливают с помощью твердого углерода:



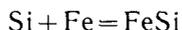
При избытке восстановителя в отдельных частях печи образуется карбид кремния:



который в дальнейшем разрушается:

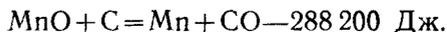


а в присутствии железа получается ферросилиций

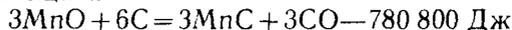


Сплав выпускают 12—15 раз в сутки в ковши и разливают в слитки.

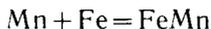
При производстве ферромарганца компонентами являются марганцевые руды, содержащие  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  и  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ , коксик и стальная стружка. На последней стадии процесс идет по реакции



Совместно с реакцией



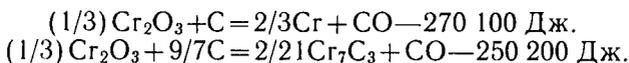
и далее



Образующиеся шлак и металл выпускают из печи через 1—1,5 ч. При выплавке 1 т углеродистого ферромарганца расходуется 2600—2700 кВт·ч электроэнергии. При производстве феррохрома

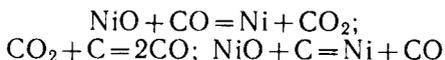
используются хромитовые руды, содержащие 62%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и коксик.

Один из вариантов процесса протекает по следующей реакции:

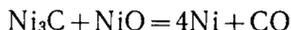


Сплав восстановленного железа с хромом и шлак выпускают из печи три раза в смену в ковш, где происходит их разделение, затем феррохром разливают в слитки. На 1 т феррохрома расходуется 3500—3600 кВт·ч электроэнергии. Полученные слитки ферросплавов добавляют в ДСП при выплавке качественных сталей.

В цветной металлургии в электропечах производится плавка медных концентратов, восстановительная плавка закиси никеля. В качестве восстановителя используются древесный уголь, кокс или каменноугольный коксик. Процесс идет по реакциям:



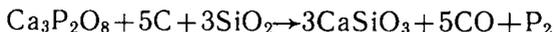
Образующийся попутно карбид никеля  $\text{Ni}_3\text{C}$  выводится по реакции



Процесс плавки — периодический, продолжительностью 5—7 ч. На производство 1 т никеля расходуется 1100—1200 кВт·ч электроэнергии, 16—18 кг электродов.

РТП в электротехнологии химических производств используются при проведении следующих процессов.

Получение фосфора на основе реакции

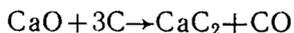


На это расходуется около 40% энергии, потребляемой печью.

Сырьем фосфорного производства являются фосфоритовые руды, содержащиеся в бассейне Каратау — главной сырьевой базе фосфорной промышленности нашей страны.

Основная часть (90%) полученного фосфора расходуется на производство фосфорной кислоты, которая, в свою очередь, служит сырьем для производства кормовых и пищевых фосфатов, моющих средств.

Получение карбида кальция для последующего использования в литейном производстве, а также в производстве ацетилена, используемого в технологии синтетического каучука, пластмасс, химического волокна, основано на реакции



В качестве сырья применяют известь и кокс или антрацит. На производство 1 т карбида кальция расходуется от 2500 (мощные печи) до 4000 кВт·ч (печи малой мощности) электроэнергии. По-

лучаемые в РТП абразивные материалы — электрокорунд с удельным расходом энергии 2500—2900 кВт·ч/т, электрокорунд белый с удельным расходом энергии 1365—1620 кВт·ч/т и другие типы электрокорундов используются для изготовления абразивного инструмента и порошков.

Значительное место в сфере использования РТП занимает получение электроплавленных огнеупоров, идущих на футеровку стекловаренных печей, металлургических агрегатов. Сырьем здесь являются глинозем, циркон и кварцевый песок. Получаемые методом плавки открытой дугой огнеупоры — корунд и бакор разных марок в печах ОКБ-2130, ДС-0,5 имеют высокую чистоту, плотность.

Удельный расход электроэнергии при их получении находится в пределах 1800—2300 кВт·ч на тонну. Здесь перечислены только основные наиболее массовые и энергоемкие производства, тогда как перечень других процессов, осуществляемых в дуговых печах сопротивления, значительно шире и включает производство графита, сероуглерода и многих других веществ.

Общими признаками РТП являются:

1. Удельное электрическое сопротивление шихты сильно меняется при повышении температуры. В холодном состоянии она не электропроводна, в расплавленном она представляет собой ионный раствор, проводимость которого также зависит от температуры и вещественного состава. Объем расплава и шихты, участвующих в проведении тока, меняется при изменении температуры. Это определяет возможность параллельного существования проводников разного рода — нелинейного активного сопротивления шихты и расплава и электрической дуги.

2. Температура преобразования шихты составляет 1200—2200 К, что определяет высокие удельные расходы электроэнергии на выпуск единицы продукции и наличие мощного энергетического хозяйства.

3. Непрерывный режим работы в течение 1—2 лет.

4. Электрический режим работы относительно спокоен (в отличие от ДСП): толчки тока и эксплуатационные короткие замыкания отсутствуют.

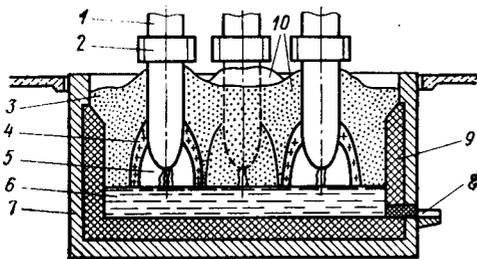


Рис. 6.10. Схема печи для бесшлакового и малошлакового процесса

Разнообразие конструкций РТП вызвано многообразием и сложностью химического состава перерабатываемого сырья, а также большим ассортиментом производимой продукции. Представляется целесообразным выделить пять основных типов процессов и схем печей.

1. Бесшлаковые или малошлаковые (рис. 6.10) —

получение ферросплавов, карбида кальция.

В рабочем пространстве трехфазной неподвижной печи находятся электроды 1, удерживаемые электроподдержателями 2, погруженные в шихту 3. Дуги горят с торцов электродов на расплав в газовой полости 5, образованной спеченной шихтой 4, в так называемом «тигле». По мере оплавления стенок «тигла» увеличивается глубина ванны 6 и происходит оседание шихты. Загрузка шихты производится вокруг электродов, где образуются конические уплотнения 10, предотвращающие прорыв газов.

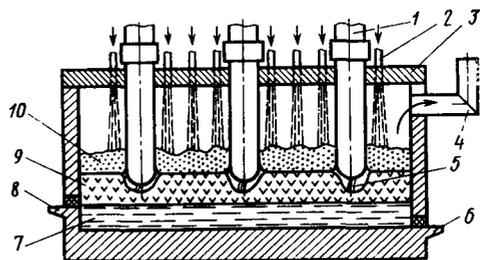


Рис. 6.11. Схема печи для многошлакового процесса

Стенки шахты печи 9 и ее подину 7 изготовляют из угольных блоков. Слив металла производят через летку 8, пробиваемую по мере накопления расплава.

2. Многошлаковые процессы (рис. 6.11) — получение фосфора и др. РТП для этих процессов неподвижные с тремя или шестью электродами круглой или прямоугольной формы с выпуском через отдельные летки металла 6 и шлака 8. На поверхности расплава находится слой шлака. Ток проходит по электродам 1 через дуги 5, шлак 9 и расплав 7.

Загрузку шихты 10 производят через устройства 2 в своде 3, герметизирующем рабочее пространство. Образующиеся газы удаляются через вытяжку 4.

3. Рафинировочные печи имеют подобную структуру рабочего пространства и отличаются периодичностью работы: загрузка — слив при наклоне печи.

4. Блок-процессы — получение электрокорунда, ферровольфрама. Ввиду высокой температуры расплава вылить его из печи не представляется возможным, он застывает на небольшой глубине и по мере подсыпки шихты и ее расплавления дугой происходит наращивание слитка. После заполнения ванну откатывают, остужают и блок извлекают для последующей разделки, дробления, резки алмазными пилами.

5. Выплавку огнеупоров целесообразно вести открытой дугой с постепенной подсыпкой шихты. С целью уменьшения науглероживания расплава необходимо выдерживать определенную длину дуги, покрывать боковую поверхность электродов обмазками, предотвращающими их осыпание в расплав и обгорание. Слив расплава производится периодически по мере наполнения печи.

В РТП применяются электроды трех видов, угольные, диаметром до 1200—1400 мм, графитизированные диаметром до 800 мм

и самоспекающиеся диаметром до 2000 мм или прямоугольные размером 3200×850 мм. Самоспекающиеся электроды представляют собой круглый или прямоугольный кожух из стали толщиной 1,5—5 мм, заполняемый сверху пастообразной электродной массой. При входе в печь под действием тока и теплоты печи электродная масса спекается и допускает плотность тока до 7,6 А/см<sup>2</sup>. По мере сгорания кожух электрода наращивается и заполняется массой, что обеспечивает непрерывную работу печи. Удельное электрическое сопротивление самоспекающихся электродов в 2—3 раза выше, чем у угольных, и в 5—10 раз выше, чем у графитизированных. Сопротивление нагрузки РТП значительно ниже, чем

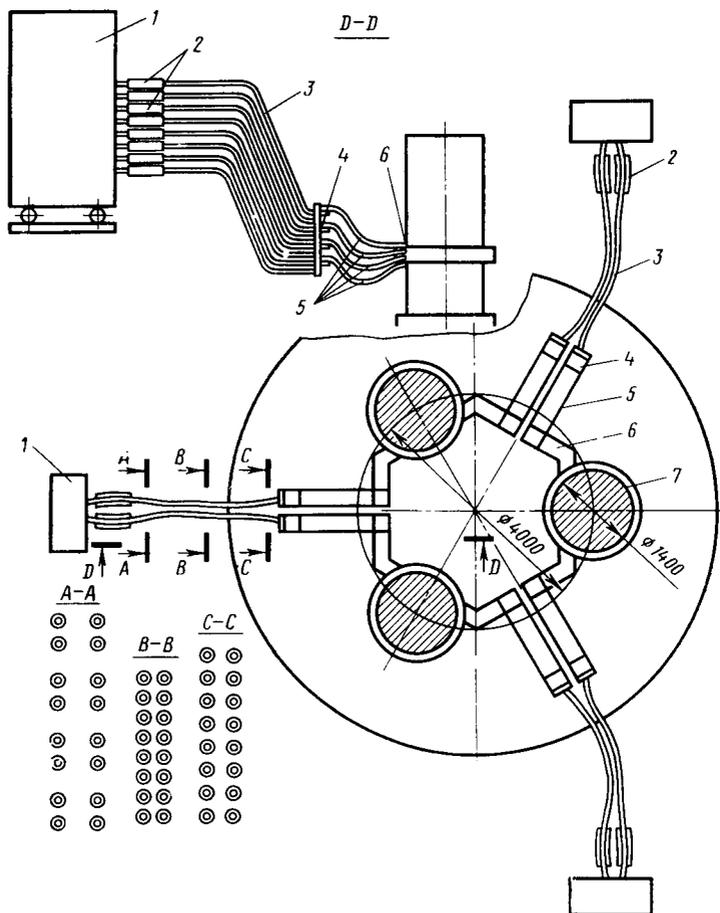


Рис. 6.12. Схема короткой сети рудно-термической печи:  
 1 — трансформатор; 2 — гибкие компенсаторы; 3 — пакет грубчатых шин; 4 — неподвижный башмак; 5 — гибкие ленты; 6 — подвижный башмак; 7 — электроды

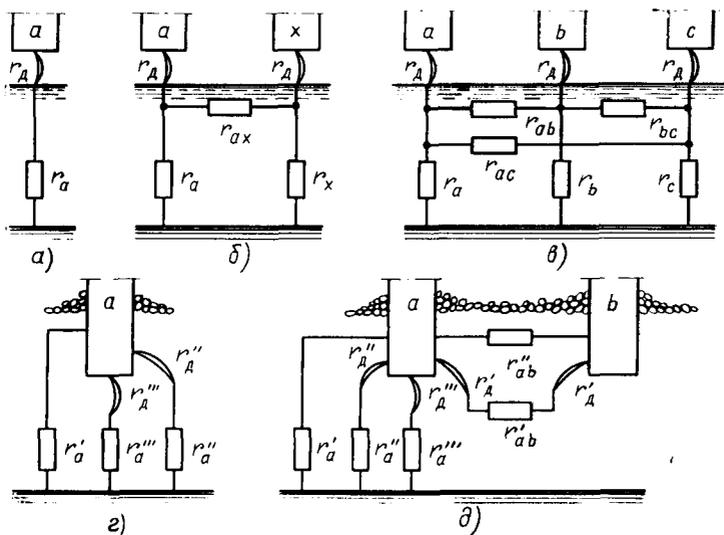


Рис. 6.13. Схемы замещения печей

у ДСП, поэтому вторичное напряжение печных трансформаторов ниже, а токи при тех же мощностях в 1,5—2 раза больше. Это приводит к тому, что короткая сеть РТП более мощная и сложная.

В ней применяются меры по обеспечению симметричности загрузки фаз, снижению активного и индуктивного сопротивлений.

На рис. 6.12 показана короткая сеть рудно-термической печи РКЗ-48Ф. Охлаждение трубчатого пакета шин производится водой, протекающей внутри токоведущих труб. Конфигурация короткой сети выполнена так, чтобы проводники с противоположным направлением тока были расположены как можно ближе друг к другу. Это снижает величины реактивных сопротивлений и падений напряжений в короткой сети.

Наиболее мощные РТП с прямоугольной ванной имеют шесть электродов, расположенных в линию, и питаются либо двумя трехфазными, либо тремя однофазными трансформаторами. В этом случае каждый трансформатор питает два соседних электрода.

Электрические характеристики РТП определяются особенностями распределения тока в рабочем пространстве печи и соответствующей этому схемой электрического питания.

Ввиду сложности электромагнитных взаимодействий составляются упрощенные схемы замещения печей, варианты которых представлены на рис. 6.13, а—д.

После соответствующих преобразований определяются сопротивления ванны:

$$r_b = 2r_d + \frac{2r_a + r_{ax}}{2r_a + r_{ax}},$$

$$r_{вф} = r_0 + \frac{r_{ва} r_{са}}{r_{ва} + r_{са} + r_a (r_{ва} + r_{вс} + r_{ас})}.$$

Для круглой ванны с симметричным расположением электродов, если  $r_{ав} = r_{ас} = r_{вс} = r_L$ , то

$$r_{вф} = r_d + \frac{r_a r_L}{3r_a + r_L}.$$

Значительно сложнее расчеты процессов с закрытыми дугами. В этом случае сопротивление ванны

$$r_b = \frac{r'_a (r''_d + r''_a) (r'_d + r'''_a)}{r'_a (r''_d + r''_a) + r'_a (r'''_d + r'''_a) + (r''_d + r''_a) (r'_d + r'''_a)}.$$

Для ванны, показанной на рис. 6.13 в трехфазном исполнении,

$$r_b = \frac{r r_{ав}}{3r_a + r_{ав}}, \text{ где } r_{ав} = \frac{(2r'_d + r'_{ав}) r'_{ав}}{2r'_d + r'_{ав} + r''_{ав}}.$$

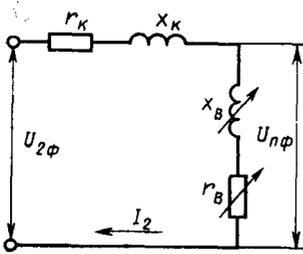


Рис. 6.14. Схема замещения симметричной печной установки

Экспериментально определенное сопротивление ванны между электродом и подиной печи  $r_b = U_{2\phi} / I_{2\phi}$ . Измерения на действующих РТП показывают, что связь напряжения печи с током, как правило, линейная и подчиняется закону Ома. Схема замещения симметричной печной установки показана на рис. 6.14 и составлена с теми же допущениями, что и для ДСП.

При расчете используют следующие формулы:

$$S_\phi = U_{2\phi} I_2; P_{аф} = S_\phi \cos \varphi = I_2^2 (r_K + r_b);$$

$$P_{эф} = I_2^2 r_K; P_{пф} = I_2^2 r_b = P_{аф} - P_{эф};$$

$$\cos \varphi = P_{аф} / S_\phi = r_K + r_b / \sqrt{(r_K + r_b)^2 + (X_K + X_B)^2} = I_2 (r_K + r_b) / U_{2\phi};$$

$$\eta_{эл} = P_{пф} / P_{аф} = r_b / (r_b + r_K);$$

$$U_{пф} = I_2 \sqrt{X_B^2 + r_b^2} \approx I_2 r_b.$$

Мощность всей печи получают, утраивая мощности фаз.

Для несимметричных печных установок, особенно для крупных РТП с прямоугольными ваннами, электрические характеристики строят для каждой фазы.

Таблица 6.4

Тип печи	Номинальная мощность трансформатора $P_{ном}$ , МВ·А	Максимальный ток электрода $I_{max}$ , кА	Вторичное напряжение $U$ , В
РКО-2,5Н2	2,5	13	178—89
6РКЗ-2,5Фс	2,5	8,1	308—154
РКО-3,5 НОЗ	3,5	7,1	371—260
СКБ-6002А1	3,6	18	421—193
РКЗ-16, 4Н08	16,5 (3×5,5)	60	204—130
РПЗ-3ЗШ-Н02	33 (3×11)	25,8	800—475
РПЗ-482	63 (3×21)	112	238—137
РПО-60	60	103	257
РКЗ-72Ф-М1	72 (3×24)	92,5	649—149

Первичное напряжение печных трансформаторов составляет 6, 10 или 35 кВ. Энергетические характеристики некоторых печей приведены в табл. 6.4.

При оценке энергетического баланса печи следует учитывать, что значительные потери энергии связаны с отходящими газами печи, которые при улавливании представляют ценные вторичные энергоресурсы. Наибольшие электрические потери (60—65%) приходятся на короткую сеть.

Для повышения коэффициента мощности печные установки снабжаются автоматически управляемыми компенсирующими устройствами.

Мощные РТП отечественного производства оснащены установками продольно-емкостной компенсации реактивной мощности, печи зарубежного производства имеют установки поперечной компенсации реактивной мощности.

При выборе мощности компенсирующих устройств учитывают возможность использования РТП в качестве регуляторов нагрузки энергосистем при одновременном снижении в час «пик» активной и реактивной мощности.

## Глава 7

### ВАКУУМНЫЕ ДУГОВЫЕ ПЕЧИ

#### § 7.1. Области применения и устройство вакуумных дуговых печей

Для повышения качества металла, полученного в других установках (например, в ДСП), его переплавляют при низком давлении в вакуумных дуговых печах (ВДП), в результате чего в металле уменьшается содержание вредных примесей и растворенных газов. ВДП применяют в основном для выплавки слитков высоко-

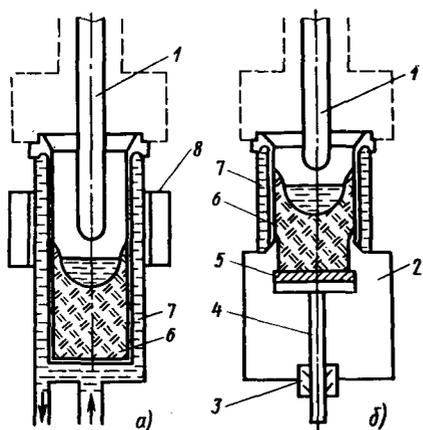


Рис. 7.1. Схема ВДП с глухим кристаллизатором (а) и с вытягиванием слитка (б):

1 — электрод; 2 — холодильник; 3 — вакуумное уплотнение штока; 4 — тянущий шток; 5 — поддон; 6 — слиток; 7 — кристаллизатор; 8 — соленоид

реакционных металлов (титана, ниобия, вольфрама, циркония, тантала, молибдена), а также для переплава специальных высококачественных сталей, в результате чего они не только очищаются, но и приобретают более плотную структуру. Рабочее давление в камере печи может составлять 1,0—0,001 Па в зависимости от требований к получаемому металлу. С помощью современных ВДП получают слитки массой от нескольких сотен килограммов до 50—60 т.

В качестве материалов электродов в ВДП используются различные продукты металлургического передела. Так, при плавке титана круглые электроды изготовляют прессовани-

ем титановой губки. При переплавке вольфрама, молибдена и ниобия электроды изготовляют из штабиков путем стыковой сварки и сборки электродов-пакетов. При переплавке сталей в качестве электродов применяют прокат или специальные штанги, полученные методом непрерывной разливки иликовки. В некоторых установках применяют нерасходуемые электроды, а переплавляемый металл кусками подается в кристаллизатор. Каждый из этих способов, в свою очередь, может быть осуществлен по двум схемам: плавка в глухой кристаллизатор (рис. 7.1, а) и плавка с вытягиванием слитка (рис. 7.1, б).

Основной частью печи является рабочая камера, к которой присоединена вакуумная система. Электрод 1 подвешен к подвижному штоку. Шток проходит через вакуумное уплотнение, расположенное в верхней части камеры. К нижней части рабочей камеры присоединяется водоохлаждаемый кристаллизатор 7 с рубашкой водяного охлаждения. К электроду подается отрицательный, а к кристаллизатору положительный полюс источника питания. В печи, работающей по схеме с вытягиваемым слитком (рис. 7.1, б), имеется проходящий через вакуумное уплотнение 3 шток 4 для вытягивания слитка. Металл наплавляется на поддон 5 и по мере роста слитка 6 опускается вниз. Процесс вакуумной плавки начинается с создания вакуума в рабочей камере печи и опускания электрода до крайнего нижнего положения. После короткого замыкания или пробоя межэлектродного промежутка возникает

дуга. Под действием выделяющейся теплоты электрод расплавляется и металл небольшими каплями перетекает на слиток.

Объем кристаллизатора и размеры электрода, как правило, согласованы. В конце плавки весь электрод переходит в расплав, а испаряющиеся примеси и газы откачиваются вакуумной системой. Такая печь называется печью с расходуемым электродом.

В практике широко применяются ВДП с расходуемыми электродами, поскольку при работе с нерасходуемыми есть опасность загрязнения переплавляемого металла материалом электрода.

**Основные элементы печи.** К ним относятся: рабочая камера, шток-электрододержатель, расходуемые электроды, кристаллизатор, поддон, соленоид.

*Рабочая камера* представляет собой водоохлаждаемую сварную конструкцию цилиндрической формы. В верхней части рабочей камеры установлены подсветы и смотровые окна, позволяющие наблюдать за горением дуги и наплавлением слитка. Для дистанционного наблюдения за ходом процесса к гляделкам пристраиваются специальные перископы, проектирующие изображение рабочей зоны на экран. К нижнему фланцу камеры прикреплен кристаллизатор.

*Шток* — электрододержатель служит для закрепления и перемещения расходуемого электрода и подвода к нему тока. Он состоит из нескольких коаксиально расположенных труб, причем медная наружная труба является токоведущей. Внутренние стальные трубы обеспечивают механическую прочность конструкции штока. Между трубами имеются полости для прохода охлаждающей воды.

*Расходуемые электроды* могут быть прикреплены к штоку различными способами. Они могут быть приварены к огарку, который крепят к хвостовику штока с помощью резьбы, могут удерживаться с помощью специального клиновидного или цангового зажима. Перемещение штока и расходуемого электрода обеспечивается электрическим или гидравлическим приводом.

*Кристаллизатор* состоит из внутренней гильзы и наружного стального немагнитного кожуха. Между ними имеется полость для охлаждающей воды. Гильзу изготавливают из материала с хорошей теплопроводностью, не смачивающегося жидким металлом.

*Поддон* закрывает низ кристаллизатора, входит внутрь или примыкает к торцу его гильзы. Основа поддона — массивный медный диск, снабженный стальной рубашкой водяного охлаждения. Для предотвращения возможного прожога медного диска электрической дугой в начале плавки на него укладывают темплет из переплавляемого металла толщиной 50—100 мм.

Соленоид устанавливают на боковой поверхности кристаллизатора. Он создает аксиальное с током магнитное поле. Взаимодействие поля соленоида с током дуги и током, растекающимся в ванне расплавленного металла, приводит к повышению напряжения на дуге (для стали с 19—20,5 до 24—25 В), предотвращает

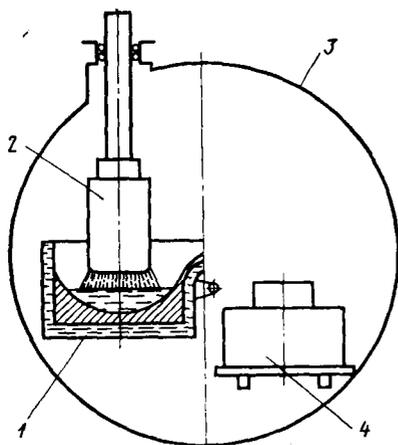


Рис. 7.2. Схема вакуумной дуговой печи для фасонного литья: 1 — тигель; 2 — электрод; 3 — камера; 4 — форма

чающий тигель 1, и электрод 2. Расплавленный металл сливается в форму 4.

### § 7.2. Особенности дугового разряда в вакуумной дуговой печи

Особые свойства дугового разряда в ВДП обусловлены тем, что электродная система образуется концентрически расположенными стержневым электродом и кристаллизатором. При этом электрическая дуга горит в парах переплавляемого металла при низком давлении в камере ВДП в присутствии осевого магнитного поля.

Плавка с электродом-катодом называется плавкой с дугой прямой полярности, а с электродом-анодом — с дугой обратной полярности.

В зависимости от давления в рабочей камере в ВДП наблюдаются три формы дугового разряда.

1. Диффузный, при давлении 0,0133—13,3 Па, представляющий собой слабосветящийся столб, распределенный по всему электроду.

2. Отшнурованный разряд при давлении более 133 Па, представляющий собой яркосветящийся столб небольшого диаметра.

3. Разряд переходной формы, наблюдающийся при давлении 13,3—2660 Па. Такой разряд имеет признаки диффузного разряда но занимающего лишь часть торца электрода.

Разряд неустойчив и быстро перемещается в пространстве. Длину дуги, т. е. расстояние между электродами, выбирают такой

переброски дуги на стенку кристаллизатора, стабилизирует дугу. При этом возникает вращение жидкого металла в ванне, что улучшает структуру переплавляемого металла. Питание соленоида производится от полупроводниковых выпрямителей, позволяющих при необходимости производить резкое увеличение и реверсирование тока намагничивания.

Для литья в вакууме существуют специальные вакуумные дуговые печи, которые подразделяют на две группы: печи с разливкой при горячей дуге и печи с разливкой после отключения дуги.

Такая печь (рис. 7.2) состоит из камеры 3, в которой размещены соответственно плавильный агрегат, включающий тигель 1, и электрод 2.

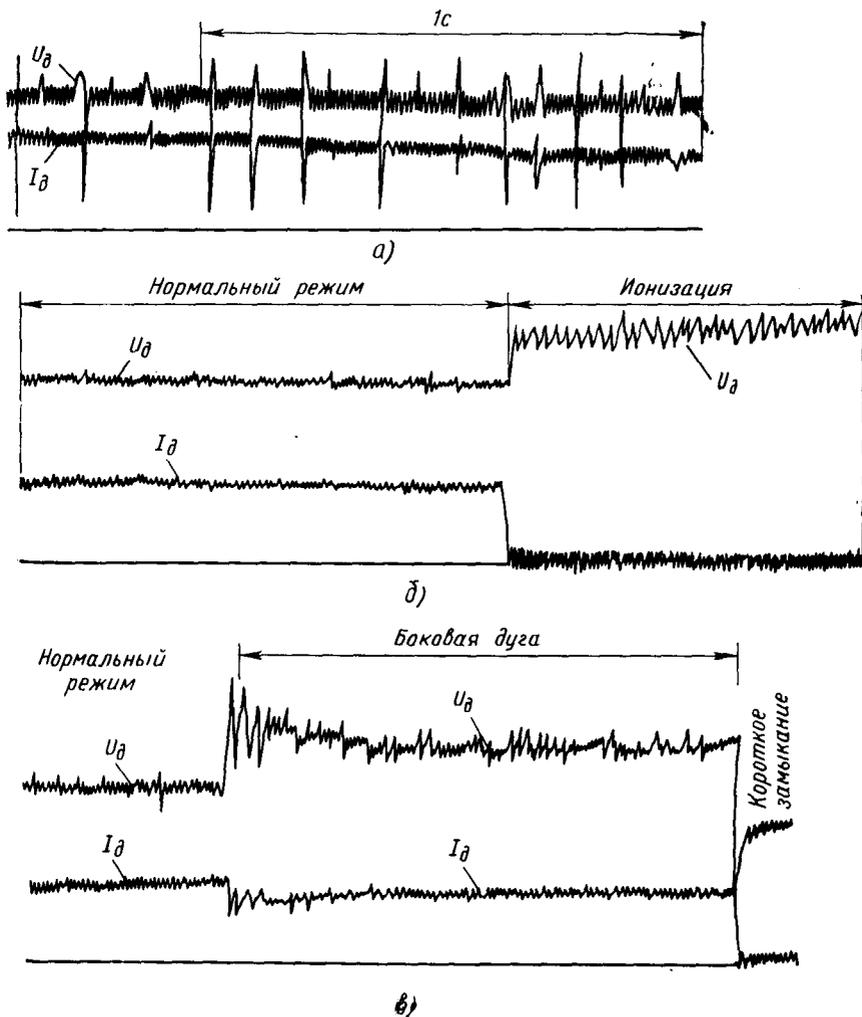


Рис. 7.3. Осциллограммы тока и напряжения дуги в ВДП при различных режимах работы

при которой ток проходил бы через ванну, а утечка электронов на стенку кристаллизатора была минимальной. Такие условия создаются, если зазор между электродом и боковой стенкой камеры больше расстояния между электродом и поверхностью ванны расплава. Следовательно, ВДП необходимо работать при коротких дугах. В действующих печах при этом режиме длина дуги составляет около 30—50 мм.

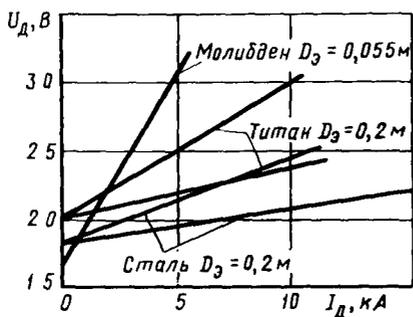


Рис. 7.4. Вольт-амперные характеристики плавящей дуги ВДП

Осциллограммы тока и напряжения дуги показаны на рис. 7.3. Колебания тока и напряжения находятся в противофазе.

При слишком короткой дуге капли, стекающие с расходоуемого электрода, начинают замыкать дуговой промежуток. Вследствие сильного тепловыделения мостик взрывообразно испаряется. На осциллограмме наблюдаются кратковременные броски тока и напряжения

(рис. 7.3, а). Такой режим не соответствует рабочему. Его прекращают разведением электродов, при этом расстояние между торцом расходоуемого электрода и зеркалом ванны расплава должно быть больше длины капли.

При увеличении длины дугового промежутка или при повышении давления в рабочей камере резко уменьшается концентрация паров металла. Катодное пятно в этом случае переходит с торца электрода на его боковую поверхность и быстро (со скоростью до 50 м/с) устремляется вверх по электроду. Длина дуги увеличивается и появляется общее свечение газов в камере. Ток дуги при этом уменьшается, а напряжение пульсирует с большой частотой и повышается на 20—30 В. Такой режим называют *режимом объемной ионизации* (рис. 7.3, б).

При чрезмерном удлинении дугового промежутка, если длина дуги становится больше зазора между электродом и стенкой, дуга может перейти на стенку кристаллизатора. Возникает аварийный так называемый *режим боковой дуги* (рис. 7.3, в). Если боковую дугу немедленно не погасить, она может прожечь стенку рабочей камеры или кристаллизатора, а попадание воды внутрь камеры может привести к взрыву установки. Погасить боковую дугу можно уменьшением длины дугового промежутка путем опускания электрода.

Высокочастотную составляющую в кривых тока и напряжения печи выделяют фильтрами и используют в качестве сигнала для управления положением электрода.

Градиент напряжения в столбе дуги при остаточном давлении, составляющем 1—120 Па для всех переплавляемых в ВДП металлов, равен 0,97—3 В/см и не зависит от величины тока. При общем напряжении на дуге 30—50 В большая часть его приходится на область катодного падения потенциала. Она составляет: для стали — 19 В, титана — 13,5 В, молибдена — 14,4 В и т. д. Анодное падение напряжения значительно меньше и, как правило, не превышает работы выхода электрона переплавляемого металла.

Вольт-амперные характеристики дуг в среде разреженных паров некоторых металлов показаны на рис. 7.4. Они могут быть описаны следующей эмпирической формулой:

$$U_d = \Sigma U_3 + k / (D_3 I_d I_d), \quad (7.1)$$

где  $U_d$  — напряжение на дуге, В;  $\Sigma U_3$  — сумма катодного и анодного падений напряжения, В;  $k$  — коэффициент, зависящий от рода переплавляемого металла;  $D_3$  — диаметр расходующегося электрода, м;  $I_d$  — длина дуги, м;  $I_d$  — ток дуги, А. Так, для стали  $k = 2 \cdot 10^{-3}$ , для титана  $4 \cdot 10^{-3}$ , для молибдена  $3,5 \cdot 10^{-3}$ . Плотность тока в катодных пятнах для данного материала является величиной, не зависящей от силы тока дуги. Следовательно, напряженность электрического поля в области катодного пятна  $E$  постоянна для данного металла. В этом случае электронный ток дуги в области катодного падения напряжения  $I_3$  должен быть пропорционален току дуги  $I_d$ . Тогда вблизи катода ионная составляющая тока равна разности тока дуги и электронной составляющей:  $I_i = I_d - I_e$ , т. е. ионный ток пропорционален току дуги. Из этого можно сделать важный вывод, что доли электронного и ионного токов в области катодного падения напряжения зависят только от рода металла и не зависят от тока разряда:

$$I_e / I_d = F_e = \text{const.} \quad (7.2)$$

Температуры металла на катоде и аноде близки, поэтому для выделяющейся на катоде мощности запишем

$$P_k = F_i I_d U_k + F_i I_d (\varphi_i + \varphi_0) + k_r E_{ст} I_d I_d, \quad (7.3)$$

где  $U_k$  — катодное падение напряжения, В;  $\varphi_i$  — потенциал ионизации паров металла;  $\varphi_0$  — работа выхода;  $k_r$  — коэффициент, учитывающий геометрию дугового промежутка;  $E_{ст}$  — градиент напряжения в столбе дуги, В/см.

Мощность, превращающаяся на катоде в теплоту,

$$P_{кт} = P_k - F_e I_d \varphi_0 \equiv I_d, \quad (7.4)$$

где  $F_e I_d \varphi_0$  — затраты мощности на эмиссию электронов.

Полная мощность, выделяющаяся в разряде,

$$P_d = U_d I_d = (U_k + U_a + E_{ст} l_d) I_d \equiv I_d; \quad (7.5)$$

отношение тепловой мощности на катоде к полной мощности дуги

$$P_{кт} / P_d = \frac{F_i (U_k + \varphi_i) + \varphi_0 + k_r E_{ст} l_d}{U_k + U_a + E_{ст} l_d} \quad (7.6)$$

Учитывая, что для этого металла  $F_i$  и  $U_k$  постоянны,  $l_d$  поддерживается постоянной, а значение  $E_{ст}$  мало и слабо зависит от  $I_d$ , а также, что  $U_a$  — относительно малая величина, приходим к выводу, что в ВДП для данного металла

$$P_{кт} / P_d \approx \text{const.} \quad (7.7)$$

Из этого следует, что скорость плавки данного металла в ВДП пропорциональна току дуги.

### § 7.3. Электрооборудование вакуумных дуговых печей

Силовая цепь ВДП включает в себя: источник питания, токопровод от источника питания до печи, токоведущие участки конструкции, токоведущий шток, электрододержатель, расходоуемый электрод, слиток, кристаллизатор, вакуумную камеру.

Конструкция токоподвода обеспечивает равномерный контакт по периметру поддона, кристаллизатора и вакуумной камеры, что снижает уровень магнитных полей и способствует стабилизации дугового разряда.

Принципиальная электрическая схема ВДП и эквивалентная схема замещения ее силовой цепи показаны на рис. 7.5.

Суммарное сопротивление силовой цепи

$$r = r_{ш} + r_{ГК} + r_{к} + r_{т}.$$

В ходе плавки за счет оплавления расходоуемого электрода значение  $r_{т}$  уменьшается, однако для приближенных расчетов  $r_{т}$  можно принять постоянным.

Источники питания ВДП имеют следующие основные характеристики:

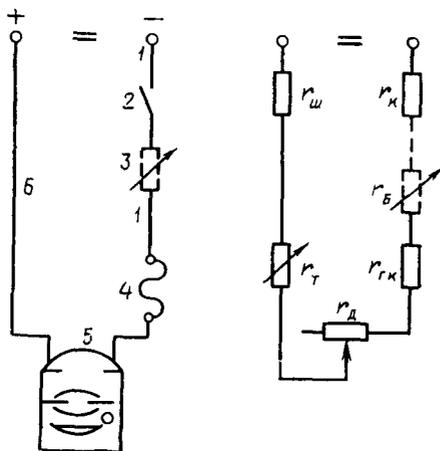


Рис. 7.5. Электрическая схема и схема замещения ВДП:

1 — шинный токопровод  $r_{ш}$ ; 2 — выключатель; 3 — балластное сопротивление  $r_{б}$ ; 4 — гибкий кабель  $r_{ГК}$ ; 5 — ВДП  $r_{д}$ ; 6 — шинный токопровод к кристаллизатору  $r_{т}$

1. Низкое сопротивление дуги, обуславливающее применение больших (десятки килоампер) токов для поддержания необходимой тепловой мощности, при этом вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги слабо падающая, горизонтальная или слабо возрастающая определяет необходимость крутопадающей или вертикальной характеристики источника питания.

2. Широкий (1 : 8) диапазон регулирования мощности.

3. Высокую стабильность поддержания мощности на заданном уровне (отклонения не более 2%).

4. Особо высокую надежность, так как непредвиденное отключение печи ведет к потере выплавленного металла.

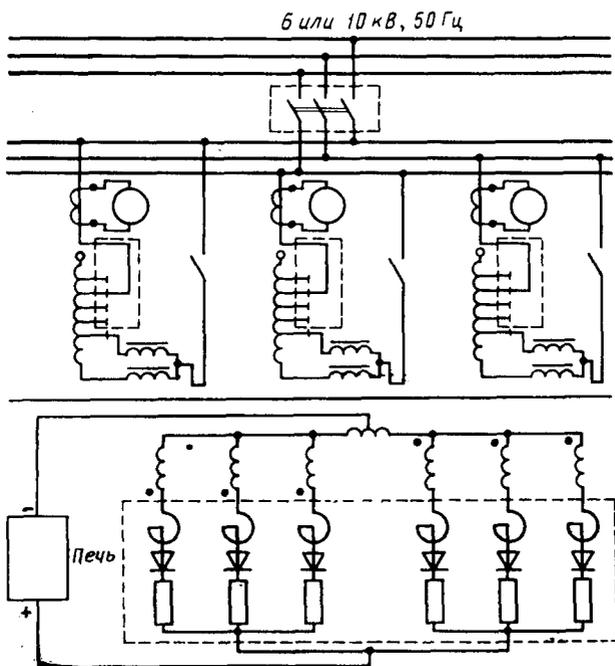


Рис. 7.6. Схема выпрямительного агрегата серии ВАКП с неуправляемыми вентилями на ток до 12,5 кА

В настоящее время еще находятся в эксплуатации машинные преобразователи серии ГПН-550 мощностью 645—675 кВт, рассчитанные на токи 6500 и 14 000 А, с напряжением холостого хода 85 и 40 В.

Все новые установки имеют агрегаты одного из трех типов: выпрямительный на неуправляемых вентилях, выпрямительный на тиристорах, параметрический источник тока.

Выпрямительный агрегат на неуправляемых вентилях серии ВАКП основан на принципе стабилизации и регулирования тока с помощью дросселей, включенных последовательно с вентилями (рис. 7.6).

Крутизна падающего участка внешней характеристики определяется наклоном ненасыщенной части кривой намагничивания железа. Для ограничения тока короткого замыкания (к. з.) до двукратного значения  $I_n$  предусмотрено повышенное реактивное сопротивление, для чего к трансформатору присоединен реактор. Агрегаты, выполненные по этой схеме, работают при токах до 12,5; 25,0 и 37,5 кА и состоят из отдельных блоков: трансформатор, дроссели насыщения, выпрямительный шкаф, устройство для измерения, шкаф и пульт управления, системы водоснабжения.

Силовой трансформатор со ступенями регулирования напряжения состоит из магнитопровода с концентрически расположенными обмотками высокого (ВН) и низкого (НН) напряжения. В схеме переключающего устройства предусмотрен трехфазный токоограничивающий реактор, состоящий из магнитопровода и двойных дисковых катушек. Дроссель насыщения состоит из однофазных дросселей, каждый из которых собирается из элементов, представляющих собой кольцевой магнитопровод с обмотками управления и смещения. Изменение сопротивления дросселя осуществляется регулированием тока в обмотке управления. Если возможностей регулирования дросселя оказывается недостаточно для поддержания требуемого тока, ступени трансформатора автоматически переключаются в нужную сторону.

Выпрямительный агрегат имеет параллельные звезды, лучи которых состоят из параллельно соединенных вентилях, установленных на шинах, охлаждаемых водой. Равномерная нагрузка вентилях обеспечивается индуктивными делителями тока. Цепь каждого вентиля защищена плавким предохранителем. Выпрямительный агрегат имеет защиту от перегрузки по току. При к.з. на стороне постоянного тока длительностью более двух секунд масляный выключатель отключает агрегат. При к.з. на стороне переменного тока агрегат отключается максимально-токовой защитой мгновенного действия.

*Агрегаты серии АВП* дают более высокую точность поддержания тока и имеют токоограничивающие дроссели только на стороне низкого напряжения (рис. 7.7). Автоматическая стабилизация тока в процессе плавки обеспечивается системой управления дросселями насыщения, состоящей из измерительных трансформаторов постоянного тока (ТПТ) и тиристоров, регулирующих ток в управляющей обмотке дросселей, включенных последовательно в цепь каждой ветви вторичной обмотки трансформатора. Силовые трансформаторы с первичным напряжением 10 кВ (звезда) и 6 кВ (треугольник) имеют 17 ступеней напряжения, переключаемых под нагрузкой. Вторичные обмотки выполнены по схеме «две обратные звезды» с уравнительным реактором. Плавное регулирование напряжения с дросселями насыщения производится внутри ступени напряжения трансформатора. Выпрямительный шкаф рассчитан на ток 12,5 кА и содержит шесть групп вентилях, каждая из которых через дроссель насыщения соединена с соответствующей обмоткой трансформатора.

Агрегаты на токи 25 и 37,5 кА имеют соответственно два и три шкафа. Номинальное выпрямленное напряжение — 75 В, напряжение на дуге — 25—35 В, мощность агрегата — 940—2800 кВт.

Выпрямительный агрегат имеет необходимые виды защит и блокировок. Для повышения коэффициента мощности на стороне высокого напряжения установлена автоматически управляемая батарея конденсаторов.

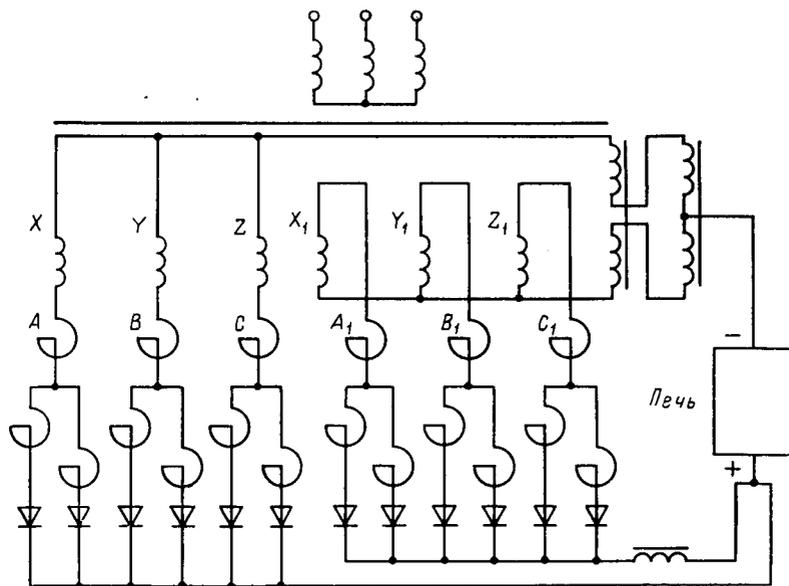


Рис. 7.7. Схема выпрямительного агрегата серии АВП на ток до 12,5 кА

Выпрямительные агрегаты на тиристорах, построенные на основе принципиальной схемы рис. 7.8, входят в состав всех новых ВДП, выпускаемых в СССР.

Агрегаты на тиристорах наряду с высокой точностью стабилизации тока имеют высокий КПД, минимальные габаритные размеры и массу.

Питание агрегатов марок ТВ9-12500/75Т, ТВ9-2500/75Т, ТВ9-37500/75Т, ТВ9-50000/75Т, ТВ9-2500/115Т, ТВ9-50000/115Т осуществляется на напряжении 6 или 10 кВ, первичная обмотка трансформатора имеет устройство РПН. Вторичная обмотка состоит из групп двух обратных звезд с уравнительными реакторами. Каждая группа рассчитана на ток 12,5 кА (ТВ9-12500/75Т). Сглаживающие реакторы  $L_1$  и  $L_2$  предохраняют источник от резких бросков тока, возникающих при капельных коротких замыканиях. Номинальный ток (12,5—50 кА) и вторичное напряжение (75 или 115 В) указаны в марке агрегата источника.

Шунты ШН1, ШН2 и датчики тока ДТ<sub>1</sub> и ДТ<sub>2</sub> (трансформаторы постоянного тока), а также измерители, основанные на эффекте Холла (для токов 37,5 и 50 кА), служат для измерения тока. В агрегатах применена система импульсно-фазового управления, осуществляющая формирование и фазовый сдвиг импульсов по принципу вертикального управления тиристорами. Идея этого

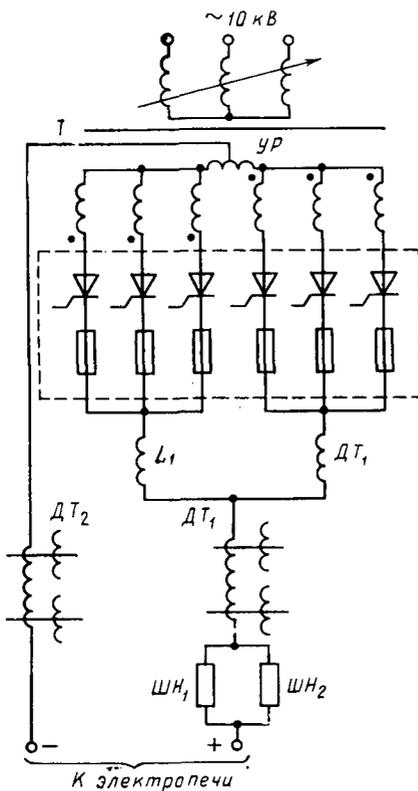
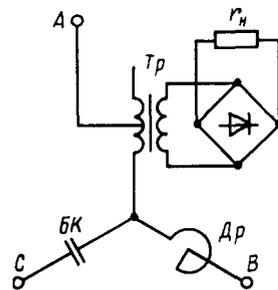


Рис. 7.8. Схема главных цепей тиристорного преобразовательного агрегата ТВ

Рис. 7.9. Принципиальная электрическая схема силовых цепей параметрического источника тока



способа управления заключается в формировании линейного или косинусного опорного напряжения с последующим формированием прямоугольного импульса. Импульс усиливается усилителем мощности и после выпрямления подается на управляющий электрод тиристора. Синхронизация импульсов осуществляется фазовым синхронизатором. Регулирование и стабилизация тока при изменении напряжения питающей сети или сопротивления нагрузки производятся по принципу сравнения фактического и заданного значений токов с помощью усилителей. Коэффициент мощности агрегата зависит от глубины регулирования и может снижаться до 0,6.

**Параметрические источники тока (ПИТ).** Для получения крутопадающих или вертикальных ВАХ источников питания ВДП используются резонансные схемы, главным признаком которых является постоянство тока нагрузки при изменяющемся ее сопротивлении.

Принципиальная схема ПИТ показана на рис. 7.9. В его состав входит трансформатор нагрузки  $T_r$  в одном луче звезды  $A$  с регу-

Таблица 7.1

Параметр	Тип источника					
	ПИТ-12; 5/75	ПИТ-25/75	ПИТ-37,5/75	ПИТ-50/75	ПИТ-50/1,5	ПИТ-50/150
Номинальный выпрямленный ток, А	12500	25000	37500	50000	50000	50000
Номинальное выпрямленное напряжение, В	75	75	75	77	115	150
Напряжение питания, кВ	6; 10	6; 10	6; 10	5; 10	6	6; 10
Номинальная мощность агрегата, кВт	940	1875	2812	3750	5750	7500
Диапазон регулирования по току, %	6—100	6—100	6—100	5—100	5—100	5—100
Точность стабилизации тока, %	0,5—1	0,5—1	0,5—1	±1	±1	±1
Коэффициент мощности в номинальном режиме	0,96	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
КПД, %	93	93	93	93	95	96
Расход воды для охлаждения, м <sup>3</sup> /ч	1,5	3	4,5	6	6	6

лятором напряжения под нагрузкой (РПН), включенный на группу неуправляемых вентилях, питающих постоянным током дуговую печь  $r_{II}$ . В луче фазы  $B$  включен дроссель  $Dr$ , имеющий обмотку подмагничивания для регулирования тока фазы. В фазе  $C$  включена конденсаторная батарея  $BK$ , емкость которой можно также регулировать. Основным условием регулирования является соблюдение соотношения  $x_L = x_C$ . В этом случае ток нагрузки не меняется с изменением ее сопротивления, длины дуги, условий горения.

Некоторые характеристики параметрических источников тока представлены в табл. 7.1.

Система автоматического управления (САУ) ВДП должна так регулировать мощность, чтобы требуемая скорость наплавления металла равнялась скорости кристаллизации слитка. Кроме того, 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. ВДП как объект управления представляется в виде системы, состоящей из четырех динамических звеньев с внутренней обратной связью: электрическая дуга, межэлектродный проме-

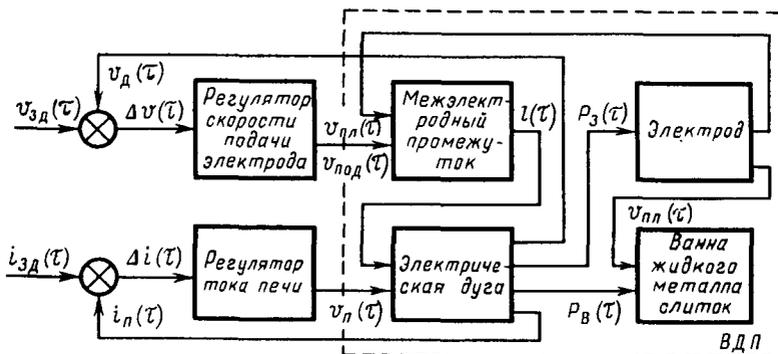


Рис. 7.10. Структурная схема САУ ВДП

жуток, электрод, ванна жидкого металла — слиток (рис. 7.10). Входными величинами звена «электрическая дуга» являются напряжение источника питания  $U_n$  и межэлектродный промежуток  $l_{ст}(\tau)$ , которые определяют выходные параметры дуги: ток  $I_n(\tau)$ , напряжение  $U_d(\tau)$ , мощность  $P_э(\tau)$ , поступающую в ванну расплава. Возмущающими воздействиями являются случайные изменения условий существования дугового разряда. Входными величинами звена «межэлектродный промежуток» являются скорость подачи электрода  $v_{под}(\tau)$  и скорость его плавления  $v_{пл}(\tau)$ , приведенная к линейной скорости увеличения промежутка. Выходной регулируемой величиной является длина промежутка  $l(\tau)$ , определяемая как интеграл разности указанных величин. Возмущающими воздействиями являются колебания поверхности ванны металла и изменение формы торца электрода.

Входной величиной звена «электрод» является мощность  $P_э(\tau)$ , поступающая с выхода звена «электрическая дуга», возмущающими воздействиями являются изменения положения и типы дугового разряда. В звене «ванна жидкого металла—слиток» входными величинами являются скорость расплавления  $v_{пл}(\tau)$  и мощность  $P_в(\tau)$ , определяющие режим кристаллизации слитка.

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 ШЦД 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 8

### ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

#### § 8.1. Устройства для получения низкотемпературной плазмы и области их применения

Плазменная технология — молодая отрасль промышленности, интенсивное ее развитие началось в 50-х годах нашего столетия и бурно продолжается в разных странах. Свидетельством тому служит большой поток патентной и научной информации, а также расширяющиеся области промышленного использования.

Предпосылкой для развития плазменной технологии стало развитие космической техники, что потребовало создания различных типов двигателей, в том числе и плазменных, материалов и конструкций космических аппаратов, сохраняющих работоспособность при входе в плотные слои атмосферы, испытаний летательных аппаратов при больших скоростях полета, исследований в области термоядерного синтеза, газодинамики при высоких скоростях, физики газового разряда, химической технологии высоких режимных параметров. С использованием плазменной технологии созданы не только новые материалы, обладающие высокими технологическими свойствами (огнеупорностью, твердостью, прочностью), но и аппаратура эффективной обработки этих материалов.

Плазменная резка черных (нержавеющих) и цветных металлов впервые разработана в СССР в 1956—1957 гг. Она позволяет резать с высокими скоростями стали больших толщин, медь и ее сплавы, алюминий и другие металлы (например, плазмотрон мощностью 100 кВт режет сталь толщиной 30 мм со скоростью 4 м/мин). При этом сокращаются подгоночные работы в сварочных цехах, поскольку после плазменной резки заготовки имеют большую точность размеров. Плазменная резка широко применяется в судостроении, на предприятиях тяжелого и атомного машиностроения, химической и электротехнической промышленности.

Плазменная сварка обеспечивает соединение деталей из меди, латуни, бронзы, алюминия и его сплавов. Плазменная наплавка и напыление обеспечивают покрытие деталей износостойким, жаропрочным и антикоррозионным составом с минимальным перемешиванием наносимого и основного материала.

Важным направлением использования плазменных потоков является вакуумная плазменная технология с использованием электромагнитных ускорителей. В облако плазмы в вакууме помещают деталь, которой сообщают отрицательный потенциал. Тогда положительные ионы вытягиваются из объема плазмы, ускоряются электрическим полем и поступают к детали. В такой системе уда-

ется получить потоки частиц со скоростями до сотни километров в секунду и энергиями до десятков тысяч электрон-вольт. Это позволяет проводить технологические процессы, основанные на конденсации атомарных частиц на поверхности, испарение поверхности металлов, внедрение атомов в глубь кристаллической решетки, имплантацию ионов нужного вида.

В вакуумных плазменных установках может быть получена плазма всех известных металлов, сплавов, органических и неорганических веществ. При этом плазмы различных веществ могут вступать в интенсивное химическое взаимодействие, которое невозможно в других обстоятельствах.

Методом плазменной технологии в вакууме могут быть успешно решены следующие наиболее актуальные задачи:

получение особо чистых слоев материалов, обладающих специальными свойствами и выполняющих активные функции (магнитные, оптические, эмиссионные, сверхпроводящие и другие слои);

защита элементов конструкций барьерными слоями от воздействия агрессивных сред, больших скоростей газовых потоков, высоких температур;

изменение структурно-энергетического состояния поверхности материалов (упрочнение поверхности, ионное легирование полупроводников и др.);

получение материалов в виде многослойных структур, обладающих высокими механическими и эксплуатационными свойствами;

получение пленочных монокристаллических структур.

Вакуумная плазменная технология, несмотря на некоторую сложность, позволяет существенно пополнить арсенал методов бесконтактной обработки материалов.

Плазменные технологические процессы в химии состоят из следующих основных стадий: 1) генерация плазмы необходимого состава и параметров по температуре и давлению; 2) ввод реагентов — веществ в твердом, жидком или газообразном состоянии и обеспечение необходимого времени их контакта; 3) вывод целевого продукта или нескольких продуктов из зоны реакции.

Для получения плазмы используются плазмотроны с различными принципиальными схемами. Плазмохимические реакции могут осуществляться двумя способами: подача всех компонентов плазмы в зону электрического разряда с прохождением тока его через реагирующую плазму и подача реагентов в струю плазмы вне зоны разряда. В первом случае плазмотрон совмещается с реакционным объемом — реактором, во втором применяются плазмоструйные реакторы, представляющие собой цилиндрический охлаждаемый сосуд, где происходит смешение плазменного потока с вводимым материалом.

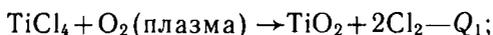
Закалка и охлаждение продуктов реакции производятся путем введения в плазму вне зоны разряда дополнительного количества

какого-либо газа или жидкости, а также охлаждаемых экранов-теплообменников.

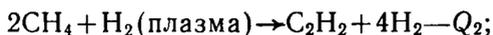
Плазменные технологические процессы в химии характеризуются следующим:

1. Высокими температурами (энергиями) и большими скоростями процессов (время контакта  $10^{-2}$ — $10^{-5}$  с), обеспечивающими резкое сокращение технологической части оборудования.

2. Одностадийностью плазмохимических процессов. Примером могут служить осуществляемые в плазме реакции получения пигментного оксида титана для производства белил:



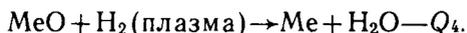
ацетилен для химической промышленности:



оксидов азота для производства удобрений:



чистых металлов из их оксидов:



3. Возможностью использования в процессах трудно перерабатываемого сырья (природный газ, воздух, сырая нефть, тугоплавкие металлосодержащие минералы).

4. Чистотой получаемых в плазме веществ, определяемой чистотой сырья и не ухудшающейся внесением посторонних примесей.

Побочные продукты реакции, например водород и хлор, являются также ценными компонентами и используются промышленностью.

Если в плазменном пиролизе углеводородов не организовано быстрое охлаждение продуктов реакции (закалка), то разложение углеводородов проходит до конца с образованием высококачественной сажи и технического водорода. Процесс идет при температуре от 1,5 до  $(5 \div 6) 10^3$  К.

Струя плазмы водяного пара является перспективным энергоносителем для получения целевых продуктов из различных органических веществ.

Для получения оксидов азота, идущих в дальнейшем на производство азотных удобрений, используется воздушная плазма с температурой 3000—3500 К при давлении  $(20 \div 30) 10^4$  Па, охлаждаемая в процессе закалки со скоростью  $10^8$  К/с до температуры 2000—1800 К и остывающая далее в теплообменниках.

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 дуго-

вого разрядов. В настоящее время последний способ имеет ряд преимуществ:

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

2) возможность получения плазмы в вакууме и при высоких давлениях;

3) 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.

Одним из наиболее важных тепловых параметров плазмы является ее энтальпия, т. е. количество теплоты, содержащееся в единице ее объема или массы.

На рис. 8.1 показаны зависимости удельной энтальпии некоторых плазмообразующих газов от температуры при атмосферном давлении. Из рисунка следует:

1) энтальпия двухатомных газов при температурах  $(4 \div 8) \cdot 10^3$  К за счет энергии, пошедшей на диссоциацию молекул, превышает энтальпию одноатомных газов. Например, при  $T = 8 \cdot 10^3$  К энтальпия азота почти в 5 раз больше, чем энтальпия аргона;

2) при использовании плазмы в нагревательных аппаратах более выгодно использование высокоэнтальпийных молекулярных плазмообразующих газов, так как они при меньших температурах обладают большей тепловой эффективностью.

Рассмотрим характеристики некоторых плазмообразующих газов.

*Аргон* имеет низкое значение энтальпии, что делает его мало пригодным для использования в качестве однокомпонентной плазмообразующей среды. Высокая электропроводность аргона при высоких температурах обуславливает низкую напряженность электрического поля в столбе дугового разряда. Аргон является одним из наиболее дефицитных и дорогостоящих газов и применяется в основном в тех случаях, где наибольшую роль играет его химическая инертность.

*Азот* часто применяется в качестве однокомпонентной плазмообразующей среды. Его теплопроводность и теплоемкость при высоких температурах довольно высоки. По этой причине в атмосфере азота электрический разряд обеспечивает эффективное преобразование электрической энергии в тепловую.

*Гелий* имеет более высокие энергетические характеристики, чем аргон. Однако вследствие дефицитности и высокой стоимости

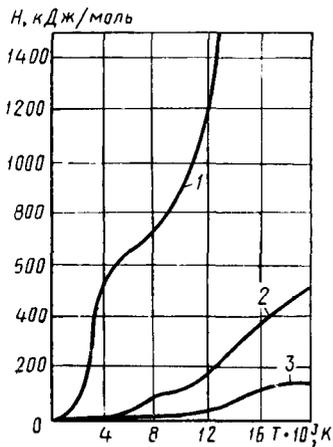


Рис. 8.1. Зависимость энтальпии газов от температуры: 1 — водород; 2 — азот; 3 — аргон

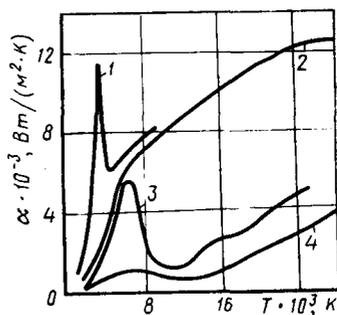


Рис. 8.2. Зависимость коэффициента теплопередачи от температуры для водорода (1), гелия (2), азота (3), аргона (4)

применение его в плазменных установках ограничено. Он применяется в основном как добавка к аргону для улучшения эффективности нагрева в инертной атмосфере рабочего пространства плавильных печей.

*Водород* — самый высокоэнтальпийный плазмообразующий газ. Напряженность электрического поля в водородной дуге в несколько раз выше, чем в аргоновой. Теплопроводность водорода также гораздо выше, чем у других газов. Он сравнительно дешев и не дефицитен. Однако чистый водород при высоких температурах разрушающе действует на электроды плазмообразующего аппарата и поэтому он применяется в смеси с аргоном.

Важной характеристикой плазмы является зависимость коэффициента теплопередачи от температуры (рис. 8.2). Из рисунка следует, что процессы диссоциации молекулярных газов увеличивают теплоотдачу от плазмы при ее охлаждении.

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, формирую-

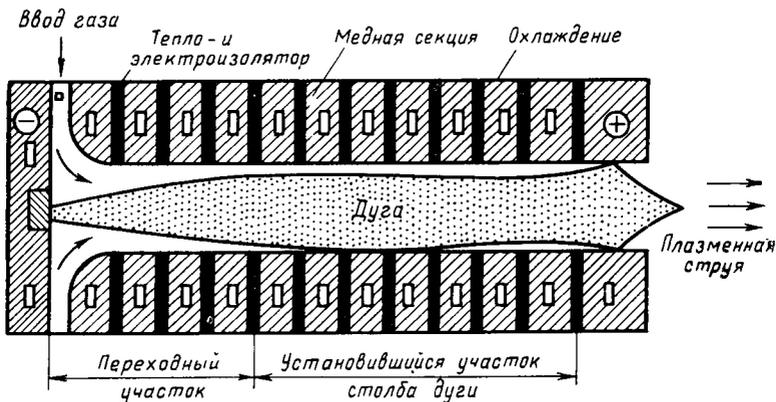


Рис. 8.3. Схема плазмотрона со стабилизацией дуги стенкой

чаяя поток плазмы; система впуска плазмообразующего газа; система управления дуговым разрядом. Различные варианты конструктивного выполнения этих компонентов и различные их комбинации обусловили большое количество принципиальных схем плазмотронов.

Для обеспечения длительного ресурса работы электродных систем дугowych 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 изготовляют в виде стержней или цилиндров малых размеров, запрессованных или сваренных 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, отличающихся друг от друга методами стабилизации электрической дуги: водоохлаждаемой стенкой и вихревым потоком газа или жидкости.

В плазмотроне (рис. 8.3) 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

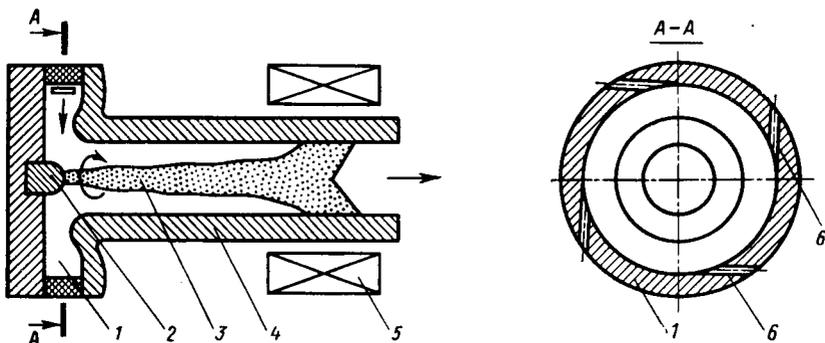


Рис. 8.4. Плазматрон с газовихревой стабилизацией дуги:

1 — вихревая камера; 2 — внутренний стержневой электрод; 3 — столб дуги; 4 — выходной трубчатый электрод; 5 — соленоид; 6 — тангенциальные каналы

этом происходит пробой слоя нагретого газа между столбом дуги и водоохлаждаемой стенкой. Это явление получило название «шунтирование дуги стенкой». Процесс шунтирования влияет на работу плазматрона, в частности он формирует падающую ВАХ дуги, ограничивает температуру плазмы, мощность плазматрона и снижает его КПД.

На рис. 8.4 показана принципиальная схема плазматрона со стабилизацией дуги вихревым потоком газа. Газ, подаваемый через тангенциальные отверстия 6 в вихревую камеру 1, создает в канале плазматрона 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. Стабилизирующее действие газового вихря сохраняется до тех пор, пока не произойдет прогрев всего газа и появится его заметная проводимость, либо пока не произойдет угасание тангенциальной составляющей скорости газового потока. Под действием тангенциальной составляющей скорости газового потока опорное пятно дуги в выходном электроде перемещается по поверхности канала и сносится вниз по потоку осевой компонентной скорости. Этим обеспечивается долговечность трубчатых электродов. Среднемассовая температура плазмы при работе на азоте и воздухе в таких плазматронах не превышает  $5 \cdot 10^3$ — $6 \cdot 10^3$  К. Коэффициент полезного действия  $\eta = \Delta H G / N_{эл}$  (где  $\Delta H$  — разность энтальпий нагретого и холодного газа;  $G$  — секундный расход газа;  $N_{эл} = UI$  — электрическая мощность плазматрона) достигает 0,75—0,85. Более совершенным является плазматрон с секционированным электродом и

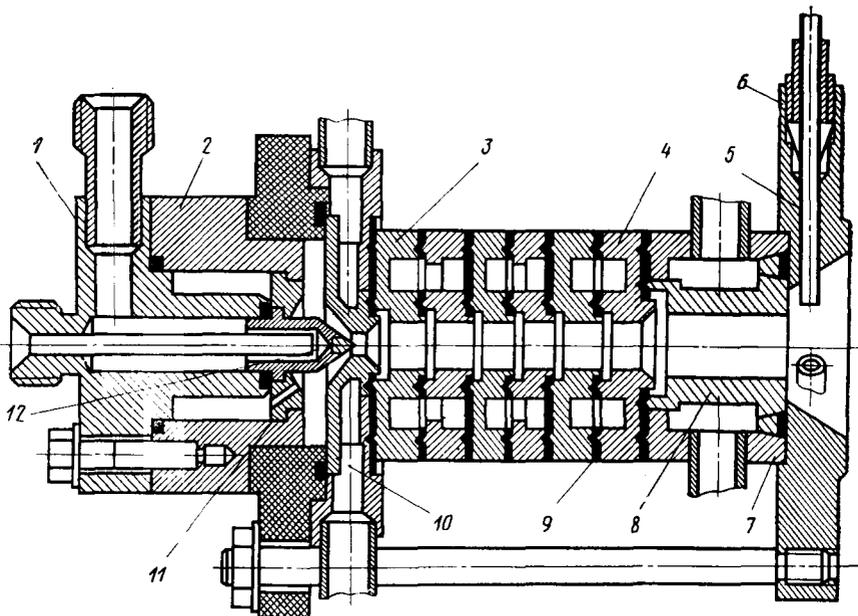


Рис. 8.5. Плазматрон с секционированной межэлектродной вставкой ПН-6:  
 1 — катодный узел; 2 — корпус катода; 3 — секция МЭВ; 4 — переходная секция МЭВ; 5 — шнотопровод; 6 — цапга; 7 — корпус анода; 8 — анодное сопло; 9 — изолятор; 10 — сопло входное; 11 — газоформирователь; 12 — катод

распределенной между секциями подачи плазмообразующего газа, что позволяет значительно поднять напряжение на дуге.

Уменьшение эрозии электродов в плазматронах с вихревой стабилизацией может быть осуществлено за счет наложения на радиальные участки дуги осевого магнитного поля. Конструктивная простота, достаточно высокий тепловой КПД и большой ресурс работы электродов определили широкое распространение рассмотренных типов плазматронов.

Модификацией плазматронов со стабилизацией дуги стенкой и вихревым потоком газа является плазматрон с межэлектродными вставками. Принципиальная конструкция дуговой зоны такого плазматрона показана на рис. 8.5. Дуга горит между электродами 8 и 12 в полости межэлектродных изолированных вставок 3, 4. Сечение канала столба дуги ограничено диаметром внутренней полости вставки.

Наличие вставки позволяет фиксировать длину дуги, что способствует получению больших падений напряжений на дуге, чем в плазматронах с самоустанавливающейся длиной дуги при тех же токе, расходе газа, давлении и диаметре канала. Это дает возможность вложить большую мощность и получить соответственно более высокую температуру плазмы.

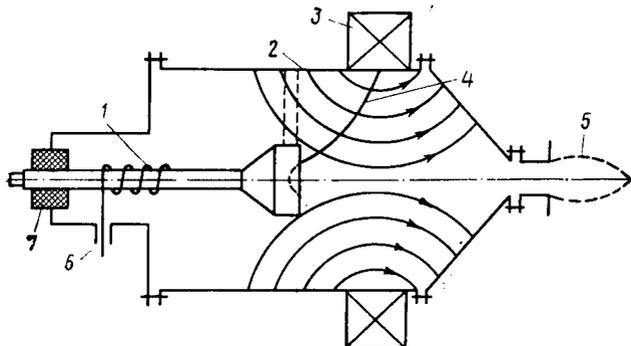


Рис. 8.6. Схема плазмотрона с магнитной стабилизацией дуги:

1 — центральный электрод; 2 — внешний электрод; 3 — соленоид; 4 — столб дуги; 5 — струя плазмы; 6 — подвод газа; 7 — изолятор

Поскольку диаметр столба дуги у таких плазмотронов ограничен, удается получить возрастающие ВАХ дугового разряда.

В плазмотроне с поперечно-обдуваемыми дугами и коаксиальным расположением электродов управление характеристиками дугового разряда производится осевым магнитным полем, в котором движется как проводник с током столб дугового разряда.

Схема плазмотрона с магнитной стабилизацией дуги показана на рис. 8.6. Между электродами 1 и 2 горит электрическая дуга 4. Магнитное поле создается соленоидом 3. Газ проходит между электродами, интенсивно нагревается в межэлектродном зазоре электрической дугой и выходит в виде высокотемпературной струи 5 через сопло.

Пространственное положение дуги в таких плазмотронах определяется тремя факторами: геометрическим положением центрального электрода, аэродинамическими силами и формой магнитного поля. Дуга удерживается вблизи середины оси магнитной катушки и под действием набегающего потока сносится в сторону его течения. Скорость вращения дуги пропорциональна току разряда и напряженности магнитного поля. При изготовлении центрального электрода из тугоплавкого материала КПД плазмотрона составляет 0,52—0,76 и преимущественно зависит от потерь в цилиндрический электрод.

Плазмотрон с кольцевыми электродами (рис. 8.7) относится к системам с поперечным обдувом столба дугового разряда. Плазмообразующий газ накачивается внутрь корпуса плазмотрона 4 и через дуговой разряд, движущийся в пространстве между параллельными кольцами электродов 6, выходит через сопло 2 в виде струи плазмы 1. Соленоиды 3, расположенные вокруг электродов, создают магнитное поле в зазоре так, что вектор индукции

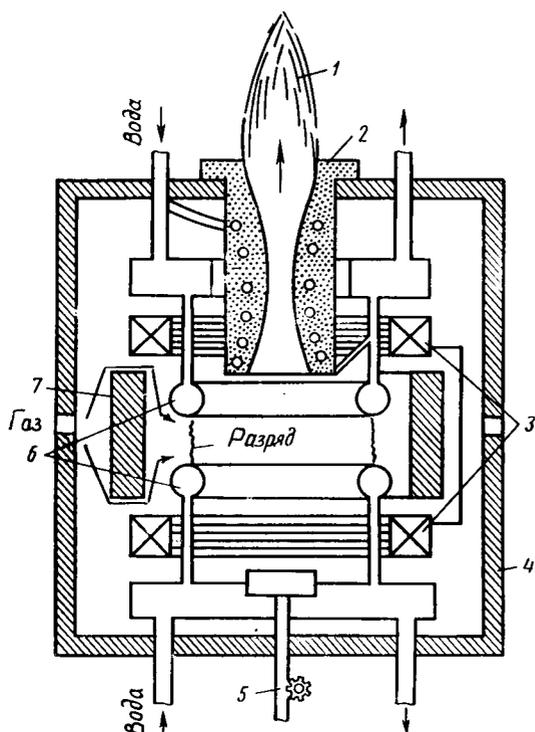


Рис. 8.7. Схема плазмотрона с тороидальными электродами:

1 — поток нагретого газа; 2 — выходное сопло; 3 — соленоиды; 4 — корпус камеры; 5 — рессношестеренчатый механизм зажигания дуги; 6 — тороидальные электроды; 7 — экран

сохраняющих высокую эмиссионную способность при перемене полярности тока.

Трехфазный однокамерный плазмотрон со стержневыми электродами показан на рис. 8.8. Между электродами зажигается трехфазная электрическая дуга, которая продольным дутьем газа вытягивается вдоль камеры.

Тангенциальная подача газа в камеру способствует стабилизации электрической дуги и защите стенок плазмотрона от ее непосредственного воздействия.

Все плазмотроны переменного тока имеют падающую ВАХ.

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.

магнитного поля перпендикулярен току дуги. Конструкция позволяет работать на больших токах при высоком внутрикамерном давлении.

Плазмотроны, работающие на переменном однофазном токе, конструктивно схожи с рассмотренными.

В плазменной технологии получили применение *трехфазные плазмотроны*, которые представляют собой комбинации из трех однофазных.

По конструктивным особенностям различают одно- и многокамерные трехфазные плазмотроны. В случае однокамерных плазмотронов все три дуги горят в одном объеме. Устойчивость дугового разряда обеспечивается применением тугоплавких электродов,

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

Энергетические и вольт-амперные 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. 8.9) подразделяют на индукционные, емкостные, факельные, сверхвысокочастотные (СВЧ).

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. 8.9, 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

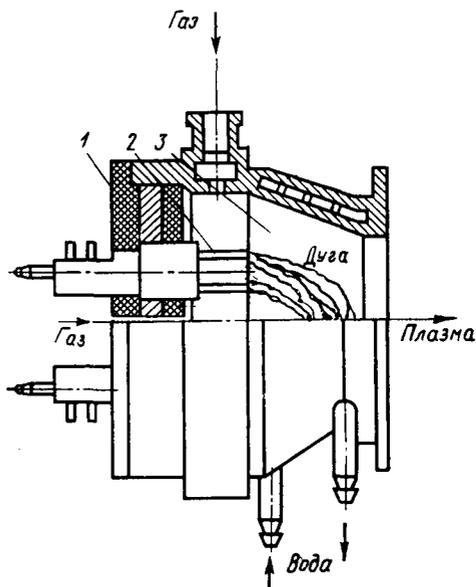


Рис. 8.8. Трехфазный плазмотрон с цилиндрическими стержневыми электродами:  
1 — изоляционный блок; 2 — электрод; 3 — разрядная камера

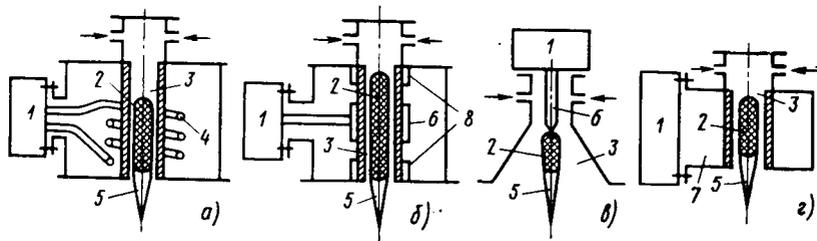


Рис. 8.9. Схемы высокочастотных плазмотронов

называют зажиганием. После зажигания в камере возникает самоподдерживающийся стационарный безэлектродный разряд 2. Глубина проникновения ( $\delta$ , см) вихревых токов в плазму определяется по формуле  $\delta = (1/2\sqrt{\rho/(\mu f)})$ , где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление плазмы;  $f$  — частота, Гц;  $\mu$  — магнитная проницаемость, для плазмы  $\mu = 1$ . Удельное сопротивление аргона, азота и водорода при 15 000 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  $(7,5 \div 15,0) 10^3$  К со скоростью 10—60 м/с.

*Высокочастотный емкостный плазмотрон* (рис. 8.9, 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. 8.9, 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. 8.9, г) энергия от источника питания в зону разряда подается по волноводу 7.

Высокочастотные плазмотроны имеют широкие перспективы применения в химической и металлургической промышленности благодаря большому ресурсу работы (2—3 месяца без замены деталей), возможности получения чистой плазмы агрессивных газов, таких, как хлор, кислород и др., т. е. без засорения продуктами разрушения электродов. Однако пока они имеют более низкий, чем дуговые плазмотроны, энергетический КПД и сложные источники питания.

## § 8.2. 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 критерияльного обобщения многочисленных экспериментальных данных.

В настоящее время уравнения ВАХ и КПД составлены для плазмотронов определенных схем и справедливы в строгих границах геометрического подобия, диапазонах изменений токов и расходов газа, для однокомпонентных или стандартных плазмообразующих сред, а также внутрикамерных давлений, напряженностей магнитных полей.

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

$$U^* = 1290 [I^2 / (Gd)]^{-0,15} (G/d)^{0,3} (pd)^{0,25}$$

При работе на водороде оно имеет вид

$$U^* = 9650 [I^2 / (Gd)]^{-0,2} (G/d)^{0,5} (pd)^{0,36}$$

Здесь  $I$  — 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

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

для работы на водороде

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

Здесь  $l$  — характерная длина электрода.

В обобщенных характеристиках коаксиальных плазмотронов присутствуют параметры, определяющие наличие и взаимодействие с дуговым разрядом магнитного поля. При выводе обобщен-

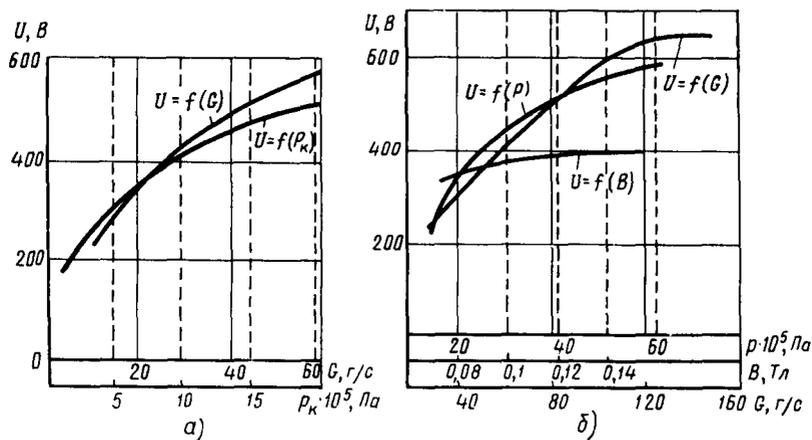


Рис. 8.10. Энергетические характеристики плазмотронов:

$a$  — зависимость напряжения на дуге плазмотрона с вихревой стабилизацией от расхода газа и давления в камере;  $b$  — зависимость напряжения на дуге плазмотрона с магнитной стабилизацией от индукции магнитного поля  $B$ , расхода газа и давления в камере

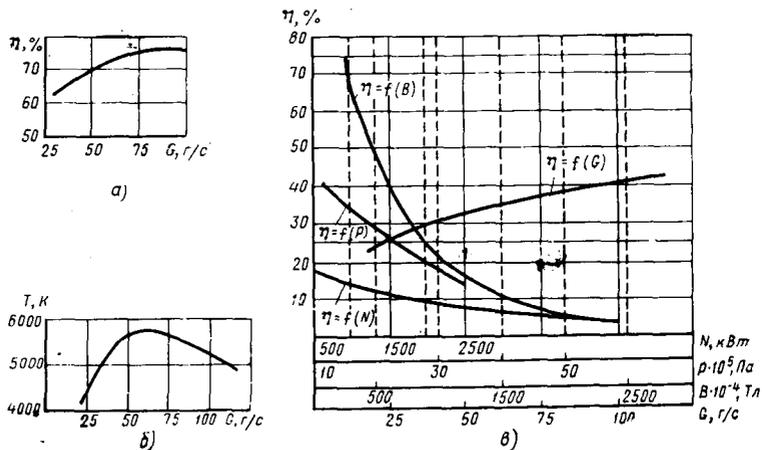


Рис. 8.11. Энергетические закономерности плазмотронов:

*а* — зависимость термического КПД от расхода газа для плазмотрона с вихревой стабилизацией; *б* — зависимость КПД плазмотрона с магнитной стабилизацией от его мощности, давления в камере, индукции магнитной поля и расхода газа; *в* — зависимость среднемаховой температуры газа на выходе от расхода

ных критериев используют экспериментальные зависимости падения напряжения на дуге от давления, силы тока, магнитной индукции, секундного расхода плазмообразующего газа. Они приведены в качестве примера на рис. 8.10. Зависимости КПД плазмотрона, температуры плазмы от давления, расхода газа, магнитной индукции показаны на рис. 8.11. Ход этих зависимостей может служить ориентиром при регулировании плазмотронов в технологических процессах.

Мощность плазмотронов определяется соотношением тока дуги и напряжением:  $P = IU = IEI$ , которое, в свою очередь, определяется длиной дуги  $l$  и напряженностью электрического поля  $E$ . Мощность, выделяющаяся в электродах, как было показано, зависит от тока дуги и материала электрода. Так как электроды плазмотронов должны иметь длительный срок работы, а скорость их разрушения прямо пропорциональна току дуги, то при определении параметров разряда следует ориентироваться на минимальные токи и максимальные напряжения, обеспечивающие заданную температуру плазмы и необходимую мощность дуги при заданных габаритных размерах электродов.

Как было показано, напряженность электрического поля  $E$  дуги зависит от рода газа, давления и скорости обдува. Для плазмотронов в этой зависимости появляется дополнительный фактор — температура окружающего газа. В плазмотронах с продольным обдувом напряженность поля дуги имеет максимальное значение вблизи зоны подачи газа и постепенно уменьшается в на-

правлении истечения плазмы. Значение  $E$  для дуги, обдуваемой осевым потоком аргона при токах 100—300 А и расходе его 0,25—1,23 г/с, составляет 4,5—14 В, уменьшаясь при росте тока и снижении расхода газа. Отсюда следует, что для получения необходимой мощности выходной электрод должен иметь необходимые длину и диаметр канала для размещения в нем электрической дуги длиной  $l$ . Как правило, длину электрода выбирают несколько большей, чем длина дуги, для предотвращения выхода ее на торец электрода в неуправляемую зону. При конструировании плазменных технологических аппаратов следует учитывать, что напряженность электрического поля дуги растет с увеличением рабочего давления.

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

$$dU_{\text{ист}}/dI < dU_{\text{д}}/dI,$$

здесь  $U_{\text{ист}}$  — 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 вы-

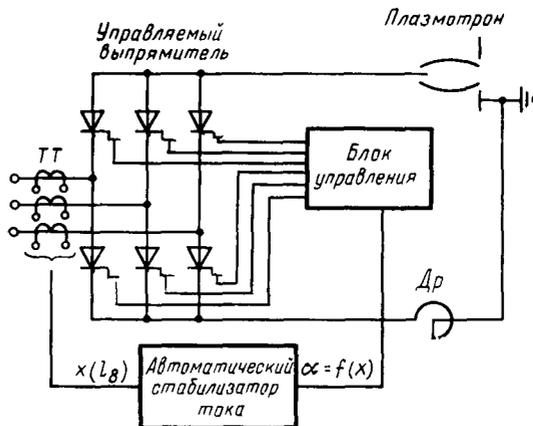


Рис. 8.12. Схема источника с автоматической стабилизацией тока

соковольтные 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. 8.12). Сглаживающий дроссель в цепи дуги в значительной степени сужает частотный спектр возмущений, влияющих на электрическую систему в целом. Для этой системы характерными являются следующие параметры:

$$\tau_{\text{рег}} \leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

постоянная времени цепи дуга—нагрузка

$$\tau_{\text{нагр}} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

запас напряжения источника

$$\alpha = U_{\text{дном}}/U_0 = 1,1;$$

статическое отклонение тока от номинального — не более 3%;  
длительность отклонения — не более 15 мс.

Зажигание дуги в плазмотронах производится путем пробоя межэлектродного промежутка осциллятором.

В плазмотронах с секционированным выходным электродом во время запуска анодную цепь питания подключают к первой, ближней к катоду секции, а затем по мере развития дуги последова-

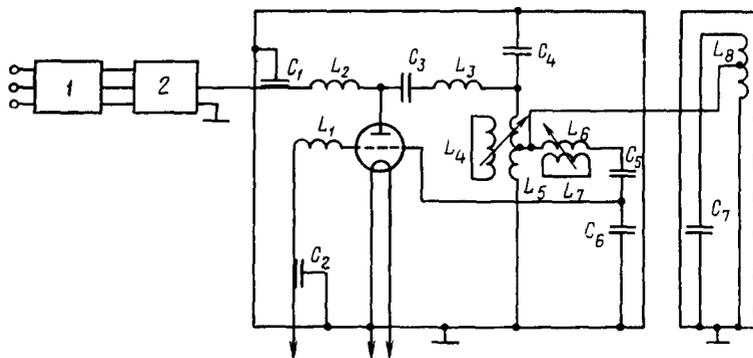


Рис. 8.13. Принципиальная схема ВЧИ-установки, работающей на частоте 1,76 МГц:

1 — анодный трансформатор; 2 — анодный выпрямитель

тельно переключают вниз по потоку плазмы и устанавливают на последнем аноде.

Высокочастотные плазменные установки питаются от ламповых преобразователей частоты. Принципиальная схема одного из них показана на рис. 8.13. Установка ВЧИ-63/1,76-ИГ-Л01 мощностью 103 кВт с частотой тока 1,76—2,5 МГц включает в себя анодный трансформатор с напряжением 0,38/1,4 кВ, анодный выпрямитель на тиратронах с напряжением 10,5 кВ и рассчитана на анодный ток 8 А и колебательную мощность 63 кВт. Колебательный контур, являющийся основной нагрузкой лампового генератора, образован эквивалентной индуктивностью плазмотрона  $L_8$  и емкостью  $C_7$ . Генераторная лампа является основным элементом источника питания, определяющим его КПД на уровне 0,6—0,7 и срок службы порядка 2000 ч.

### § 8.3. Плазменные плавильные установки

Существует два основных направления использования плазмы в металлургии:

1) интенсификация известных процессов плавки с помощью плазменного подогрева или замены в металлургических агрегатах прежних источников теплоты плазменными;

2) создание принципиально новых металлургических агрегатов, а также плазмотехнологических процессов.

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

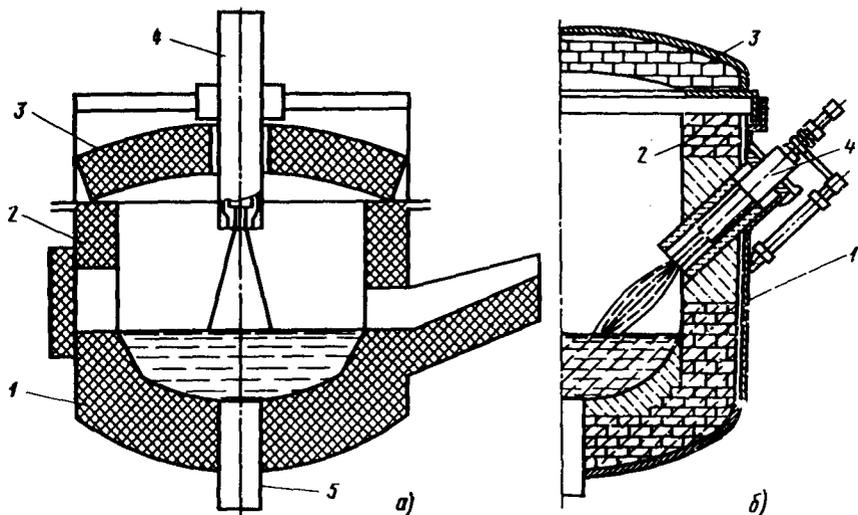


Рис. 8.14. Схема плазменной печи с керамическим тиглем:  
 а — с одним плазмотроном в своде; б — с плазмотронами, установленными в стенках;  
 1 — кожух; 2 — футеровка; 3 — свод; 4 — плазмотрон; 5 — подовый электрод

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.

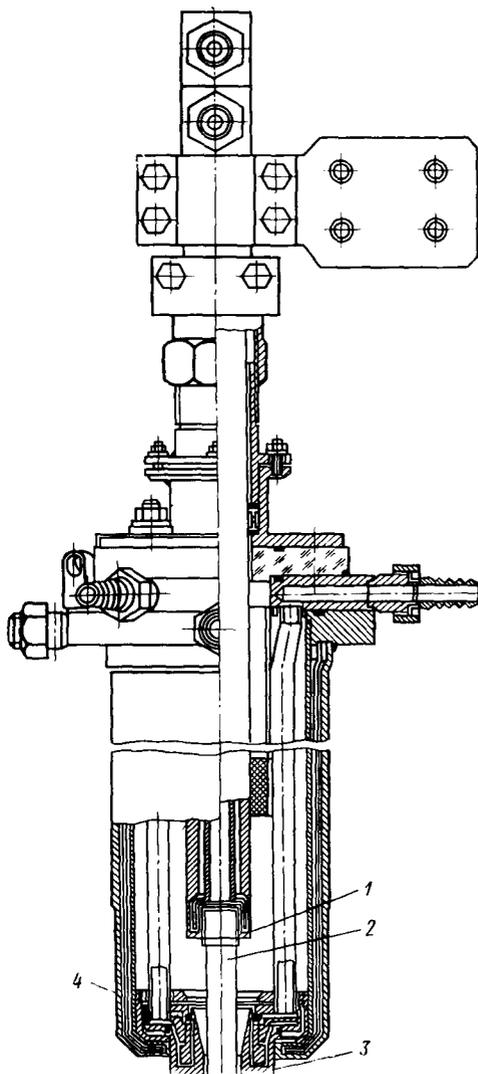


Рис. 8.15. Схема дугового плазмотрона постоянного тока:

1 — электрододержатель; 2 — катод; 3 — сопло; 4 — корпус

Плавка плазменной дугой в плазменных печах аналогична вакуумно-дуговой плавке с нерасходуемым вольфрамовым электродом, но плазменная дуга имеет существенные преимущества перед вакуумной: лучшая жесткость и стабильность дуги, большая длина дуги, предохранение металла от загрязнения вольфрамом электрода, более высокие напряжение и мощность.

Состав плазменной струи может задаваться по-разному, что позволяет поддерживать в печи практически любую атмосферу. Поскольку парциальные давления кислорода, водорода и азота в плазменной печи, работающей на инертном газе, невелики, то условия дегазации жидкого металла в ПДП приближаются к условиям дегазации в вакуумных печах, оборудованных сложными и дорогостоящими вакуумными системами.

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.

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. 8.14) 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.

Плазменная дуга вначале проплавляет в шихте узкий канал, и стекающий вниз жидкий металл скапливается на подине ванны, после чего расплавляется весь металл. Дегазация и рафинирование металла особенно интенсивно происходят на поверхности ванны в месте контакта жидкого металла с высокотемпературной струей. Для плавки применяются плазмотроны постоянного и переменного токов различных мощностей. Промышленные печи СССР и ГДР емкостью 5, 10 и 30 т оснащены плазмотронами постоянного тока (рис. 8.15), работающими на прямой полярности. Наиболее ответственными и теплонапряженными деталями плазмотрона являются катод 2 и сопло 3, через кольцевой зазор между которыми вытекает плазмообразующий газ. При запуске печи первичная дуга зажигается осциллятором между катодом и соплом и затем сносится газом до соприкосновения с металлом печи. После этого пусковая дуга отключается и горит только рабочая дуга между катодом и расплавом в потоке плазмы. Длина дуги, а следовательно, напряжение на ней определяются размерами и конструкцией печи (а не плазмотрона), поэтому для плазмотрона существует один рабочий параметр — ток дуги. Некоторые данные по плавильным плазмотронам приведены в табл. 8.1.

Катоды изготовлены из торированного или лантанированного вольфрама.

Прочие конструкции плавильных плазмотронов имеют дополнительные каналы для подачи в плавильное пространство других газов, необходимых для металлургического процесса. Напряжение на дуге 150—660 В, вводимая мощность в период расплава равна 12—15 МВт, удельный расход энергии составляет 625 кВт·ч/т.

Таблица 8.1

Параметры	Режим				
Ток, А	800	2000	4000	5000	10000
Диаметр катода, мм	5—6	10—12	18—20	24—25	48—50
Расход аргона, л/с	1	2	3	4	6

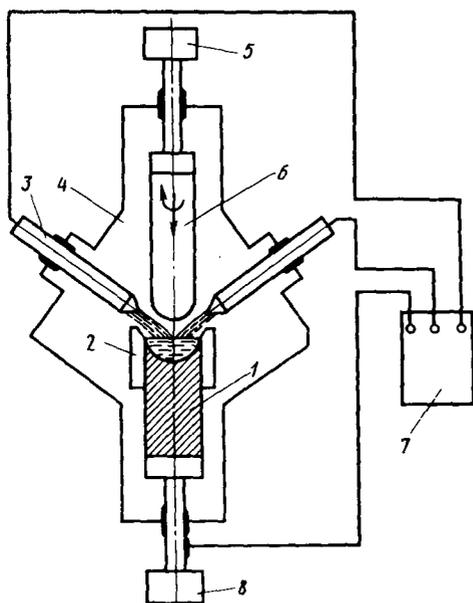


Рис. 8.16. Схема печи для плавки в кристаллизаторе:

1 — слиток; 2 — кристаллизатор; 3 — плазмодуэ; 4 — корпус печи; 5 — механизм подачи и вращения заготовки; 6 — переплавляемая заготовка; 7 — источник питания; 8 — механизм вытягивания слитка

При плазменно-дуговой переплавке с целью получения особо чистых металлов используются ПДП с кристаллизаторами (рис. 8.16).

Переплавляемый металл в виде штанги 6 с сечением любой формы подается с постоянной скоростью и оплавляется одной или несколькими плазменными дугами. Анодом в этом случае является поверхность ванны жидкого металла в кристаллизаторе. Стекающий со штанги металл прогревается плазменной струей и растекается по поверхности ванны. В контакте с газовой атмосферой металл рафинируется и затем затвердевает и вытягивается в виде слитка. Рабочее давление в этих печах может изменяться в широких пределах от избыточного  $(1 \div 3) 10^5$  Па до пониженного 1—10 Па. По сравнению с печами дру-

гих типов плазменные печи обладают рядом преимуществ: хорошая поверхность слитков; незначительная потеря металлом легирующих компонентов (Cr, Al, Ti, Mn, Si и т. д.); возможность легирования металла газообразным азотом; гибкая связь между мощностью дуг и скоростью плавления слитка, позволяющая регулировать время пребывания металла в жидком состоянии.

Недостатками этих печей являются большая сложность и стоимость эксплуатации.

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

#### § 8.4. 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

$$v\delta = 0,24IU\eta/(\gamma bS),$$

здесь  $v$  — 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.

При оптимальном соотношении между толщиной металла, мощностью дуги, диаметром сопла и скоростью резки струя плазмы погружается на всю толщину металла, а анодная область дуги располагается вблизи нижней кромки реза. Уменьшение мощности дуги, равно как и увеличение скорости продвижения плазмотрона, ведет к сужению полости реза.

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%. Для увеличения мощности струи плазмы в пределах заданного тока дуги целесообразно принимать меры по повышению линейного градиента потенциала столба дуги применением высокоэнталь-

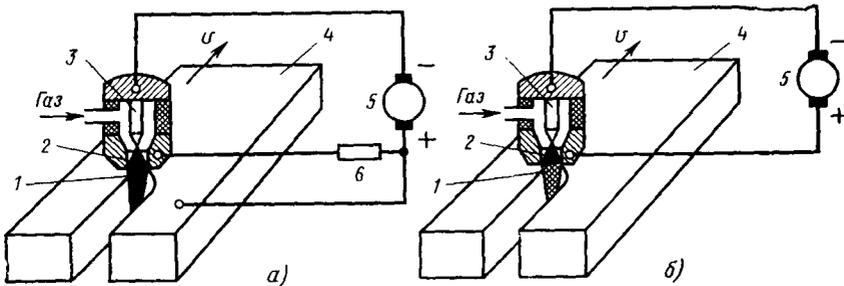


Рис. 8.17. Схема резки металла плазменной дугой (а) и плазменной струей (б):

1 — струя плазмы; 2 — дуга; 3 — катод; 4 — разрезаемый материал; 5 — источник питания; 6 — сопротивление, ограничивающее ток дежурной дуги

пийных плазмообразующих газов (азота, водорода, воздуха, углe кислого газа, паров воды и др.) и интенсивным сжатием столб дуги соплом плазмотрона.

Режущий плазмотрон (рис. 8.17) с газовой стабилизацией дуг имеет стержневой вольфрамовый (или циркониевый) электрод, соосно расположенный в полости сопла 2. Стабилизирующий газ подается между ними и обеспечивает проникновение плазмы 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  $b$ , и возникает факел плазмы. При касании дежурным факелом кромки металла возникает цепь силовой плазменной дуги и начинается 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. 8.17, б).

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.

Наряду с мощными плазмотронами для автоматизированной машинной резки применяется плазморежущая аппаратура для переносных машин и ручной резки. Плазмотроны этих установок имеют низкое (до 180 В) напряжение холостого хода источник питания, ток — до 400 А.

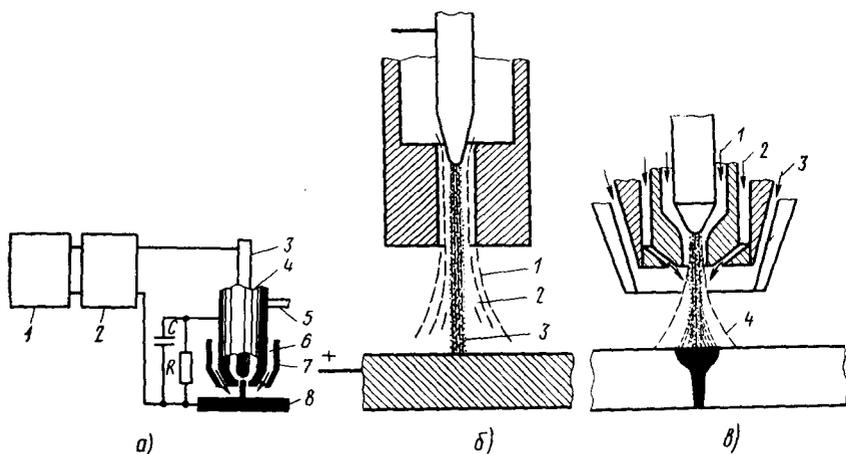


Рис. 8.18. Схема проведения плазменной сварки:

а — электрическая схема; 1 — сварочный источник питания; 2 — высокочастотный генератор; 3 — неплавящийся электрод; 4 — плазмообразующий газ; 5 — охлаждающая вода; 6 — защитный газ; 7 — сопло для защитного газа; 8 — изделие; б — схема газовых потоков, окружающих плазменную дугу; 1 — наружный холодный поток; 2 — внутренний горячий поток; 3 — столб дуги; в — схема плазменной дуги; 1 — плазмообразующий газ, 2 — фокусирующий газ; 3 — защитный газ; 4 — очертание факела при отсутствии фокусирующего газа

Плазмотроны, выполняемые по схеме (рис. 8.17, *а*), являющейся основной при плазменной резке, рассчитывают на рабочий ток, а напряжение дуги формируется в полости реза. Вследствие этого вольт-амперные характеристики дуги здесь вертикальные, а источники питания имеют вертикальные или крутопадающие внешние ВАХ.

Плазменную сварку металлов проводят с помощью плазмотронов по схеме, приведенной на рис. 8.18.

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.

Применение вторичного фокусирующего газового потока, направленного под углом к оси плазмотрона, позволяет сконцентрировать нагрев на малой площади сварочной ванны. Применяемые газы обеспечивают защиту сварочного шва от воздействия атмосферы.

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

В состав установки по схеме рис. 8.18, *а* входит источник питания 1, представляющий собой трехфазный двухполупериодный выпрямитель с регулируемым значением сварочного тока и крутопадающей ВАХ; высокочастотный генератор 2 — осциллятор, служащий для возбуждения дежурной дуги между внутренним соплом и электродом 3 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 8 светящейся частью струи плазмы. Тогда по цепи потечет сварочный ток, разогревающий металл 8 в точке воздействия плазмы и образующий сварочную ванну. Если бы в плазменную горелку подавался только один газ, как это делалось ранее (рис. 8.18, *б*), то помимо чрезмерно большого расхода аргона технологические свойства плазменной дуги были бы недостаточны для выполнения качественной сварки. Столб дуги 3, окруженный потоками холодного газа 2 и 1, имеет возможность самопроизвольно перемещаться по поверхности сварочной ванны.

Для более четкого ориентирования плазмы в точку сварки и улучшения проникновения столба дуги в глубину сварочного шва с одновременным уменьшением расхода аргона применяются плазменные горелки, выполненные по схеме рис. 8.18, *в*. Здесь помимо аргона, подаваемого для зажигания дежурной дуги и образования плазмы, подается фокусирующий менее дефицитный газ 2, производящий сжатие и фокусировку плазменной струи. При этом значительно повышается температура плазмы, что бла-

гоприятно влияет на процесс сварки. Защитный газ  $Z$  предотвращает возможность попадания в зону сварки вредных компонентов из окружающей среды. Размеры электродов зависят от тока дуги и расхода газов, а расстояние между горелкой и деталью выбирают в пределах 8—15 мм из условия формирования качественного сварочного шва.

В цепях включения источника питания имеется блокировка, не позволяющая включить плазмотрон без подачи охлаждающей воды и газов.

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.

В институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР разработан способ и создана аппаратура микроплазменной сварки на постоянном токе 0,5—10 А деталей из нержавеющей стали, меди, титана, никеля толщиной 0,2—0,6 мм.

### § 8.5. Установки плазменного нанесения покрытий

Нанесение коррозионно-стойких, жаропрочных и других защитных покрытий осуществляется методами напыления и наплавки.

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. 8.19.

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 разрядни-

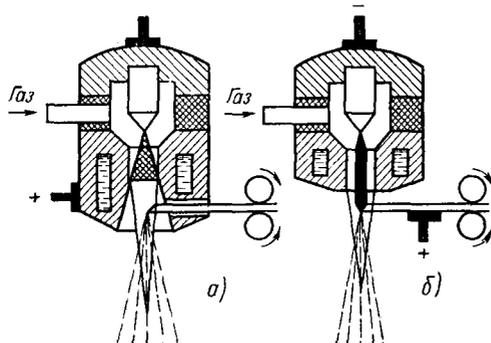


Рис. 8.19. Схемы распыления нейтральной (а) и токоведущей (б) проволоки дуговой плазмой

канал плазмотрона двумя способами: в дугу и в участок плазменной струи за дугой (рис. 8.20).

Различие в способах введения порошка определяется его теплофизическими свойствами. Тугоплавкие порошки вводятся в зону дуги, легко расплавляемые — в струю плазмы. При этом обеспечиваются разное время пребывания в зоне высоких температур и разный уровень теплового воздействия на частицу.

При плазменной наплавке изделие и наносимый материал включаются в цепь тока через токоограничивающие сопротивления (рис. 8.21). Скорость подачи материала и перемещения горелки по обрабатываемой поверхности согласуется с тепловой мощностью плазменной струи и контролируется технологом.

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.

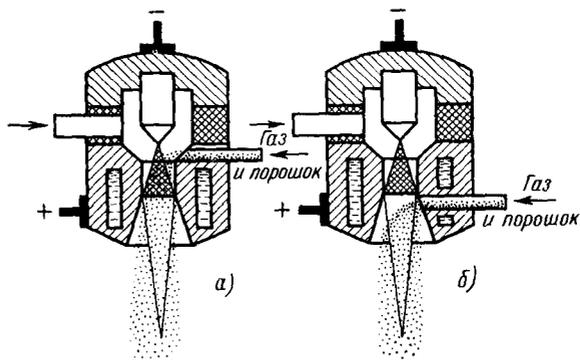


Рис. 8.20. Схема ввода напыляемого порошка в столб плазменной дуги (а) и плазменную струю (б)

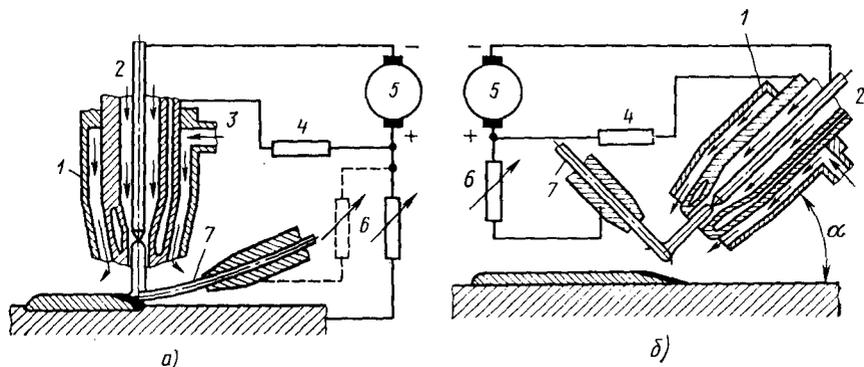


Рис. 8.21. Схема наплавки с присадочной проволокой:

а — изделие под током; б — изделие обесточено; 1 — горелка; 2 — ввод плазмобразующего газа; 3 — канал для ввода защитного газа; 4 — ограничительное сопротивление; 5 — источник питания; 6 — балластное сопротивление; 7 — присадочная проволока

Компонентами установок плазменного нанесения покрытий являются дозаторы наносимого материала, источники электрического питания, система газоснабжения и охлаждения плазмотрона.

Кроме описанных имеется большое количество других плазменных процессов, в результате которых происходит модификация материала (сфероидизация частиц, травление и испарение поверхности). Описание этих процессов можно найти в специальной литературе.

## Глава 9

### УСТАНОВКИ ДУГОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ

#### § 9.1. 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 физических 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.

Обычно шлаки состоят из оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{NiO}$  и т. п. и солей различных веществ  $\text{CaS}$ ,  $\text{MnS}$ ,  $\text{CaF}_2$  и др. Шлак, окружающий капли металла при переходе их через дуговой промежуток, и шлаковый покров на сварочной ванне

не улучшают свойства наплавленного металла. Присутствующие в шлаке легко ионизирующиеся элементы повышают устойчивость горения дуги, что особенно важно при сварке на переменном токе.

Входящие в состав 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, стекание 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 расплавленного за единицу времени металла

$$G = \alpha_n I \tau,$$

здесь  $\alpha_n$  — коэффициент плавления, г/ч;  $I$  — ток дуги, А;  $\tau$  — время горения дуги, ч.

Вследствие потерь расплавленного металла количество фактически наплавленного металла оценивается коэффициентом наплавки  $\alpha_n$ , который на 5—20% меньше коэффициента плавления.

Значение  $\alpha_n$  для электродов с различными покрытиями составляет 7—13 г/(А·ч). Знание коэффициента наплавки важно при юрмировании сварочных работ. Скорость сварки (см/ч)

$$v = \alpha_n I / (\gamma F),$$

де  $\alpha_n$  — коэффициент наплавки г/(А·ч);  $\gamma$  — удельная масса наплавленного металла ( $\gamma_{\text{стали}} = 7,85$  г/см<sup>3</sup>);  $F$  — площадь поперечно-о 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  $(4,5 \div 8) \cdot 10^3$  К капля металла является холодной, однако вследствие высокой концентрации электронов имеет более высокую электрическую проводимость и шунтирует часть столба электрической дуги. Это определяет низкое значение линейного градиента потенциалов столба дуги. Вследствие малой протяженности столба дуги (4—7 мм) и низкого значения линейного градиента потенциалов между приэлектродными пятнами дуги реализуется напряжение 8—12 В. Если учесть, что в структуру напряжения дуги входят компоненты анодного и катодного падений напряжения, значения которых зависят от тока дуги, материала электродов и изменяются в узких пределах ( $U_a = 2 \div 12$  В,  $U_k = 8 \div 14$  В), то напряжение на сварочной дуге составляет 18—45 В. При некотором увеличении тока напряжение, необходимое для горения дуги, снижается и ВА дуги приобретает падающий характер.

В области больших токов ВАХ становится жесткой и слабо возрастающей. 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 падающей и жесткой участков ВАХ дуги напряжение холостого хода источника питания должно быть  $U_x = (1,4 \div 2,2) U_d$  при крутопадающей внешней характеристике. Это дает напряжение 55—80 В, что обеспечивается источниками сварочного тока. Следует отметить, что напряжение источников питания дуговой сварки безопасно для человека; это обусловило широкое развитие ручной дуговой сварки.

Особенности дуги переменного тока и меры, принимаемые для повышения ее устойчивости, описаны ранее. 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 крытой дугой имеет вид  $U_z = (1,3 \div 2,5) U_d$ . При сварке на больших токах под флюсом напряжения зажигания дуги почти равны напряжению горения.

*По степени механизации* различают сварку ручную, полуматематическую и автоматическую. Отнесение процесса к тому или другому 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 производ-

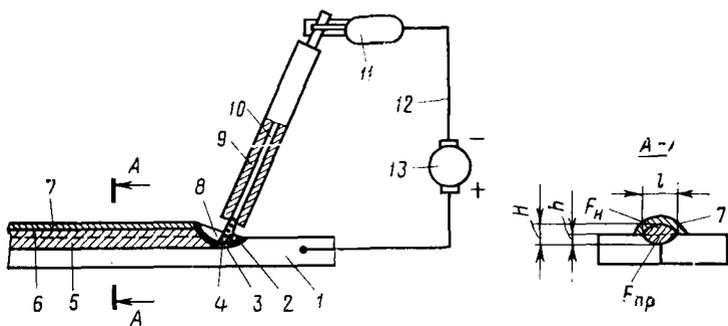


Рис. 9.1. Схема ручной дуговой сварки:

1 — основного 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 — электрододержатель; 12 — сварочная цепь; 13 — источник питания

дится плавящимся электродом с покрытием (рис. 9.1) или неплавящимся электродом с газовой защитой.

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. 9.2,а) автоматизировано большинство технологических операций. Сварочная проволока 2 и гранулированный флюс 1 подаются в зону дуги, горячей 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 сварочной 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.

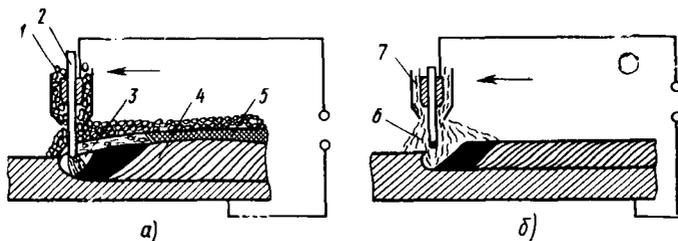


Рис. 9.2. Схема сварки под флюсом (а) и в среде защитных газов (б)

При сварке в защитном газе (рис. 9.2,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 дуга между обоими электродами. Эта дуга по отношению к свариваемому изделию является независимой и обеспечивает расплавление электродов.

Сварка трехфазной дугой характеризуется высокой стабильностью процесса, так как 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. Этот вид сварки отличается высокой производительностью, превышающей производительность сварки вольфрамовым электродом, и пригоден для сварки всех металлов, в том числе всевозможных легированных сталей, меди, никеля и их сплавов, титана, алюминия, алюминиевых и магниевых сплавов, которые свариваются без применения флюсов. Важным преимуществом такой сварки является то, что в процессе работы сварщик может видеть место сварки и регулировать процесс.

Газоэлектрической сваркой может быть назван способ, при котором теплота для плавления металла получается не только за счет дугового разряда, но и за счет химических реакций, присходящих в газовой фазе.

*Дуговая сварка в углекислом газе* выполняется как неплавящимся, так и плавящимся электродом на автоматах и полуавтоматах.

## § 9.2. 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. 9.3,а, кривая 1), внешняя ВАХ источника питания должна быть крутопадающей (рис. 9.3,а, кривая 2). Чем больше крутизна падения ВАХ источника питания (ИП) в рабочей точке  $K$ , тем меньше колебания тока при случайных изменениях длины дуги и условий ее горения. При таких характеристиках напряжение холостого хода ИП в 1,8—2,4 раза больше напряжения дуги. Кроме того, ограничивается значение тока короткого замыкания в пределах  $1,25 < I_k/I_d < 2$ .

При автоматической сварке под флюсом с саморегулированием дуги, имеющей жесткую характеристику, ВАХ ИП должна быть пологопадающей (рис. 9.3,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. 9.3,б, кривая 1). В этом случае внешняя характеристика ИП для еще большей интенсивности саморегулирования должна быть жесткой или возрастающей (рис. 9.3,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

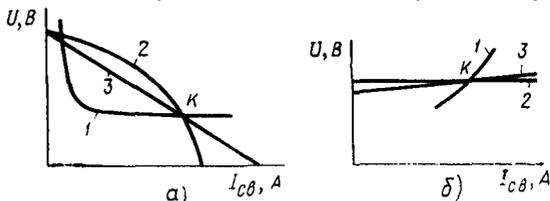


Рис. 9.3. Падающие (2 и 3) внешние характеристики источника питания при жесткой (1) статической характеристике дуги (а); жесткая (2) и возрастающая (3) внешние характеристики источника питания при возрастающей (1) статической характеристике дуги (б)

ся 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 ГОСТу 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:

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

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  $\text{ПР} = 60\%$ . 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).

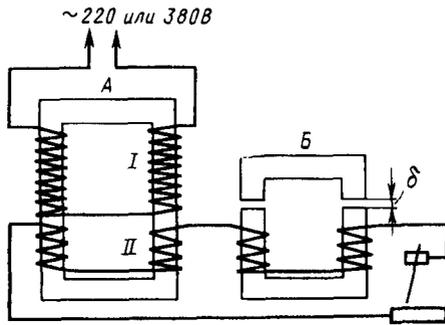


Рис. 9.4. Схема сварочного аппарата с отдельным регулятором

Трансформаторы с отдельным дроссельным регулятором (рис. 9.4), 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.

Регулятор тока — дроссель Б состоит из магнитопровода (ярма) и обмотки, расположенной на неподвижной части магнитопровода (якоре). Между ярмом и якорем имеется воздушный зазор  $\delta$ , изменяя который 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. 9.5) отличается от предыдущего тем, что на общем магнитопроводе находятся три обмотки: первичная I и вторичная II обмотки трансформатора и обмотка регулятора II<sub>р</sub>,

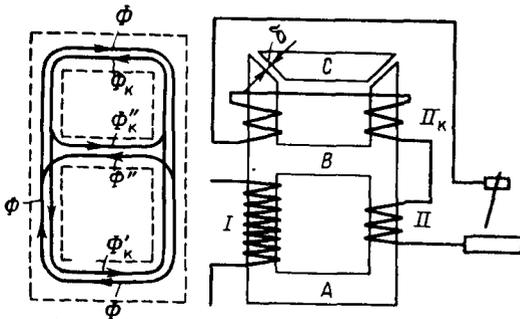


Рис. 9.5. Электромагнитная схема трансформатора СТН со встроенным регулятором

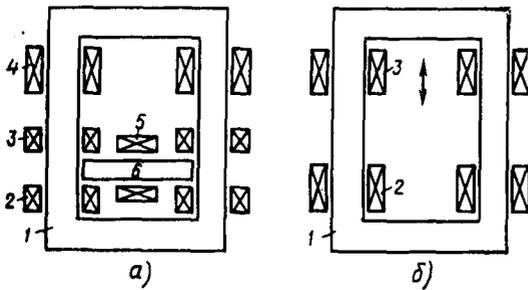


Рис. 9.6. Схемы сварочных трансформаторов

включенная последовательно со вторичной обмоткой.

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

К преимуществам трансформатора в этой системе следует

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

Трансформаторы с повышенным магнитным рассеянием получили наиболее широкое распространение при ручной дуговой сварке, где регулирование сварочного тока осуществляется изменением расстояния между первичной и вторичной обмотками или подвижным магнитным шунтом. Это изменяет сопротивление потока рассеяния и индуктивность трансформатора. Чем больше сопротивление шунтирующей цепи, тем меньше индуктивность рассеяния трансформатора и больше сварочный ток.

У трансформаторов с подмагничиваемым шунтом ТДФ вторичная обмотка состоит из двух частей (рис. 9.6,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 больший сварочный ток. Трансформаторы с подвижными обмотками (рис. 9.6,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.

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

Количество подключаемых к трансформатору постов

$$n = I_{\text{тр}} / (I_n k),$$

здесь  $I_{\text{тр}}$  — номинальный ток сварочного трансформатора, А;  $I_n$  — сварочный ток поста, А;  $k$  — коэффициент загрузки (0,6—0,8).

Многопостовая сварка осуществляется от однофазного (а) или трехфазного (б) трансформатора. Электрическая схема многопостовой сварки на переменном токе показана на рис. 9.7. Первичная обмотка 1 подключается к питающей сети.

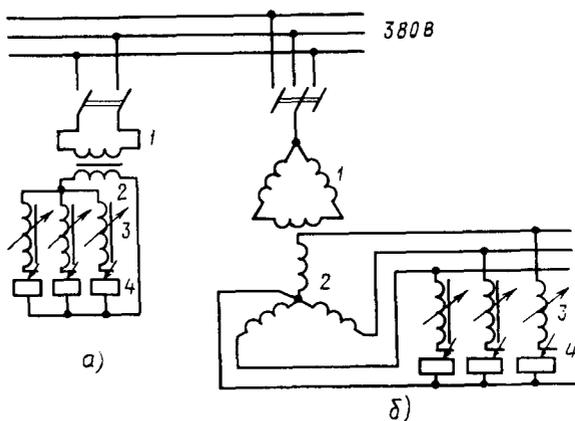


Рис. 9.7. Схемы многопостовой сварки на переменном токе от источника с жесткой внешней характеристикой:

а — однофазного; б — трехфазного

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:

1. Генераторы с расщепленными полюсами и с поперечным полем, у которых падающая внешняя характеристика достигается за счет размагничивания основного поля генератора магнитным полем реакции якоря.

2. 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.

3. 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.

В генераторах с расщепленными полюсами предусмотрен двойной способ регулировки сварочного тока: сдвигом щеток (гру-

бая регулировка) и реостатом в цепи регулируемой обмотки (тонкая регулировка), что позволяет расширить пределы изменения тока без существенного изменения напряжения холостого хода генератора. Сдвиг щеток против направления вращения якоря генератора ослабляет размагничивающее действие потока реакции якоря и увеличивает ток короткого замыкания (сварочный ток). Сдвиг же щеток по направлению вращения якоря уменьшает ток короткого замыкания.

Централизованная схема питания сварочных постов с помощью многопостовых сварочных генераторов имеет ряд преимуществ перед однопостовыми сварочными агрегатами: снижаются затраты на приобретение, ремонт и обслуживание сварочных постов; уменьшается потребность в производственных площадях; увеличивается коэффициент использования сварочного оборудования и т. д.

Для обеспечения нормальной работы сварочных постов при их питании от многопостового генератора последний должен иметь жесткую внешнюю характеристику, т. е. напряжение генератора при изменении тока должно поддерживаться почти постоянным (не более 5% от номинального значения).

Сварочные посты *СП* подключаются к генератору через балластные реостаты *РВ*, сопротивление которых можно изменять в широких пределах, изменяя тем самым сварочный ток. Балластный реостат создает падающую характеристику, служит регулятором тока, ограничивает и регулирует ток короткого замыкания сварочной цепи поста в момент зажигания дуги. Одновременно с этим в нем имеются потери электрической энергии.

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

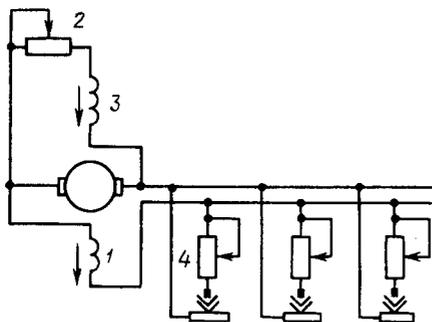


Рис. 9.8. Схема многопостового преобразователя с балластными реостатами

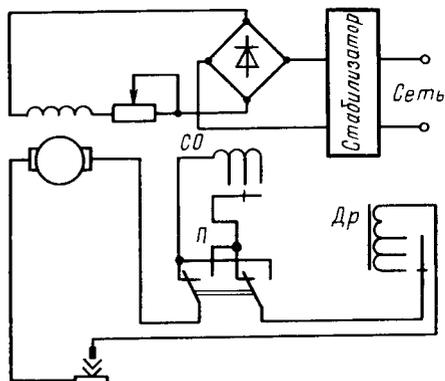


Рис. 9.9. Электрическая схема универсального сварочного генератора

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. Универсальный сварочный генератор (рис. 9.9) имеет возможности менять форму внешней характеристики и регулировать динамические свойства. Переход с падающей характеристики на жесткую осуществляется переключением серийной обмотки  $CO$  со встречного включения на согласное и соответствующим изменением числа включенных витков; регулируемый дроссель позволяет получить требуемые динамические свойства.

*Сварочные выпрямители* основаны на использовании полупроводниковой техники, применение которой позволяет значительно расширить номенклатуру источников питания для дуговой сварки. К их преимуществам следует отнести равномерную загрузку силовой сети переменного тока и лучшее использование трансформатора, питающего выпрямитель. Динамические свойства выпрямителей из-за меньшей электромагнитной инерции лучше, чем генераторов постоянного тока. Ток и напряжение изменяются при переходных процессах практически мгновенно. КПД выпрямителей также несколько выше, чем у сварочных преобразователей с генератором постоянного тока.

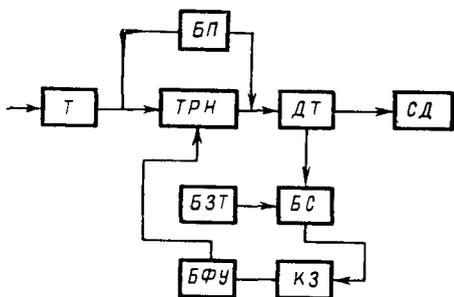


Рис. 9.10. Структурная схема сварочного тиристорного выпрямителя с падающей характеристикой:

$T$  — 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

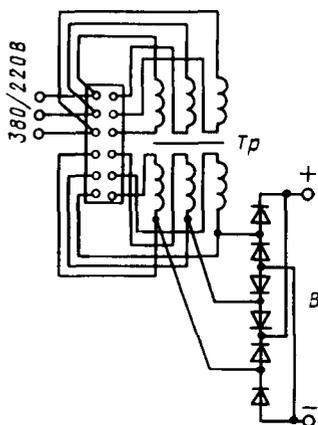


Рис. 9.11. Принципиальная схема сварочного выпрямителя ВСС-300-3

По сравнению со сварочными трансформаторами трехфазные выпрямители 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. 9.10.

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.

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).

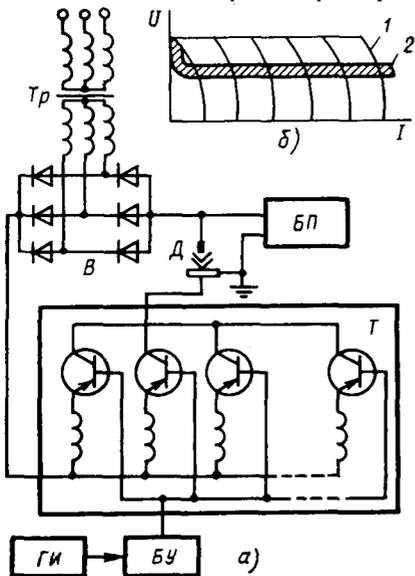


Рис. 9.12. Принципиальная схема и внешние характеристики аппаратов типа АП

Выпрямитель ВСС-300 (рис. 9.11) является однопостовой сварочной установкой, состоящей из понижающего трансформатора  $T_p$ , блока селеновых шайб  $B$ , пускорегулирующей аппаратуры, смонтированной в общем кожухе, и вентилятора. Трехфазный понижающий трансформатор выполнен с увеличенным магнитным рассеянием. Это обеспечивает получение семейства падающих внешних характеристик.

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

Таблица 9.1

Источник сварочного тока	Технические данные							Габаритные размеры, мм	Масса, кг
	Номинальный сварочный ток при ПВ=60%, А	Предел регулирования тока, А	Напряжение на дуге, В	Напряжение холостого хода, В	Первичное напряжение	Мощность, кВт·А	Габаритные размеры, мм		
Источники переменного тока — трансформаторы									
ТСД-1000-3	1000	400—1200	42	69/78	220/380	76	950×818×1215	540	
ТСД-2000-2	2000	800—2200	53	72/84	380	180	1050×900×1300	670	
ТДФ-1001	1000*	400—1200	44	68/71	220/380	82	1200×830×1200	720	
ТДФ-1601	1600*	600—1800	44	95—105	380	182	1200×830×1200	1000	
ТДФ-2001	2000*	800—2200	50	74—79	380	170	1200×830×1200	980	
Источники постоянного тока — выпрямители									
ВС-300	300	30—300	—	20—40	380	17	560×720×965	250	
ВСЖ-303	315	50—315	—	18—50	220/380	20	710×550×955	280	
ВДГ-302	315	50—315	16—38	30—55	220/380	19	1045×748×959	275	
ВС-600	600	60—600	—	20—40	380	35	1000×805×1510	490	
ВДГ-601	630	100—700	18—66	66	220/380	67	1234×868×1081	525	
ВДУ-504	500	70—500	18—50	72—78	220/380	40	1275×816×940	380	
ВДУ-1001	1000*	300—1000	24—66	24—66	380	105	950×1150×1850	750	
ВДУ-1601	1600*	500—1600	26—66	26—66	380	165	950×1150×1850	950	
Источники для сварки постоянным током — преобразователи									
ПД-501	500	125—500	40	55—90	220/380	28**	1075×650×1085	454	
ПСГ-500	500	60—500	40	16—40	220/380	28**	1055×580×920	500	

\* Номинальный ток при ПВ=100%. \*\* Мощность — в кВт.

ного тока производится переключением обмоток трансформатора со звезды на треугольник.

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

Для аргоно-дуговой сварки металлов малых толщин постоянным и импульсным токами применяются транзисторные преобразователи серии АП (рис. 9.12). Они состоят (рис. 9.12,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. 9.12,б). Для получения импульсной дуги в цепи управления имеется генератор импульсов регулируемых амплитуд, длительности и частоты.

Технические данные некоторых сварочных источников питания приведены в табл. 9.1.

### § 9.3. 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. Это обусловило специфические требования к применяемому оборудованию и технологии сварки. Сварочные агрегаты переносного исполнения снабжены сварочными проводами соответствующего сечения (табл. 9.2).

Например, длина провода марки ПРГ (провод резиновый гибкий) или ПРГН (провод резиновый гибкий нейритовый), сплетенного из большого количества отожженных и облуженных проволочек диаметром 0,18—0,22 мм, не должна быть более 30 м, так как чрезмерная его длина вызывает значительные электрические потери и снижает КПД сварочного аппарата.

Электрододержатели 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. 9.3.

Таблица 9.2

Сила тока, А	Сечение провода, мм <sup>2</sup>	
	одинарный	двойной
200	25	—
300	50	2×16
400	75	2×25
500	95	2×35

Таблица 9.3

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	Н	Кобальт	Co	К
Молибден	Mo	М	Медь	Cu	Д
Вольфрам	W	В	Бор	В	Р
Селен	Se	Е	Азот	N	А
Алюминий	Al	Ю			

Обозначение марки сварочной проволоки может состоять из цифры, соответствующей ее диаметру в мм, букв Св, означающих «сварочная», цифр, показывающих содержание углерода, и буквенных обозначений компонентов, входящих в состав проволоки (например, 2Св-08ГС). Например, для сварки алюминия и его сплавов применяется проволока марок СвАМц, СвАМ6, АЛ9 и др.; для сварки меди и ее сплавов — проволока М1, М2; для сварки бронзы — проволока БрКМцЗ-1; латуни — проволока Л63, Л60-1 и др.

Проволоки для механизированной сварки имеют маркировку, состоящую из букв: Э — электродная, О — омедненная, Ш — электрошлаковая, ВД — воздушно-дуговая, ВИ — вакуум-индукционная.

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.

Название электродов для сварки конструкционных сталей состоит из обозначения марки электрода, типа электрода, диаметра стержня, типа покрытия и номера ГОСТа. 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, 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

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

Режим сварки металлов разной толщины и свойств определен в специальных руководствах, а качество сварочных работ в большей степени зависит от квалификации сварщика.

## § 9.4. 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 (рис. 9.13) входят горелка 1 со шлангом 2, механизм 3 подачи электродной проволоки, кассета или катушка 5, являющаяся контейнером для электродной проволоки, шкаф или блок управления 4, если он объединен с источником питания; провода для сварочной цепи 10 и цепей управления 9, аппаратура для регулирования и измерения параметров подачи газа 8 (при сварке в углекислом газе); шланг 6, источник питания 7.

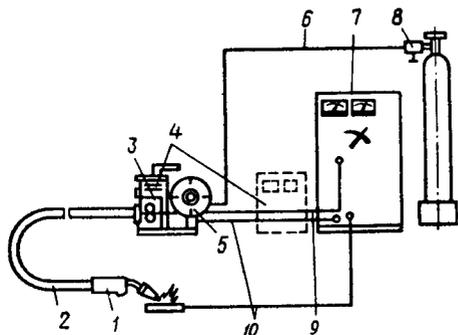


Рис. 9.13. Схема шлангового полуавтомата для сварки в защитных газах

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

Горелки для сварки изготовляют на определенный ток, который выбирают из стандартного ряда токов: 125, 160, 220, 250, 315, 400, 500, 630 А. Горелки имеют естественное или принудительное воздушное или водяное охлаждение. На

Таблица 9.4

Сварочный полуавтомат	Номинальный сварочный ток при ПВ=60%, А	Источник сварочного тока	Способ защиты дуги	Диаметр электродной проволоки, мм	Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	Способ регулирования скорости подачи	Длина шланга, м	Масса подающего устройства, кг	Тип горелки
А547У	315	ВС-300	Г	0,8—1,4	160—640	П/С	1,5; 2,5	6,25	А547, А547УМ
А825М	315	ВС-300	Г	0,8—1,4	140—650	П/С	1,5; 2,5	11	А825М
А1230М	315	ВДГ-302	Г	0,8—1,4	145—680	П/С	1,5; 2,5	10	А547УМ
ПДГ-305	315	ВДГ-302	Г	0,8—1,4	120—1200	П	2,5	12,5	ГДПГ-201-8
ПДГИ-302	315	ВДГИ-301	Г	1,2—2	120—1200	П	2	13	ГДПГ-301-8
А765	500	ПСГ-500	О	2—3,5	72—720	С	3	20	А1231-О
А1197С	500	ВС-600	Ф, Г	1,6—2	92—920	С	3	20	А1231-Г, А1231-Ф
А1197П	500	ВДУ-504	Г	1,6—2 (2—3,2)	92—920	П	3	23	А1231-Г
ПДГ-502	500	ВДУ-504	Г	1,6—2	120—1200	П	3	13	ГДПГ-501-4
ПДГ-508	500	ПСГ-500	Г	1,6—2	73—720	С	3	20	А1231-Г
ПДГ-601	630	ВДГ-601	Г	1,2—2 (3,5)	120—760	П	3	23	ГДПГ-301-8 ГДПГ-603

Примечание. Г — сварка в защитных газах; О — сварка без газовой защиты; Ф — сварка под флюсом; С, П; П/С — ступенчатое, плавное, плавно-ступенчатое регулирование скорости подачи; цифры в скобках — для порошковой проволоки.

Сварочный трактор	Способ защиты дуги	Номинальный сварочный ток при ПВ=100%, А	Диаметр электродной проволоки, мм	Скорость электродной подачи, м/ч	Способ регулирования скорости подачи	Скорость сварки, м/ч	Габаритные размеры сварочного трактора, мм	Масса, кг	Источник сварочного тока
А. Сварочные тракторы общего назначения									
ТС17М-1 (АДФ-1002)	Флюс	1000	1,6—5,0	52—403	Ступенчато	16—126	715×345×540	45	ТДФ-1001
ТС42	»	1000	2,0—5,0	60—1000	»	12—120	700×310×450	40	ТДФ-1001
ТС35	»	1000	1,6—5,0	50—500	»	12—120	850×530×490	45	ТСД-1000
АДС-1000-4	»	1200	2,0—5,0	60—360	Плавно	12—120	1010×370×665	65	ТДФ-1001
АДФ-1001	»	1000	3,0—5,0	60—360	»	12—120	1050×365×656	60	ВДУ-1001*
АДФ-1602	»	1600	3,0—6,0	60—360	»	12—120	1050×365×656	60	ВДУ-1001**
ТС42	Газ	500	1,2—3,0	60—1000	»	12—120	570×310×440	36	ВДУ-504-1
АДПГ-500	»	500	0,8—2,5	150—720	Ступенчато	15—70	570×265×425	22	ПСГ-500
АДГ-502	»	500	1,2—2,0	108—720	Плавно	12—120	845×365×670	60	ВДУ-504-1
АДФ-501	Флюс	500	1,6—2,5	60—360	»	12—120	1050×305×656	60	ВДУ-504
Б. Сварочные тракторы специализированные									
А1698	Газ	350	1,2—1,6	150—500	Плавно-ступенчато	15—45	420×220×285	13	ВСЖ-303
ТС49	»	250	0,8—1,2	210—320	Ступенчато	50—75	500×230×440	22	ВС-300
ТС32	Флюс	900	2,0—5,0	131—284	»	24—50	805×495×440	45	ТДФ-1001
ТС44	»	1500 2000	3,0—6,0	0—360	Плавно	0—45	940×610×320	115	ВДУ-1601
ДТС38	»	2×1600	2,0—5,0	58—580	Ступенчато	16—160	900×410×930	85	ТДФ-1601-1 (2 шт.)

\* Исполнение трактора АДС-1000-5. \*\* Исполнение трактора АДФ-1000-4. \*\*\* Применяются различные источники тока в соответствии с принятым технологическим процессом.

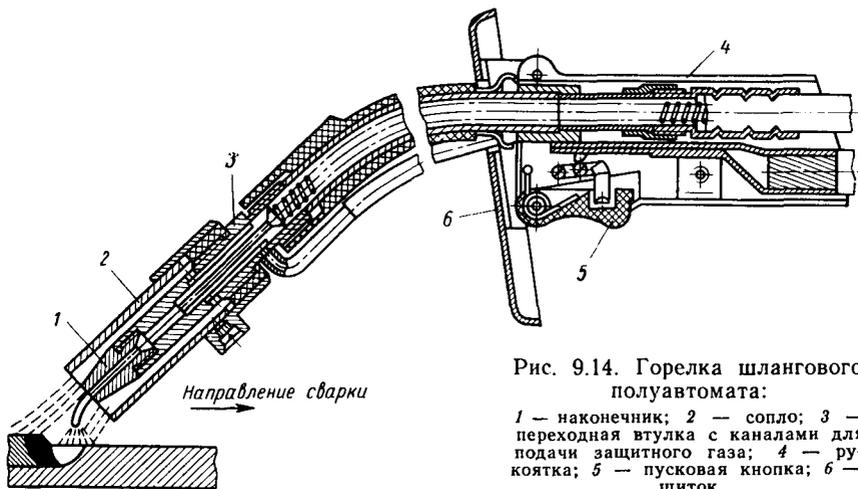


Рис. 9.14. Горелка шлангового полуавтомата:

1 — наконечник; 2 — сопло; 3 — переходная втулка с каналами для подачи защитного газа; 4 — рукоятка; 5 — пусковая кнопка; 6 — щиток

рис. 9.14 приведена конструкция наиболее распространенной горелки, применяемой в полуавтоматах А547У и А1197П. Проволока подается к месту сварки по оси шланга, проходит через наконечник 1. Шланг, как правило, имеет длину 3 м. Технические данные некоторых полуавтоматов приведены в табл. 9.4.

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

Сварочные автоматы снабжены механизмами передвижения, корректировки направления и положения электрода, сматывания электродной проволоки, устройствами подачи и отсоса флюса, 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  $U=32 \div 24$  В при  $I=180 \div 300$  А и  $U=40 \div 44$  В при  $I=1000 \div 1200$  А (для электродов диаметром 2 и 5 мм под флюсом АН/348А).

Диаметр электродной проволоки  $d_s$  (мм) можно приблизительно вычислить из формулы

$$I_{св} = 110d_s + 10d_s^2.$$

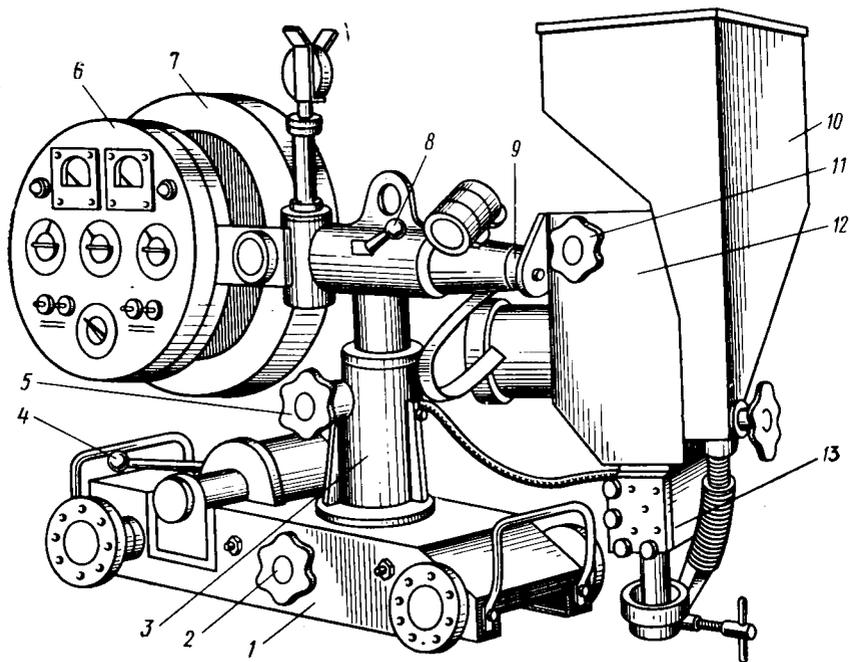


Рис. 9.15. Сварочный трактор АДС-1000-2:

1 — тележка; 2 — механизм поперечной корректировки; 3 — стойка; 4 — рукоятка муфты; 5 — зажим стойки; 6 — пульт; 7 — кассета; 8 — зажим коромысла; 9 — коромысло; 10 — бункер; 11 — рукоятка; 12 — механизм вертикальной корректировки; 13 — сварочная головка

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

Технические данные сварочных автоматов приведены в табл. 9.5.

*Сварочный трактор* — самоходный агрегат для сварки в основном под флюсом, несущий на самоходной тележке подающий механизм, сварочную горелку, механизм настроечных и корректировочных перемещений, флюсовую аппаратуру, систему управления. Многие конструктивные узлы трактора унифицированы с узлами автоматов и полуавтоматов. Существуют тракторы, перемещающиеся по изделию и перемещающиеся по рельсам. На рис. 9.15 показан сварочный трактор АДС-1000-2. Тележка трактора снабжена отдельным приводом от регулируемого электродвигателя постоянного тока. С помощью цепной передачи вращение передается на обе оси тележки.

Технические характеристики некоторых тракторов приведены в табл. 9.6.

Объем сварки швов сложной формы среди других видов сварки с каждым годом увеличивается, что делает актуальной проблему

Таблица 9.6

Сварочный автомат	Номинальный сварочный ток при ПВ=100%, А	Исполнение	Способ защиты дуги	Электродная проволока		Скорость сварки (наплавки), м/ч	Источник сварочного тока
				диаметр (ширина ленты), мм	скорость подачи, м/ч		
<b>А. Автоматы общего назначения для сварки плавящимся электродом</b>							
АБСК	300—1200	Самоходный	Флюс	2—6	28—220	14—110	ТДФ-1001
А1401	1000	»	»	2—5	53—532	12—120	ТДФ-1001
А1410	2000	»	»	2—6	53—532	24—240	ТДФ-1601
А1416	1000	»	»	2—5	47—508	12—120	ВДУ-1001
А1419	2000	»	»	2—6	47—508	24—240	ТДФ-1601
А639	2×1000	»	»	2—5	28—225	14—110	ТДФ-0101 2 шт.
А1412	2×1600	»	»	2—5	53—532	24—240	ТДФ-1601
А1422	2×1600	»	»	2—5	47—508	24—240	ТДФ-1601 2 шт.
УДФ-1001	3×1000	»	»	2,5—3	200—600	18—50	ТШС-1000-3
А1373	3×1800	»	»	3—5	100—500	45—270	ЭХСТ-2000
А1002	800	»	Газ	3—5	84—700	8—120	ПСМ-1000
А1417	1000	»	»	2—5	47—508	12—120	ВДУ-1001
<b>Б. Автоматы общего назначения для наплавки плавящимся электродом</b>							
А580М	400	Подвесной	Флюс	1—3	48—408	—	ПСО-500
А384МК	1000	»	»	3—5 (20—100)	28,5—225	—	ПСО-500
А874Н	1000	Самоходный	Флюс или без внешней защиты	2—7 (15—100)	5,0—9	5—116	ВДУ-1001

\* Применяются различные источники тока в соответствии с принятым технологическим процессом.

Сварочный автомат	Номинальный сварочный ток при ПВ=100%, А	Исполнение	Способ защиты дуги	Электродная проволока		Способ регулирования скорости подачи	Скорость сварки (наплавки), м/ч	Источник сварочного тока
				диаметр (ширина ленты), мм	скорость подачи, м/ч			
<b>В. Автоматы специализированные для сварки плавящимся электродом</b>								
A1423	300	Подвесной	Флюс	1,6—3	45—450	Плавно	—	ВДУ-504 или ВС-600
A1403	2×1600	Самоходный	»	2—5	53—530	»	24—240 (ступенчато)	ТДФ-1601, ТДФ-1001
A1425	1000	»	»	4—5	50—500	»	12—120	ТДФ-1601
A1411	1000	»	СО <sub>2</sub>	2—3	53—532	»	12—120	ВДГ-1001
A1611	2×1000	»	Флюс	3—5	53—530	Ступенчато	12—120	ТДФ-1601 2 шт.
A1569	400	Подвесной	»	2—3	50—350	Плавно	—	ВКСМ-1000
<b>Г. Автоматы специализированные для наплавки плавящимся электродом</b>								
A1406	1000	Подвесной	Без внешней защиты, флюс или углекислый газ	2—5	50—500	Плавно	—	ВДУ-1001
A1408	500	»	Без внешней защиты или углекислый газ	1,6—3	50—500	»	—	ВДУ-504
A1409	300	»	Без внешней защиты или флюс	1,6—3	50—500	»	—	ВДУ-504
<b>Д. Автоматы общего назначения для сварки неплавящимся электродом</b>								
A1272	800	Подвесной	Аргон	2—3 (присадка)	10—300	Плавно	—	ИПД-1000-2
АГВ-5	300	»	»	1—2 (присадка)	12—920	»	—	ПС-500, ИПП-300П
АДСВ-5	300	Самоходный	»	1—4 (электрод) 1—2 (присадка)	10—100	»	10—90	ИПД-300М, ПСО-300

автоматизации этого процесса. Для ее решения разрабатываются системы, следящие за направлением сварного шва, системы ориентирования горелок и свариваемых деталей, приводы и манипуляторы.

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 отработке 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).

Для систем кинематического программного управления характерно, что траектории перемещений, а также параметры режимов задаются в виде геометрических аналогов (моделей) и смену программы производят путем замены аналогов.

Системы с числовым программным управлением (ЧПУ) отличаются тем, что информация о траекториях перемещений, а также о параметрах режимов задается в алфавитно-цифровом виде, а переработка этой информации осуществляется с применением методов и технических средств вычислительной техники. Системы ЧПУ — наиболее гибкое средство автоматизации манипуляционных систем технологического оборудования в целом, в том числе сварочного. В настоящее время установки с ЧПУ применяются, например, для сварки плоских секций кузовов железнодорожных вагонов-рефрижераторов. Здесь реализовано программное управле-

ние перемещением портала вдоль изделия, тележки портала поперек изделия и режимов сварки.

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.

Специализированные роботы блочно-модульной конструкции найдут применение в крупносерийном и массовом производстве для сварки изделий, требующих перемещения сварочного инструмента с одной — четырьмя степенями подвижности. Функционально неделимые роботы с пятью и более степенями подвижности и позиционной или контурной системой управления будут использоваться преимущественно в случае частой смены свариваемых объектов. Это открывает дополнительные возможности совершенствования установок электрической сварки.

## Раздел третий

---

### УСТАНОВКИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО НАГРЕВА

#### Глава 10

#### УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

##### § 10.1. 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.

К временным недостаткам этого вида нагрева следует отнести прежде всего необходимость обеспечения высокого вакуума, а также сложность изготовления, эксплуатации и высокую стоимость электронно-лучевого оборудования.

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.

Так как электроны теряют свою энергию при столкновении с молекулами и атомами вещества, то в пространстве рабочей камеры должен поддерживаться глубокий вакуум, который необходим также для защиты катода от бомбардировки положительными ионами.

Вышедший из катода электронной трубки электрон ускоряется в электрическом поле и приобретает энергию  $W_e$  (эВ)

$$W_e = m_e v^2 / 2 = e_0 U, \quad (10.1)$$

где  $m_e$  и  $e_0$  — масса и заряд электрона;  $U$  — пройденная электроном разность потенциалов, В.

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

$$P_{\text{л}} = I_{\text{л}} U_y, \quad (10.2)$$

здесь  $I_{\text{л}}$  — ток луча, А;  $U_y$  — ускоряющее напряжение, В.

Удельная мощность в луче

$$P_{\text{л}} = P_{\text{л}} / S_{\text{л}} = I_{\text{л}} U_y / (\pi r_{\text{л}}^2), \quad (10.3)$$

где  $S_{\text{л}}$  и  $r_{\text{л}}$  — поперечное сечение и радиус луча на обрабатываемой поверхности.

Сформированный пучок проходит через рабочую камеру и падает на поверхность обрабатываемого объекта. Скорость электронов при попадании на поверхность детали  $v = \sqrt{2e_0 U_y / m_e}$ .

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

$$b = 2,1 \cdot 10^{-17} U_y \gamma, \quad (10.4)$$

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

Следовательно, в ЭЛУ глубина проникновения электронов и протяженность зоны интенсивного выделения тепловой энергии составляет около  $10^{-6}$  м, и для твердых тел нагрев является чисто поверхностным. Мощность рентгеновского излучения в энергетическом балансе ЭЛУ составляет доли процента и его можно не учитывать. Однако его биологическое воздействие представляет опасность для обслуживающего персонала. Поэтому при конструировании и изготовлении ЭЛУ должны быть предусмотрены специальные мероприятия по защите обслуживающего персонала от воздействия рентгеновского излучения.

Рассмотрим явления, связанные со вторичной эмиссией электронов с бомбардируемой электронным лучом поверхности металла. Значительно перегретая (на 200—1000 К) выше температуры плавления поверхность ванны расплавленного металла представляет собой мощный источник термоэлектронной эмиссии. Мощность (Вт) термоэлектронной эмиссии, уносимая потоком электронов,

$$P_{\text{тэ}} = I_{\text{тэ}} / e_0 (\varphi + 2kT), \quad (10.5)$$

здесь  $I_{\text{тэ}}$  — ток термоэлектронной эмиссии, А;  $e_0$  — заряд электрона;  $\varphi$  — работа выхода электрона, эВ;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура, К.

Несмотря на малую мощность термоэлектронной эмиссии, ее ток, поглощаемый стенками камеры, может достигать десятков

и сотен ампер, поэтому заземление ЭЛУ должно быть надежным и рассчитанным на этот ток. Часть электронов луча отражается от поверхности металла и поглощается стенками камеры. Это приводит к довольно большим потерям мощности электронного луча (для легких металлов 5—10%, для тяжелых 15—25%) и значительно влияет на энергетический баланс ЭЛУ.

В камере ЭЛУ происходят сложные процессы взаимодействия электронов луча с атомами остаточных и выделяющихся в процессе плавки и нагрева газов, с атомами металлических паров, находящихся над поверхностью расплавленного металла и т. п.

### § 10.2. Конструкции электронно-лучевых установок

Во всех ЭЛУ имеются общие системы, сходные по своему функциональному назначению и принципу действия. Среди них можно выделить два комплекса — энергетический и электромеханический.

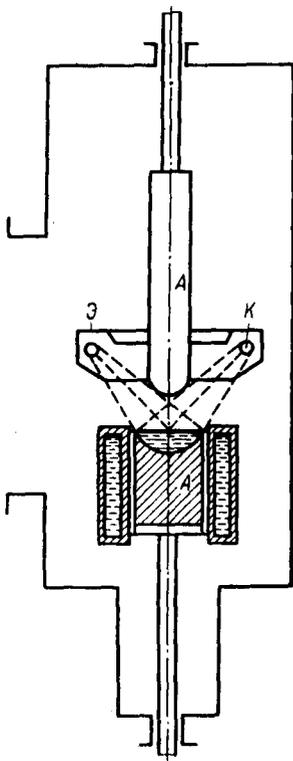


Рис. 10.1. Схема ЭЛУ с кольцевым катодом

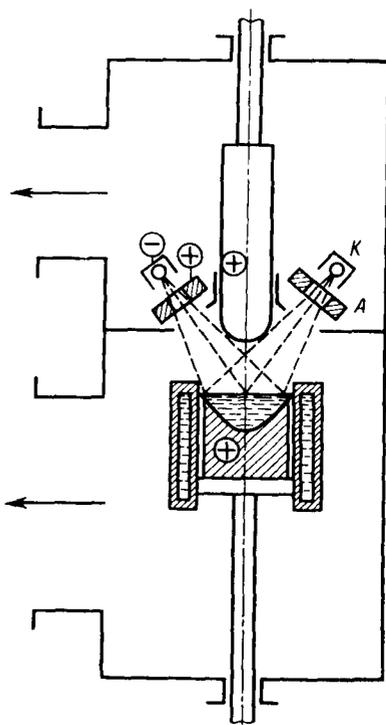


Рис. 10.2. Схема ЭЛУ с радиальными пушками

**Энергетический комплекс ЭЛУ** включает в себя электронную пушку с блоками питания и управления лучом. Электронной пушкой называется устройство, в котором эмиттируемый катодом пучок электронов формируется в электрическом и магнитном полях в луч, который ускоряется в электрическом поле, выводится через отверстие в аноде и направляется на нагреваемый объект.

Многочисленным семейством ЭЛУ являются плавильные установки. Наиболее простая схема электронной плавильной установки с кольцевым катодом и автоэлектронным нагревом, у которой анодом служит сам расплавляемый металл, показана на рис. 10.1. Катодом *K* является нагретая до 2500 К протекающим через нее током вольфрамовая спираль. Анод *A* — расплавляемый электрод и жидкометаллическая ванна, находящаяся в верхней части образующегося в кристаллизаторе слитка. Вокруг катода расположен молибденовый экран *Э*, находящийся под тем же потенциалом. Выходящие из катода электроны отталкиваются экраном и в виде кольцевого пучка устремляются на электрод и в жидкометаллическую ванну слитка. Конец электрода расплавляется под действием бомбардирующих его электронов. Жидкий металл каплями стекает в ванну.

Поднимая и опуская электрод, можно изменять количество падающих на него электронов. Можно приподнять его так, чтобы прекратить его плавление, в этом случае металл в ванне будет перегреваться или выдерживаться при постоянной температуре.

*ЭЛУ с кольцевым катодом* работают на ускоряющем напряжении 5—15 кВ. Их преимуществами являются простота устройства и высокая проводимость, вследствие чего в них можно получить значительные токи пучка при низком напряжении. Их недостаток — нахождение катода в плавильной камере, из-за чего при газовыделении с поверхности ванны он оказывается в зоне повышенного давления. Вышедшие из катода электроны сталкиваются с частицами газов и ионизируют их. Образующиеся положительные ионы направляются к катоду и оседают на нем, что сильно снижает его эмиссионную способность и сокращает срок службы. Поэтому плавильные ЭЛУ с кольцевым катодом имеют ограниченное применение для переплава металлов с малым выделением газов.

*ЭЛУ с радиальными пушками* (рис. 10.2) в меньшей мере подвержены этому недостатку. В этих установках вокруг электрода по радиусу установлено несколько катодов и анодов с отверстиями, через которые движущиеся прямолинейно электроны проходят к концу электрода и к ванне. Таким образом, здесь анод отделен от расплавляемого металла, хотя и тот и другой находятся под одинаковым потенциалом. Анод является направляющим и форми-

рующим устройством. В данном случае система анод—катод соответствует понятию электронной пушки.

Часть установки, в которой находятся электронные пушки, отделена от плавильного пространства перегородкой с отверстиями для электрода и пучка электронов. Верхняя и нижняя части камеры имеют индивидуальные системы откачки газов. При значительном выделении газов из ванны лишь часть паров металла попадает через отверстия в верхнюю камеру и откачивается из нее насосом. Радиальные пушки работают при относительно низком ускоряющем напряжении (около 15 кВ), поэтому они имеют ограниченную мощность. Для увеличения мощности всей ЭЛУ необходимо увеличить количество радиальных пушек.

В качестве плавильных наибольшее распространение получили ЭЛУ с аксиальными пушками (рис. 10.3). В отличие от радиальной аксиальная пушка образует сильно сфокусированный электронный луч. В ней имеются два катода. Основной катод  $K$  выполнен в виде массивной вогнутой снизу вольфрамовой пластины и разогревается до 2300—2500 К электронной бомбардировкой от вспомогательного катода  $K_1$ , который выполнен в виде нагреваемой током вольфрамовой спирали. Между катодами прикладывается напряжение 3,5—5,0 кВ. Вспомогательный катод имеет отрицательный потенциал относительно основного, так что основной катод является анодом для вспомогательного. Анод  $A$  имеет специальную форму для создания в пространстве между ним и катодом такого электрического поля, которое сфокусировало бы электронный пучок так, чтобы он практически весь проходил через отверстие анода. Пройдя через анод, электронный луч попадает в лучепровод  $L$ , соединяющий катодную камеру с плавильной камерой установки, в которой находится переплавляемый электрод  $\mathcal{E}$ . Он может перемещаться горизонтально: его можно вводить под пучок или выводить из-под него. Часть электронов луча проходит мимо электрода и попадает на поверхность ванны жидкого металла, расположенной в кристаллизаторе в нижней части камеры.

Лучепровод должен защищать катодный узел от прорыва в него газов из плавильной камеры. С этой целью лучепровод снабжается

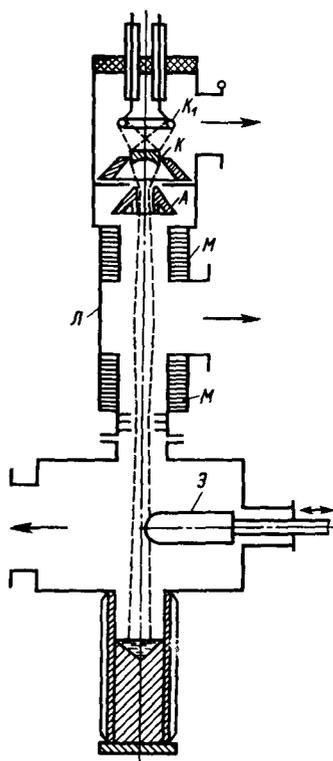


Рис. 10.3. Схема ЭЛУ с аксиальной пушкой

откачивающим насосом, кроме того, имеются насосы, откачивающие газы и пары из катодного узла и рабочей камеры. В лучепроводе производится дополнительная магнитная фокусировка с помощью магнитных линз  $M$ , поскольку на своем пути через лучепровод электронный пучок расширяется. ЭЛУ с аксиальными пушками работают при ускоряющем напряжении 30—40 кВ.

*Плавильные ЭЛУ* применяются главным образом для переплавки стали, молибдена, ниобия и других тугоплавких и химически активных металлов. Их мощность составляет от 50 (в лабораторных условиях) до 2000 кВт.

*Сварочные ЭЛУ* с особо острогофокусированным лучом работают при ускоряющем напряжении 70—100 кВ.

Для питания ЭЛУ используются высоковольтные источники питания постоянного тока. Они состоят из повышающих трансформаторов и высоковольтных выпрямителей, собираемых на тиратронах, селеновых элементах или кремниевых диодах. На крупных установках для стабилизации тока пучка применяются параметрические источники тока.

Катод является одним из основных узлов электронной пушки. Для них катоды изготавливают из тугоплавких металлов (W, Ta, Mo), оксидов редкоземельных металлов (Zr, La), а также интерметаллических соединений, например гексаборида лантана. Металлические катоды прямого нагрева применяются при небольших токах эмиссии (до 20 мА), а косвенного нагрева — при больших токах (100—200 мА). Заданная сходимости электронного луча обеспечивается подбором конфигурации катодного электрода и анода. После прохождения анода электроны движутся в пространстве, в котором отсутствует электрическое поле. Поскольку электронный луч обладает объемным пространственным зарядом, вследствие столкновения электронов происходит расфокусировка луча. Поэтому после электростатической фокусировки луч фокусируется также электромагнитной линзой, которая представляет собой катушку в магнитопроводе, питающуюся от выпрямителя, обеспечивающего стабильное напряжение и минимальную пульсацию.

Из всех видов электрических печей ЭЛУ являются наиболее сложным комплексом электротехнического оборудования. В системах электроснабжения ЭЛУ выделяются основные и вспомогательные цепи. К основным относятся цепи накала катода, питания преобразователя постоянного тока, а также цепи питания, получения, измерения и контроля вакуума; к вспомогательным — цепи фокусировки, отклонения и развертки электронного луча.

Системы питания ЭЛУ и обеспечения вакуума должны работать надежно и стабильно, поскольку от этого зависит качество переплавляемого материала.

В состав **электромеханического комплекса** входят рабочая камера, вакуумная система, системы позиционирования и перемещения заготовки, система наблюдения за ходом процесса, система

защиты оператора от рентгеновского излучения и ряд вспомогательных устройств и механизмов.

*Вакуумная камера* как базовый элемент ЭЛУ определяется видом осуществляемого технологического процесса и является одним из наиболее важных и сложных узлов электромеханического комплекса. Камера должна быть герметичной, механически прочной и жесткой. Материал камеры должен поглощать рентгеновское излучение.

Основная функция вакуумной системы — создание и поддержание в рабочем объеме и в электронной пушке необходимого вакуума, поскольку давление в зоне взаимодействия электронного луча с обрабатываемым изделием должно составлять  $10^{-1}$ — $10^{-4}$  Па.

Конструкция систем *позиционирования и перемещения заготовки* определяется видом операции. Наиболее просты устройства, применяемые при электронно-лучевой плавке (вытягивание слитка). Самые сложные системы используются при размерной обработке — они обеспечивают 5—6 видов различных перемещений с погрешностью позиционирования 1—5 мкм.

### § 10.3. Технологическое применение электронно-лучевого нагрева

Основные технологические операции электронно-лучевой обработки можно условно подразделить на четыре группы: *плавка* (технологические операции плавки в вакууме, локального переплава); *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, прутки, лом, спеченные штабики, губка).

Для технологических процессов, связанных с нагревом веществ в ЭЛУ (сварка, плавка, размерная обработка и т. п.), необходимая удельная энергия электронного луча

$$N_{\text{уд}} = 3,47\lambda T_{\text{пл}} \frac{1}{d_s \lg d_s/d_0},$$

здесь  $N_{\text{уд}}$  — удельная энергия для образования ванны расплава диаметром  $d_s$ , равным толщине металла, м;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности металла, Вт·м/К;  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления, К;

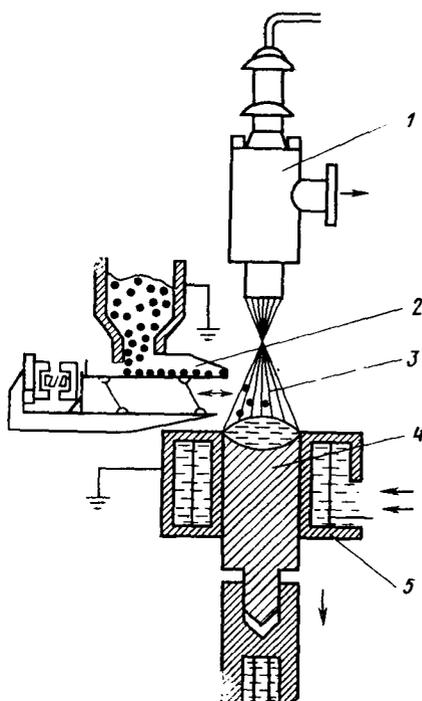


Рис. 10.4. Схема ЭЛУ для переплавки порошка:

1 — электронная пушка; 2 — переплавляемый порошок; 3 — электронный луч; 4 — переплавленный слиток; 5 — водохлаждаемый кристаллизатор

3. При плавке металла в вакууме непрерывно происходит удаление газообразных продуктов из зоны реакции, вследствие чего равновесие химических реакций  $MeO + C \rightleftharpoons Me + CO$  сдвигается вправо, т. е. резко интенсифицируются раскислительные реакции. Это повышает качество выплавляемого в вакууме металла, значительно снижает в нем содержание газов и прежде всего кислорода.

Различные установки для электронно-лучевой плавки показаны на рис. 10.1—10.3. Переплавляемый металл в виде слитка подается в зону действия ЭЛУ, где расплавляется и вытягивается из водохлаждаемого кристаллизатора с заданной скоростью и через вакуумный шлюз удаляется из рабочей камеры.

Переплавляемый металл (рис. 10.4—10.5) 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. 10.6), когда на затравку 2 наплавляется мате-

$d_0$  — диаметр участка, на краях которого температура остается неизменной.

Таким образом, основные параметры, определяющие размеры участка, расплавляемого электронным лучом, определяются теплопроводностью и температурой плавления.

Важную роль при электронно-лучевой плавке играет вакуум:

1. В вакууме происходит интенсивное удаление растворенных в металле газов, что значительно улучшает его механические свойства, особенно пластичность. Многие сплавы на основе вольфрама, молибдена, ниобия и других химически активных металлов получили промышленное применение только благодаря тому, что их выплавляют в вакууме.

2. Некоторые из вредных примесей (нитриды, карбиды, оксиды) при нагреве в вакууме разлагаются, при этом происходит вакуумное рафинирование переплавляемого металла.

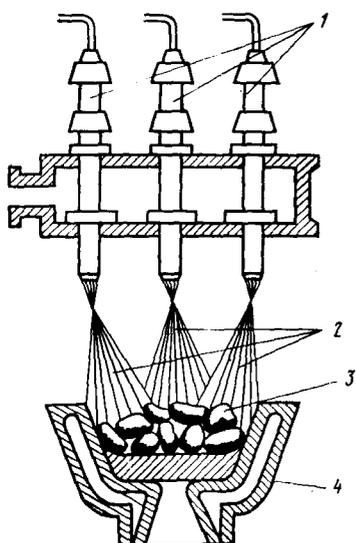


Рис. 10.5. Схема ЭЛУ для переплавки металлолома:

1 — электронные пушки; 2 — электронные лучи; 3 — переплавляемый металлолом; 4 — водоохлаждаемая форма

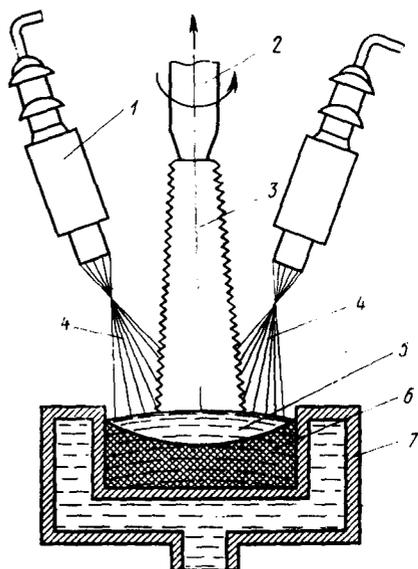


Рис. 10.6. Схема ЭЛУ для выращивания монокристаллов:

1 — электронная пушка; 2 — затравка; 3 — монокристалл; 4 — электронный луч; 5 — расплав переплавляемого материала; 6 — переплавляемый материал; 7 — водоохлаждаемый тигель

риал 5 из тигля 7 и вытягивается с заданной скоростью вертикально вверх с получением монокристалла 3.

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

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.

Такое поверхностное оплавление материала называют «облагораживающим», что позволяет для изготовления ответственных конструкций с высокими показателями износостойкости использовать недорогие исходные металлы и сплавы.

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 испа-

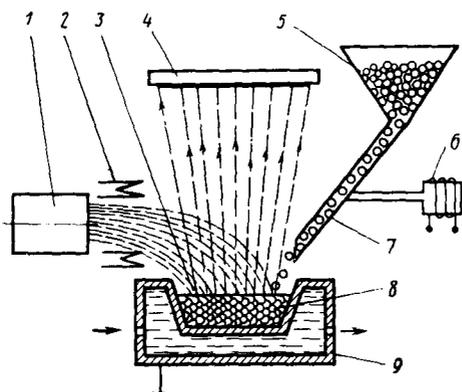


Рис. 10.7. Принципиальная схема электронно-лучевой испарительной установки

регулируя тем самым интенсивность ввода энергии в испаряемое вещество, а следовательно, скорость испарения и распределение плотности потоков пара.

Электронно-лучевое испарение применяют в микроэлектронике для нанесения различных металлических покрытий на стальную ленту, для изготовления фольги из псевдосплавов сложного состава. Электронным лучом можно испарять с последующим осаждением на подложку различные неметаллические материалы: диоксид кремния, оксид алюминия, различные виды стекла. Конденсационные покрытия применяют в оптической промышленности и в различных областях электроники.

Принципиальная схема электронно-лучевой испарительной установки для нанесения покрытий показана на рис. 10.7. Из бункера 5 испаряемый материал по желобу 7, приводимому в действие вибратором 6, поступает в водоохлаждаемый тигель 9. Траектория электронного луча 3, получаемого с помощью электронной пушки 1, искривляется отклоняющей системой 2 в направлении испаряемого вещества 8. В результате воздействия луча 3 на вещество оно испаряется, частицы пара поднимаются вверх и оседают на поверхности подложки 4, образуя плотную пленку. Применение отклоняющего магнитного поля позволяет располагать электронную пушку 1 практически в любом удобном месте.

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 электрон-

ряемой поверхности через стенку тигля или высоко температурный 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.

При электронно-лучевом испарении удается управлять электронным пучком в пространстве и во времени

ного луча на поверхность или его перемещением по поверхности с заданной скоростью.

Можно выделить три режима размерной электронно-лучевой обработки:

1. Моноимпульсный режим — обработка ведется одиночным импульсом, т. е. отверстие получают за время действия одного импульса.

2. Многоимпульсный режим — отверстие получают воздействием на заданное место заготовки несколькими импульсами.

3. Режим обработки с перемещением электронного луча по заготовке 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** 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 электронно-лучевой сварке 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.

При электронно-лучевой сварке благодаря высокой концентрации энергии в сварочной зоне сварочный шов представляет собой вытянутый клин с большим отношением длины зоны расплавления к ее ширине.

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

Установки электронно-лучевой сварки делятся на два основных типа: низковольтные с рабочим ускоряющим напряжением до 15—20 кВ и высоковольтные, работающие при ускоряющем напряжении 150—200 кВ.

Установки для электронно-лучевой сварки не имеют существенных отличий от установок для выполнения других технологических операций. Однако существуют некоторые конструктивные и схемные отличия. В состав установки включено специальное сварочное оборудование: сварочная вакуумная камера с вакуумной насосной системой, электронная пушка с высоковольтным источником постоянного тока.

Вакуумная камера обычно снабжается вакуумными вводами для передачи вращательных или возвратно-поступательных движений, подачи охлаждающей воды, подвода электрической энергии к катоду, магнитным линзам и т. д. В камерах предусмотрены специальные люки, через которые обрабатываемые детали загружаются внутрь камеры, а также механизмы и устройства, обеспечивающие технологический процесс. Снаружи устанавливают несколько приборов для определения степени вакуума в различных частях камеры.

В настоящее время электронно-лучевая технология проходит период становления и расширения сферы промышленного использования.

## Глава 11

### ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ (ЛАЗЕРЫ)

#### § 11.1. 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*.

В состоянии термодинамического равновесия распределение атомов по различным энергетическим уровням подчиняется закону Больцмана:

$$N_2/N_1 = e^{-(E_2-E_1)/kT},$$

где  $N_1E_1, N_2E_2$  — соответственно количество и энергия атомов на уровнях 1 и 2;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура.

Числа  $N_1, N_2, \dots, N_n$  называют заселенностями уровней энергии. Если на уровне 2 энергия больше, то заселенность этого уровня ниже при любой возможной температуре замкнутой системы. Состояние любой из частиц может изменяться при ее взаимо-

действии с электромагнитным полем или другими частицами. В этом случае при переходе с высокого уровня энергии  $E_n$  на нижний  $E_m$  частицы излучают электромагнитные волны, частота которых  $\nu$  определяется соотношением

$$\nu = (E_n - E_m) / h, \quad (11.1)$$

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.

Электромагнитные волны любой частоты, в том числе и свет, представляют собой поток отдельных порций энергии — квантов или фотонов, энергия которых равна  $h\nu$ . Таким образом, формула (11.1) выражает закон сохранения энергии при взаимодействии фотонов с микрочастицами, по которому энергия излученного или поглощенного фотона определяется изменением энергии частицы. Переходы между состояниями микрочастиц происходят только при взаимодействии с фотонами резонансной частоты  $\nu_{nm}$ , когда  $h\nu_{nm} = E_n - E_m$ .

Согласно квантовой теории Эйнштейна процесс взаимодействия электромагнитных волн с веществом состоит из трех элементарных актов поглощения фотона, а также его спонтанного или индуцированного излучения. 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.

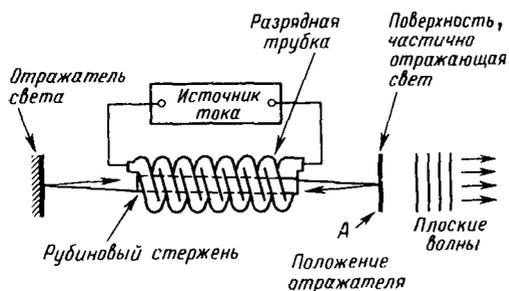


Рис. 11.1. Принципиальная схема лазера с рубиновым стержнем

Однако в любой находящейся в термодинамическом равновесии или вблизи его колонии частиц заселенности более высоких уровней энергии меньше заселенности уровней, расположенных ниже. Поэтому процессы поглощения квантов происходят чаще, чем индуцированное излучение. По этой же причине электромаг-

нитные волны резонансной частоты, взаимодействуя с такими частицами, рассеивают свою энергию и затухают.

Чтобы индуцированное излучение преобладало над поглощением, необходимо за счет внешних сил вывести систему частиц из состояния термодинамического равновесия. При этом за счет внешнего источника энергии создается более высокая заселенность одного из возбужденных состояний, чем заселенность хотя бы одного из состояний с меньшей энергией, т. е. создается *инверсная заселенность* в системе микрочастиц. И лишь в этом случае состоящая из таких частиц среда становится активной, т. е. способной усиливать волны резонансной частоты.

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 лазера с рубиновым стержнем (рис. 11.1).

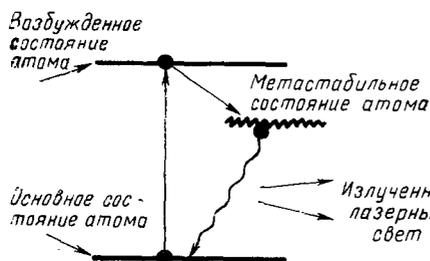


Рис. 11.2. Энергетическая диаграмма системы частиц

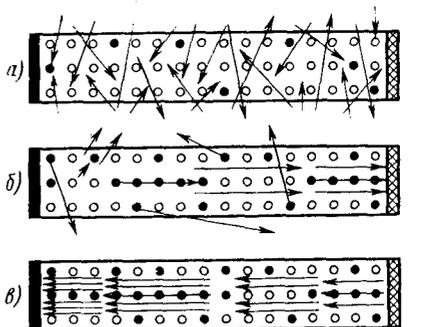


Рис. 11.3. Схема основных процессов, происходящих в активном веществе лазера при его облучении импульсной вспышкой

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

Атомы хрома, находящиеся в состоянии покоя на нижнем энергетическом уровне, под действием испускаемых импульсной лампой фотонов возбуждаются и переходят на более высокий энергетический уровень. 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. Длина волны излучаемого света при переходе из метастабильного состояния в основное равна длине волны света, благодаря которому этот переход стал возможен. 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. 11.2). 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.

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.

Таким образом, метастабильное состояние атомов является определяющим в работе лазера. Процесс перевода атомов в метастабильное состояние осуществляется с помощью подсветки разрядной трубки и представляет собой процесс заселения метастабильного уровня.

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. 11.3. 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. 11.3,а). После поглощения импульса света возбужден-

ные атомы хрома переходят на более низкий уровень, излучая при этом избыток энергии в форме электромагнитных колебаний, в том числе и в видимой области спектра.

Часть излучаемой атомами энергии рассеивается наружу через стенки стержня (рис. 11.3,б). Другая часть, направленная в виде фотонов параллельно оси стержня (рис. 11.3,б—г), по пути своего движения вызывает цепную реакцию образования новых фотонов за счет взаимодействия с находящимися в стержне возбужденными атомами. Возникший поток световой энергии многократно отражается от отражателей на концах рубинового стержня, лавинообразно нарастает при каждом отражении и в конечном счете в виде мощного светового луча выходит из торца стержня в том месте, где отражатель имеет меньшую толщину (штриховка на рис. 11.3). Если теперь на пути этого светового потока поставить линзу, то всю энергию потока можно сфокусировать на очень маленькой площади.

Наименьший теоретически возможный диаметр площадки, на которой можно сфокусировать монохроматическое излучение, равен длине его волны  $\lambda$  при условии, что диаметр входного отверстия объектива  $D = 2,26F$ , где  $F$  — фокусное расстояние.

## § 11.2. 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; 6) 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.

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. 11.4).

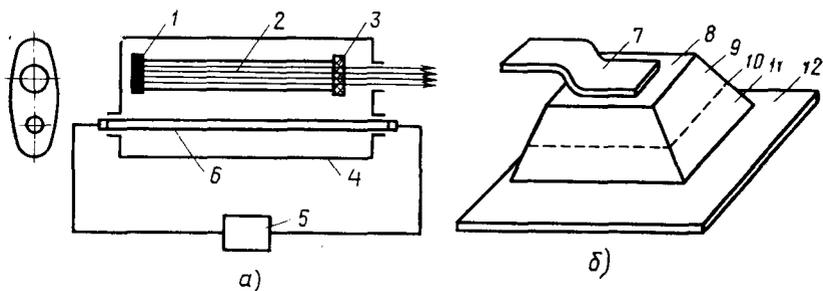


Рис. 11.4. Принципиальные схемы твердотельных лазеров:  
 а — с рубиновым стержнем; б — полупроводникового

1. Лазеры твердотельные с оптической накачкой. В лазерах этого типа излучателем — активным элементом — является твердое тело. В таких ОКГ основная масса диэлектрика (матрица) непосредственного участия в процессе генерации индуцированного излучения не принимает. Стимулированное излучение и генерация связаны с происходящими в матрице переходами атомов активатора, содержащегося в ней в количестве 0,01—10%.

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. 11.4,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.

При нагреве рабочего тела изменяются энергетические уровни оптически активных атомов и по достижении некоторой предельной температуры генерация когерентного излучения прекращается. Кроме того, нагрев стержня приводит к возникновению в нем термических напряжений, из-за чего может произойти разрушение стержня. Поэтому в большинстве конструкций твердотельных ОКГ предусматривается охлаждение рабочего тела воздухом, водой или жидким азотом. Световое излучение лампы-вспышки воздействует на активные атомы оптического резонатора, которые воз-

буждаются и затем при переходе на более низкие энергетические уровни генерируют собственное излучение.

Длительность импульса твердотельных ОКГ определяется индуктивностью, включаемой в цепь конденсаторной батареи, и обычно колеблется в пределах 0,1—10 мс. Частота повторения импульсов зависит в основном от условий охлаждения и характеристик импульсной лампы. В современных ОКГ она доходит до 600 импульсов в минуту.

Энергия излучения, генерируемого современными твердотельными ОКГ, изменяется в пределах от сотых долей до сотен джоулей.

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.

Если в качестве фокусирующего объектива применять сферические, цилиндрические и другие специальные оптические устройства, импульсы излучения лазера можно фокусировать соответственно в точку, линию, группу параллельных линий, окружность и т. д.

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

Полупроводниковые лазеры, в которых возбуждение осуществляется при инъекции носителей заряда через *p-n*-переход, называют *инжекционными*. Примером лазеров такого типа может служить полупроводниковый квантовый генератор на *p-n*-переходе в арсениде галлия (рис. 11.4,б). Акцепторными примесями в арсениде галлия являются цинк, кадмий, индий и др., донорными примесями — теллур, селен и др.

Кристалл инжекционного лазера, схема которого приведена на рис. 11.4,б, имеет размеры 0,5—1 мм<sup>2</sup>. Электрод 7 крепится к контакту 8, верхняя часть 9 представляет собой проводник *p*-типа, нижняя часть 11 — проводник *n*-типа. Между ними имеется *p-n*-переход 10, толщина которого составляет 0,1 мкм. Излучающий слой имеет толщину 1—2 мкм вследствие проникновения электронов и дырок через *p-n*-переход в глубь кристалла.

Передняя и задняя грани являются зеркалами и получают путем скалывания кристалла относительно определенной кристаллографической оси. Боковые грани делают скошенными для предотвращения возникновения колебаний в перпендикулярном направлении. Электрическое поле прикладывается перпендикулярно направлению *p-n*-перехода с помощью специальных электродов, соединенных с теплоотводящими пластинами 12.

Полупроводниковые инжекционные лазеры характеризуются очень высоким преобразованием электрической энергии в когерент-

ное 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.

Недостатком полупроводниковых лазеров является связанная с их малыми размерами невысокая направленность излучения, а также трудность получения высокой монохроматичности.

**3. Жидкостные лазеры.** Их основное 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.

В резонатор жидкостных лазеров вместо стеклянного стержня помещают кювету с раствором. Инверсия осуществляется за счет накачки от импульсных ламп. Коэффициент преобразования энергии оптической накачки в энергию генерации достигает 50%.

Лазеры, работающие на неорганических активных жидкостях, обладают большими импульсными энергиями при значительной средней мощности, при этом они генерируют излучение с узким спектром частот. Лазеры на органических жидкостях обладают интересными особенностями. Широкие спектральные линии люминесценции органических красителей позволяют создавать лазеры с непрерывной перестройкой длин волн излучения в диапазоне порядка нескольких сотен ангстрем. Заменяя органические красители, можно обеспечить перекрытие всего видимого и части инфракрасного участков спектров.

**4. Газовые лазеры.** Принципиальное устройство лазеров этого типа гораздо проще уже рассмотренных. Стеклянная трубка наполняется специальной газовой смесью. В ее торцы впаива-

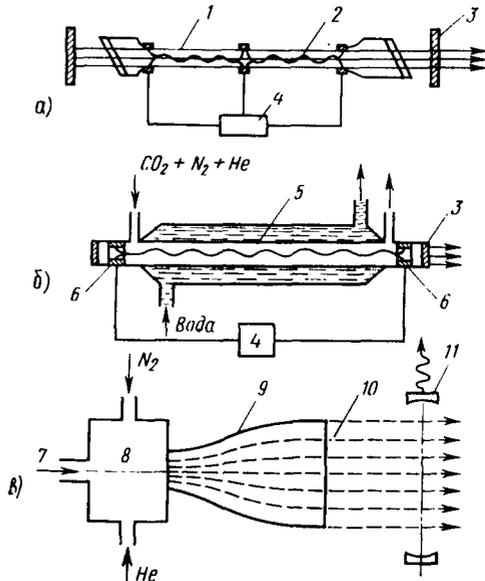


Рис. 11.5. Схемы газовых лазеров: а — гелий-неонового; б — углекислотного; в — газодинамического

ют два электрода и к ним подводят напряжение от источника питания (рис. 11.5). 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.

Примером атомного лазера является *гелиево-неоновый ОКГ* (рис. 11.5, а). В этом лазере рабочим веществом являются нейтральные атомы неона. Атомы гелия служат для передачи энергии возбуждения. В результате этой передачи атомы неона возбуждаются, а атомы гелия возвращаются в основное состояние. Газоразрядная трубка 1 лазера заполняется гелием и неоном с парциальными давлениями соответственно 133 и 13 Па. От источника высокого напряжения 4 в трубке создается высоковольтный электрический разряд 2, который возбуждает атомы гелия и неона за счет соударений с электронами. Излучение выходит через полупрозрачное зеркало 3. Гелиево-неоновый ОКГ имеет небольшую мощность, но из-за простоты устройства, надежности и достаточно высоких параметров излучения он получил широкое распространение.

В *ионных газовых ОКГ* используются переходы между энергетическими уровнями ионов благородных газов (ксенон, аргон, неон, криптона), а также фосфора, серы и хлора. Типичным представителем этой группы является аргонный лазер, который по конструкции похож на гелиево-неоновый ОКГ. Мощность ОКГ этой группы выше, чем лазеров на атомных переходах. Газовый ОКГ на аргоне генерирует излучение мощностью до 150—500 Вт в непрерывном режиме.

Наибольшую мощность и КПД имеют газовые ОКГ, генерирующие колебания на молекулярных переходах. К этой группе относятся ОКГ, работающие на *углекислом газе*.

В газоразрядных лазерах инверсия заселенностей достигается за счет возбуждения молекул электронным ударом и резонансной передачей энергии возбуждения. Для передачи энергии возбуждения в них служат молекулы азота  $N_2$ , которые в свою очередь возбуждаются электронным ударом. В условиях тлеющего разряда обычно до 90 % молекул азота переходят в возбужденное состояние, время жизни которого велико. Молекулярный азот хорошо накапливает энергию возбуждения и в процессе неупругих столкновений легко передает ее молекулам  $CO_2$ . Высокая инверсия засе-

ленностей достигается добавлением в рабочую смесь He, который облегчает условия возникновения разряда и благодаря своей высокой теплопроводности охлаждает разряд, а также способствует опустошению нижних лазерных уровней молекулы  $\text{CO}_2$ .

Принципиальная схема ОКГ на  $\text{CO}_2$  приведена на рис. 11.5, б. Электрический разряд возбуждается в охлаждаемой стеклянной газоразрядной трубке 5 между электродами 6 с помощью высоковольтного источника питания 4. Излучение выводится через окно 3 из материала, пропускающего инфракрасные лучи, например из кристаллов KBr, NaCl или Ge.

При схеме ОКГ с продольной прокачкой газа, как показано на рис. 11.5, б, с 1 м длины резонатора можно снимать мощность не более 50 Вт, для получения большей мощности приходится значительно увеличивать длину трубы резонатора, что достигается за счет использования многотрубных систем, в которых луч с помощью зеркал последовательно проходит через ряд труб.

Наиболее эффективными лазерами на  $\text{CO}_2$  являются системы с поперечной относительно направления электрического тока продувкой газа. В них используют интенсивную прокачку газа через объем резонатора с охлаждением его в теплообменнике. Электрический разряд возбуждается между анодной плитой и секционированным катодом. В качестве рабочего газа используется смесь  $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$ . Расход газовой смеси через разрядную камеру составляет 2—3 м<sup>3</sup>/с. В ОКГ этого типа можно получить съем мощности до 16 Вт с 1 см<sup>3</sup> газа. Электроразрядные лазеры с поперечной прокачкой газа работают в непрерывном режиме генерации.

**Газодинамические лазеры.** Их характерной особенностью является создание быстрых потоков газовых масс. Инверсия заселенностей в них осуществляется при резком охлаждении предварительно нагретой рабочей смеси путем адиабатического расширения газа. При нагревании газа молекулы переходят на верхние уровни. Но при этом сохраняется обычное больцмановское распределение по энергетическим уровням с большим заселением нижних уровней по сравнению с верхними.

При охлаждении газа молекулы должны перейти на нижние уровни. Скорость их перехода зависит от времени жизни на том или ином уровне. Поскольку время жизни верхнего лазерного уровня молекулы  $\text{CO}_2$  гораздо больше времени жизни нижнего, расселение нижнего уровня идет с большей скоростью. При адиабатическом расширении газа в сопле происходит его резкое охлаждение на выходе из сопла. Поэтому в различных областях среды будет иметь место различное расселение молекул по энергетическим уровням. В прилегающей к соплу зоне еще будет преобладать заселенность нижнего уровня, но на некотором расстоянии от сопла, соответствующем времени распространения струй газа до этого сечения, нижние уровни будут опустошаться быстрее верхних, и в этой зоне будет существовать инверсия заселенностей.

Принципиальная схема газодинамического лазера показана на рис. 11.5, *в*. В камеру сгорания 8 подается топливо 7. Продукты сгорания ( $\text{CO}_2$ ) в смеси с азотом и гелием выходят через сверхзвуковое сопло 9 в виде расширяющегося потока газа 10. Для получения лазерного излучения используется резонатор в виде двух зеркал 11. Резонатор расположен так, что его ось перпендикулярна вектору скорости потока газа. Мощность лазерного излучения определяется плотностью, скоростью и температурой газа на выходе из сопла.

### § 11.3. 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. Хотя они имеют большие габаритные размеры, потребляют значительную мощность, сложны в изготовлении и эксплуатации, однако их использование дает ряд технологических преимуществ, определяющих их широкое применение: 1) возможность передачи энергии в виде светового луча на расстоянии в любой оптически прозрачной среде; 2) отсутствие механического и электрического контакта между источником энергии с изделием в месте обработки; 3) наличие высокой концентрации энергии в пятне нагрева; 4) возможность плавной регулировки плотности лучистого потока в пятне нагрева изменением фокусировки луча; 5) возможность получения как импульсов энергии весьма малой длительности (до  $10^{-9}$  с), так и непрерывного излучения перемещением луча с высокой точностью и скоростью с помощью систем развертки при неподвижном объекте обработки.

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 рас-

плавленной части доминируют в процессах резки и сверления отверстий.

В зависимости от назначения в состав лазерной технологической установки кроме лазера могут входить опико-механический блок 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. 11.6.

В зависимости от конструктивных особенностей и конкретных условий в реальных установках могут отсутствовать или быть совмещены те или иные устройства и узлы.

Мощные лазеры применяются в технологических процессах обработки различных материалов. В частности, с их помощью производят сварку, закалку, резку и сверление различных материалов без возникновения в них механических напряжений и с очень большой точностью, вплоть до нескольких длин световых волн. Лазерами обрабатывают материалы практически любой твердости, металлы, алмазы, рубины и т. д.

*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 монта-

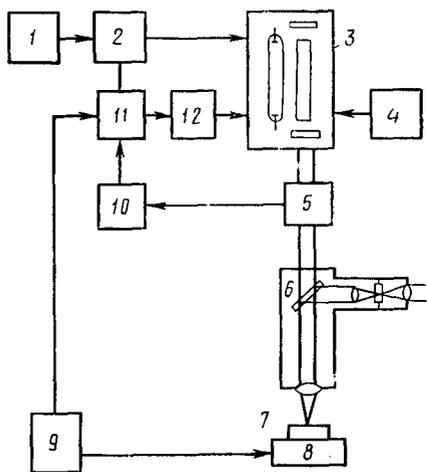


Рис. 11.6. Структурная схема промышленной лазерной установки:

- 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

жом 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 оплавлением) 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 четвертый

### УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

---

#### Глава 12

#### ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ УСТАНОВКИ

##### § 12.1. 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, образующимися в результате электролитической диссоциации. В отличие от металлов и полупроводников растворы и расплавы электролитов обладают ионной проводимостью.

Согласно теории электролитической диссоциации молекулы некоторых веществ — солей, щелочей, оснований и др. — являются полярными, т. е. состоящими из двух ионов, обладающих противоположными и равными по значению зарядами. Силы притяжения между ними обеспечивают целостность молекулы. Если такие молекулы находятся между молекулами растворителя (воды), то связи между ионами значительно ослабевают. В этих условиях столкновение между молекулами при их тепловом движении приводит к распаду молекул на ионы, т. е. к их диссоциации. Следовательно, *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.

Так, при растворении поваренной соли в воде ее молекула распадается на два иона — натрий  $\text{Na}^+$  и хлор  $\text{Cl}^-$ . Иногда ионами являются не отдельные атомы, а группы атомов, несущие заряд. Например, при растворении в воде сернистого цинка образуется два иона — положительный  $\text{Zn}^{2+}$  и отрицательный  $\text{SO}_4^{2-}$

Часть молекул растворителя также может диссоциировать.

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

Если электрод поместить в раствор, то в системе электрод—электролит устанавливается равновесное состояние, при котором через границу металл—раствор внешний ток отсутствует, поскольку электрод не включен во внешнюю электрическую цепь.

В системе электрод—электролит и в металле, и в электролите находятся одни и те же ионы. В металле они размещаются в узлах кристаллических решеток, а в электролите связаны с молекулами растворителя. Для перехода иона из узла кристаллической решетки в электролит необходимо затратить энергию, которая называется *работой выхода иона* из металла. Для выхода же иона из электролита в металл необходимо затратить работу, равную *энергии гидратации*.

На поверхности электрода, помещенного в электролит, протекает обратимая электрохимическая реакция



где  $n$  — валентность металла;  $\text{Me}^{n+}$  — ион в растворе.

В общем случае энергия иона  $\text{Me}^{n+}$  в растворе и энергия атома  $\text{Me}$  в кристаллической решетке не равны. Так как через границу раствор—металл переходят заряженные частицы, то неравенство указанных энергий определит наличие *равновесного электрического потенциала*  $\varphi_r$  металла относительно раствора.

Так как энергия связи ионов в кристаллической решетке металла больше энергии гидратации, то в первый момент ионы металла будут переходить из раствора в кристаллическую решетку. Избыточные электроны из внутренних слоев металла приблизятся к его граничной поверхности, а положительные ионы из глубины раствора переместятся к той же граничной поверхности и создадут двойной электрический слой.

В условиях равновесия скорость прямой и обратной реакций по схеме (12.1) одинакова, т. е. соответственно скорость окисления атомов  $\text{Me}$  и восстановления ионов  $\text{Me}^{n+}$  (осаждения).

**Прохождение электрического тока через электролит.** В электролитах ионы, как и молекулы, движутся хаотически. 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.

Итак, электрический ток в электролитах представляет собой направленное движение ионов в электрическом поле. В отличие от металлов и полупроводников прохождение электрического тока через электролит сопровождается переносом массы вещества.

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

$$g = \alpha I \tau, \quad (12.2)$$

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 [ $F_\Phi = 96\,485$  Кл/(г·эquiv)].

Процессы в электролитах подчиняются закону Ома. Для доказательства этого рассмотрим движение ионов в электролите под действием электрического поля.

Ион, движущийся под действием поля в электролите, непрерывно испытывает тормозящее действие со стороны молекул жидкости. При этом он увеличивает хаотическое движение молекул, передавая им полученную в электрическом поле энергию, что проявляется в нагревании электролита.

Так как у иона нет «длины свободного пробега», то среда действует на него в течение всего времени его движения. Действующая на ион сила сопротивления (сила вязкого трения) пропорциональна первой степени скорости упорядоченного движения  $F_\tau = kv$  ( $k$  — коэффициент трения). По направлению движения электрона действует электрическая сила  $F_s = eE$ , где  $e$  — заряд иона.

Если в первый момент скорость иона  $v$  мала, то сила  $F_s$  увеличивает ее, причем возрастает и сила трения. Эти силы выравняются в течение всего времени движения иона.

Среднюю скорость упорядоченного движения определим из соотношения  $F_\tau = F_s$ , т. е.  $eE = kv$ , отсюда

$$v = eE/k = \mu E. \quad (12.3)$$

Здесь  $\mu = e/k$  — подвижность иона.

Плотность тока, проходящего через электролит,

$$j = env = en\mu E. \quad (12.4)$$

Учитывая плотность токов положительных и отрицательных ионов, получим

$$j = e(n^+\mu^+ + n^-\mu^-) E, \quad (12.5)$$

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.

С увеличением температуры проводимости электролитов растет, что объясняется увеличением подвижности (уменьшением вязкости жидкости) и возрастанием степени диссоциации.

## § 12.2. 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.

Вещества, у которых нормальный потенциал больше  $-1$  по отношению к потенциалу нормального водородного электрода, получают путем электролиза растворов (медь, цинк). Металлы с нормальным потенциалом меньше  $-1$  получить таким способом не удается. Поэтому при их производстве применяют электролиз расплавов солей этих металлов (литий, калий, алюминий, магний).

Если в электролизной ванне процесс происходит с поглощением электрической энергии, ванна называется *электролизером*.

Принципиальная схема электролизера показана на рис. 12.1.

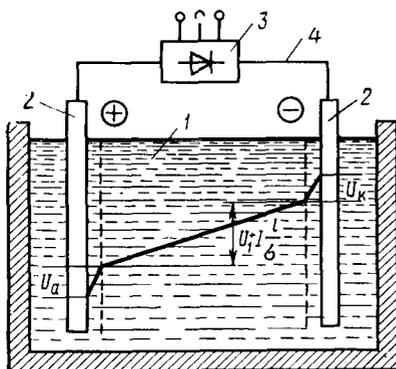


Рис. 12.1. Схема электролизной установки и распределение потенциала между электродами:

1 — электролит; 2 — электроды; 3 — источник питания; 4 — проводящие шины

На аноде переход металла из металлического состояния ( $Me^0$ ) в ионное происходит в результате отдачи металлов электронов  $Me^0 - ne \rightarrow Me^{n+}$  (анодное растворение), где  $n$  — число единичных зарядов. На катоде ион приобретает электроны и переходит в металлическое состояние  $Me^{n+} + ne \rightarrow Me^0$  (катодное осаждение).

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

$$U = U_1 + U_a + U_k = Il/\sigma, \quad (12.6)$$

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,

$$P_0 = I(U_1 + U_a + U_k + Il/\sigma). \quad (12.7)$$

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*  $A_i$  (%):

$$A_i = (q_1/q_2) 100, \quad (12.8)$$

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 также оценивается величиной, называемой *выходом по энергии*:

$$A_0 = (\alpha A_i / U) 100, \quad (12.9)$$

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).

Характерной величиной, определяющей интенсивность электролиза, является *электродная плотность тока* ( $A/m^2$ ):

$$j_0 = I/S, \quad (12.10)$$

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.

Циркуляция электролита помимо разрушения приэлектродных зон преследует цель выравнивания температуры электролита по ванне. При питании электролизной ванны импульсным напряжением нейтрализуется объемный заряд.

При проведении промышленных процессов электролиза не удается достичь теоретических значений выделения веществ на элект-

родах. Такое явление обусловлено следующими основными причинами: перезарядкой ионов; наличием в электролитах ионов разной валентности; взаимным разрядом ионов; взаимодействием продуктов электродных реакций между собой или с электролитом, а также катодным восстановлением продуктов.

**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.

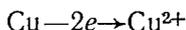
Процесс ведут в электролизных ваннах ящичного типа. В ванне устанавливаются литые аноды черновой меди, между которыми подвешиваются тонкие пластины чистой меди (катоды). После этого в ванну подают электролит, который представляет собой водный раствор медного купороса, подкисленный серной кислотой для уменьшения сопротивления.

Отлитые из черновой меди аноды представляют собой плиты прямоугольной формы толщиной 35—45 мм и массой около 300 кг. Катоды изготовляют из листовой электролитической меди толщиной 0,6—0,7 мм. Для надевания на штанги при подвешивании в ванны к катодам приваривают ушки, расстояние между поверхностями соседних анодов и катодов составляет 35—40 мм.

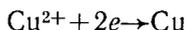
При пропускании через ванну постоянного электрического тока происходит растворение черновой меди анодов и осаждение чистой меди на катодах. Благородные металлы и некоторые примеси в виде шлама выпадают в осадок, некоторые другие примеси (никель) переходят в раствор.

В электролизере при этом происходят следующие электрохимические процессы:

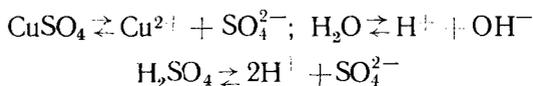
на аноде



на катоде



в растворе



Процесс электролиза начинается при напряжении на ванне 0,3—0,35 В. Плотность тока ограничивается условием получения мелкозернистого, плотного и гладкого осадка катодной меди. В зависимости от состава черновой меди 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 кВт·ч/т чистой меди.

Катоды и аноды в ваннах включают параллельно, а ванны последовательно (система мультипл). Последовательное включение электродов в ванне (система серий) применяется крайне редко. В процессе электролиза изменяется концентрация ионов в электролите в различных частях ванны, что может привести к увеличению расхода электроэнергии. В целях выравнивания концентрации ионов меди у электродов и обеспечения необходимой температуры применяется прямая циркуляция электролита, при которой он подается снизу ванны и сливается сверху.

Температура электролита поддерживается на уровне  $333 \pm 3$  К. Необходимый подогрев электролита осуществляется с помощью теплообменников из графита, титана или нержавеющей стали.

При проведении электролиза в электролизных ваннах стремятся к максимальному выходу меди по току, снижению удельного расхода электроэнергии и увеличению их производительности.

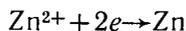
Снижение выхода металла по току является следствием утечки тока, появлению которой способствуют неблагоприятные условия в электролизных цехах: повышенные кислотные испарения; сырость деревянных частей ванны; отложение солей на деталях ванн; сравнительно высокий потенциал ванн относительно земли.

Пути утечки тока на электролизных установках могут быть: а) циркуляционные магистрали электролита; б) магистрали воды и пара; в) изоляция ванн от земли; г) изоляция между ваннами; д) проводящая футеровка ванн; е) короткие замыкания между электродами.

**Электролиз цинка.** Высококачественный цинк получают путем электролиза водных растворов его солей. В ваннах устанавливаются алюминиевые катоды и свинцовые аноды. Затем они заполняются водным раствором сернокислого цинка  $ZnSO_4$  (5—6%), который диссоциирует на катионы цинка  $Zn^{2+}$  и анионы  $SO_4^{2-}$  и серной кислоты  $H_2SO_4$ , диссоциирующей на катионы водорода  $H^+$  и анионы  $SO_4^{2-}$ .

Во время электролиза на катоде осаждается металлический цинк, на аноде выделяется газообразный кислород, а в растворе образуется серная кислота  $H_2SO_4$ .

При этом в электролизере происходят следующие процессы: на катоде



на аноде



в ванне



Чтобы обеспечить осаждение цинка на катоде, электролиз ведут при повышенных плотностях тока ( $400—600$  А/м<sup>2</sup>) и добавля-

ют в раствор поверхностно-активные вещества, которые препятствуют выделению водорода на катоде.

В электролизных цехах применяют ванны из сборного железобетона (иногда стальные) с защитой из кислотоупорных материалов. Обортовку ванн и сливные короба выполняют из винипласта. Снаружи ванны покрывают кислотоупорной краской, битумом или резиной (по стали). В дне ванн имеется отверстие для выпуска шлама. Ванны длинными бортами устанавливают рядом, соединяют в блоки по 20—30 ванн.

Для получения высокого выхода по току температуру электролита необходимо поддерживать на уровне 308—313 К. На практике применяется индивидуальное для каждой ванны охлаждение электролита с помощью алюминиевых или углеродистых змеевиков.

В производстве цинка выход по току составляет обычно 88—94 %, расход электроэнергии 3500 кВт·ч на 1 тонну цинка.

Сопротивление электролита определяется его температурой и концентрацией цинка в растворе. Резкое повышение падения напряжения на ванне (до 3,3—3,6 В) указывает на необходимость очистки анодов от шлама.

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

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

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

**Электролиз алюминия.** При нормальном потенциале выделения металла меньше —1 В осадить его на катоде методом электролиза раствора невозможно, так как на катоде будут выделяться в основном водород и содержащиеся в электролите и аноде примеси. Так как нормальный потенциал алюминия —1,67 В, то его получают путем электролиза расплавленных солей. В этом случае электролитом является раствор оксида алюминия  $Al_2O_3$  в расплавленном криолите ( $Na_3AlF_6$ ).

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

Электролизеры для получения алюминия можно классифицировать по ряду признаков:

1. По мощности (силе тока): 40—50 кА — малой мощности; 60—80 кА — средней мощности; 100—160 кА — большой мощности; 200—250 кА — сверхбольшой мощности.

2. По способу подвода тока: боковой — электролизеры малой и средней мощности; верхний — электролизеры большой мощности.

3. По конструкции анода: самоспекающийся за счет теплоты ванны и обожженный. Обожженные аноды имеют только верхний подвод тока. Самоспекающиеся аноды устанавливают по одному на каждой ванне. Принципиальное устройство электролизной ванны для получения алюминия показано на рис. 12.2.

Ванны имеют прямоугольную форму. Корпус электролизера сварен из стальных листов, может быть с дном и без дна. Корпус ванны снизу частично заполнен шамотной кладкой для теплоизоляции. На ней устанавливают подовые катодные блоки, к которым крепят специальные токопроводы — блюмсы. Боковые стороны покрывают асбестовым листом, теплоизолируют глинозёмовой засыпкой и футеруют угольными плитами. Все швы в угольной кладке заполняют углеродистой массой. С целью ослабления действия магнитных полей на расплавленный алюминий применяется двусторонняя подводка тока.

Размеры анода определяются заданной мощностью ванны и допустимой плотностью тока, которая для ванн средней мощности составляет 0,80—0,95 А/см<sup>2</sup>, а на мощных ваннах снижается до 0,65—0,7 А/см<sup>2</sup>. Обожженные аноды работают при плотностях тока 0,75—1,0 А/см<sup>2</sup>.

Основным достоинством самоспекающихся электродов является экономия затрат на прессование и обжиг электродов. К их недостаткам следует отнести выделение вредных газов в цехе электролиза с каждой ванны, высокое сопротивление, выкрашивание, вследствие чего возникает необходимость снимать с электролита угольную крошку — пену.

Анод подвешивают на подвижной раме, которая перемещается по металлоконструкциям печи. Автоматическое перемещение анода осуществляется в функции потери напряжения в электролите.

Ток к ванне подводится с двух сторон по пакетам алюминиевых шин. От шин к штырям ток подводится по гибким медным токопроводам, а непосредственно в массу анода ток вводится с помощью стальных штырей. В случае верхней подводки тока к аноду штырь и шина соединяются колодкой с пружинным зажимом.

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

При электролизе расплавов ток через ванну достигает значений более 100 кА, поэтому ванны включают в серии последовательно без предварительного объединения в блоки. Соединение от-

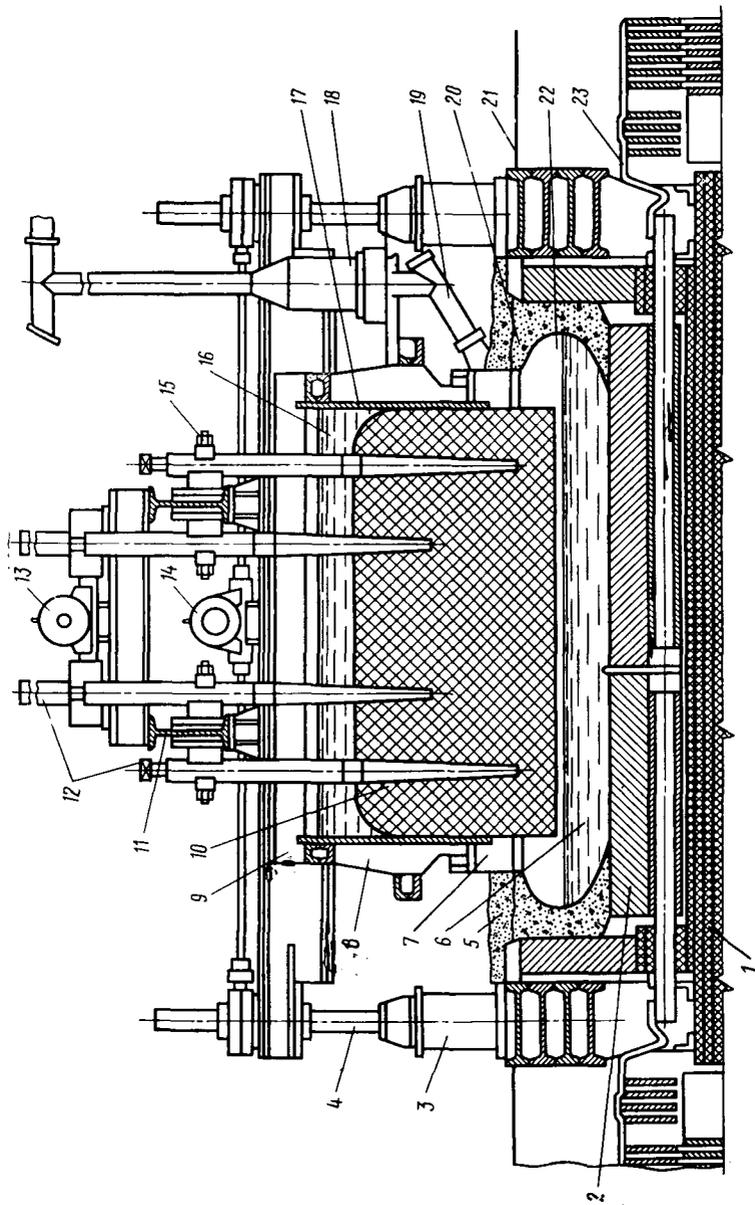


Рис. 12.2. Устройство электролизной ванны для получения алюминия:

- 1 — цоколь; 2 — подна; 3 — стойка; 4 — домкрат; 5 — глинозем; 6 — алюминий; 7 — газосборочный колокол; 8 — ребра жесткости; 9 — рама; 10 — слесеный анод; 11 — анодные шины; 12 — стальные штыри; 13, 14 — электродвигатели; 15 — колодки; 16 — жидкая анодная масса; 17 — кожух анода; 18 — горелка; 19 — патрубок; 20 — корка электролита; 21 — уровень пола; 22 — электролит; 23 — шины

дельных ванн или блоков между собой в серии, а также подключение их к источникам питания производится шинопроводами.

При нормальной работе напряжение на ванне составляет 4,2—4,5 В, что достигается поддержанием заданного состава электролита и режимных показателей.

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

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

Производство алюминия является энергоемким. Фактический расход электроэнергии на производство алюминия составляет 14 000—16 000 кВт·ч/т. Выход металла на 1 кВт·ч составляет 60—77 г, что типично для удельного расхода электроэнергии ( $16\,000 \pm \pm 500$ ) кВт·ч на 1 т алюминия.

### § 12.3. Электрооборудование электролизных производств

Питание электролизных установок постоянным током осуществляется от генераторов постоянного тока или полупроводниковых выпрямительных агрегатов, преобразующих переменный ток промышленной частоты в постоянный. Наибольшее распространение получили кремниевые выпрямительные агрегаты, имеющие КПД 97—99 %.

Преобразовательная подстанция состоит из распределительного устройства переменного тока, силовых трансформаторов с устройством регулирования напряжения, полупроводниковых агрегатов, распределительного устройства постоянного тока и устройств собственных нужд.

Применяемые для питания электрических установок *силовые трехфазные трансформаторы* могут иметь встроеное устройство переключения под нагрузкой на стороне высшего напряжения и несколько вторичных обмоток. Каждая из вторичных обмоток, число которых зависит от числа фаз выпрямления, питает блок с полупроводниковыми вентилями.

Техническое развитие силовых трансформаторов для электролизных производств направлено на повышение экономичности и уменьшение вредного воздействия на окружающую среду при их эксплуатации. Экономические факторы обусловлены снижением капитальных затрат и потерь энергии. Уменьшение вредного воз-

действия на окружающую среду достигается применением новых охлаждающих агентов (силиконовое масло) и снижением шума.

В силовых выпрямительных трансформаторах обмотку низшего напряжения выполняют из алюминиевой ленты, ширина которой соответствует длине магнитного сердечника, обмотку высшего напряжения — из алюминиевой ленты или проволоки.

Регулирование напряжения должно обеспечить необходимую глубину и плавность. Наибольшая глубина регулирования необходима при пуске электролизных установок. Необходимая ширина диапазона регулирования достигается за счет переключения сетевой обмотки трансформатора со звезды на треугольник, параллельно-последовательным включением ее секций и т. д. Применяется регулирование с помощью специального регулировочного трансформатора за счет изменения числа витков в обмотках высшего и низшего напряжения, т. е. его коэффициента трансформации. Наиболее рационально расположение этого трансформатора перед силовым. В качестве регулировочного трансформатора часто используется трехфазный автотрансформатор, рассчитанный на проходную мощность, равную номинальной мощности силового трансформатора. Автотрансформатор имеет несколько ступеней

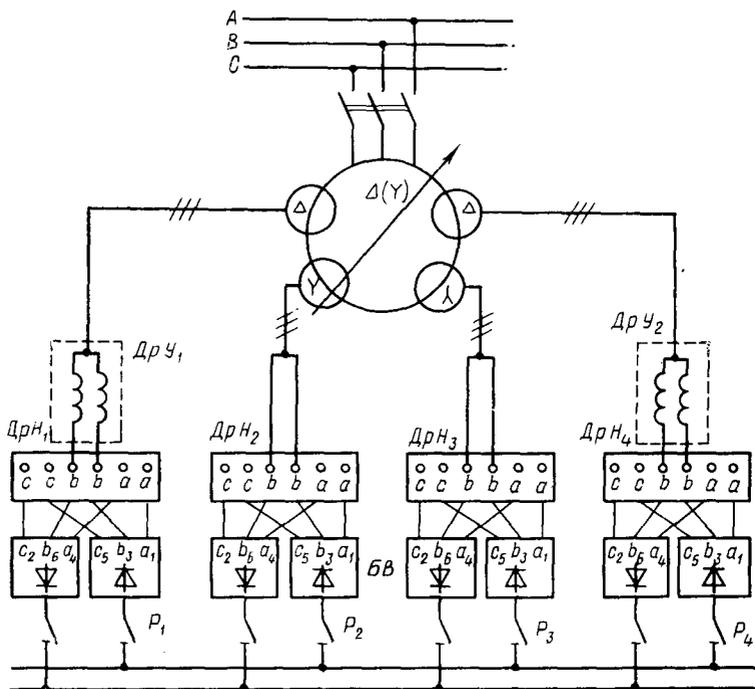


Рис. 12.3. Схема силовой части вентильного преобразователя с неуправляемыми вентилями

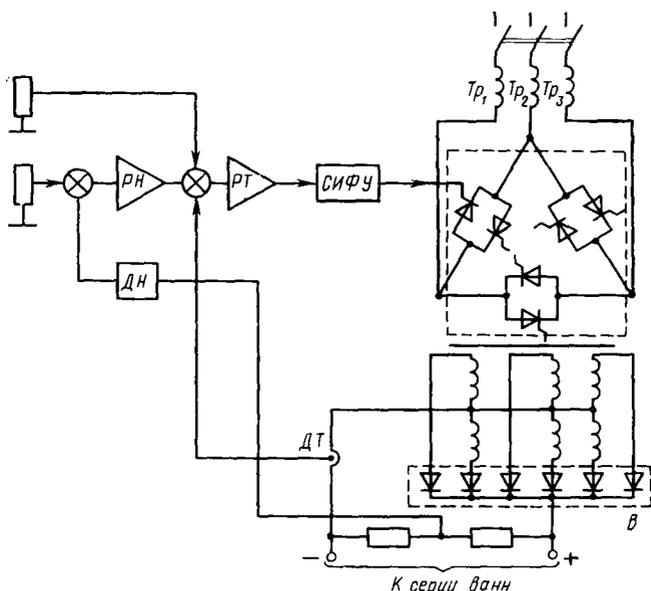


Рис. 12.4. Схема выпрямительного тиристорного агрегата

грубого регулирования с помощью ПБВ (переключения без возбуждения), внутри которых плавное регулирование напряжения производится с помощью устройства РПН (регулирование под нагрузкой).

Выпрямительные агрегаты выполняются с неуправляемыми и управляемыми вентилями. Принципиальная схема силовой части вентильного преобразователя с неуправляемыми вентилями показана на рис. 12.3. Сетевая обмотка силового трансформатора соединена в треугольник с последовательным и параллельным соединением ее частей посредством переключателя ПБВ. Две вентильные обмотки соединены треугольником, а две — звездой. Трансформатор питает четыре параллельно включенных вентильных блока БВ, выполненных по шестифазной мостовой схеме (схеме Ларионова).

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. Каждый комплект состоит из шести однофазных дросселей. Дроссели подбирают по характеристикам индивидуально для каждого агрегата.

Принципиальная схема выпрямительного агрегата с управляемыми вентилями (тиристорами) показана на рис. 12.4. Первичные обмотки трех однофазных трансформаторов  $Tr_1—Tr_3$  соединены в звезду с помощью тиристорov, которые служат для плавного регулирования переменного тока. В агрегате применена двухконтурная система регулирования с внутренним токовым контуром и внешним — контуром напряжения. Регулятор тока  $PT$  подключен к входу системы импульсно-фазового управления тиристорами — СИФУ. Неуправляемый анодный выпрямитель  $B$  питается от вторичных обмоток трансформаторов  $Tr_1—Tr_3$ , соединенных по схеме двойной трехфазной звезды. В нормальном режиме регулятор напряжения  $RH$  находится в насыщенном состоянии, а при увеличении напряжения на нагрузке выше заданного уровня корректирует суммарное значение выпрямленного тока.

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

Сильноточная коммутационная аппаратура применяется также при подпитке током серий или отдельных электролизеров, шунтировании ванн при гашении анодных вспышек, выводе их в ремонт и т. п.

*Быстродействующие автоматические выключатели* серии ВАБ и ВАТ используются для оперативных отключений без нагрузок и редких отключений под нагрузкой. Они состоят из унифицированных узлов-блоков, укомплектованы однотипными реле и блоками управления. Выключатели серии ВАТ отличаются от серии ВАБ наличием индукционно-динамического привода. Быстродействие привода обеспечивается тем, что удерживающий магнитный поток вытесняется в параллельный участок магнитной цепи.

*Сильноточные коммутаторы* постоянного тока в большинстве своем выполнены с жидкометаллическим контактом. В аппаратах с неподвижными электродами коммутация осуществляется движущимся по электродному каналу жидким металлом. В ряде коммутаторов применяются жидкометаллические пасты или угольные щетки.

К электролизным ваннам ток от источников питания электролизного производства подводится по специальным шинпроводам, состоящим из собранных в пакеты отдельных прямоугольных шин. Обычно шинпроводы выполняют из алюминиевых шин, медь применяется только там, где алюминий непригоден вследствие его малой антикоррозионной стойкости.

Сечение шинпроводов определяют, исходя из экономической плотности тока. Для алюминиевых шин при электролизе она составляет 0,3—0,4, для медных 1,0—1,3, для шин из чугуна и стали 0,15—0,2 А/мм<sup>2</sup>. Рассчитанное сечение шинпровода затем прове-

ряют на допустимое значение потерь напряжения в шинном проводе (она должна быть не более 3%), допустимый нагрев в установленном режиме (не выше 343 К) и на механическую прочность.

Поскольку рабочие токи электролизных ванн достигают десятков и сотен килоампер, сечение шинного провода также получается большим — до 15 дм<sup>2</sup>. Шинные провода больших сечений собирают из прямоугольных шин, между которыми для охлаждения оставляются зазоры, равные толщине шин.

Для компенсации удлинения при нагреве на прямолинейных участках шинного провода через 20—25 м монтируются температурные компенсаторы из гибких шин.

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

**Коэффициент мощности преобразовательных агрегатов.** Коэффициент мощности агрегатов с неуправляемыми вентилями достаточно высок и зависит лишь от числа фаз выпрямления. Проблема повышения коэффициента мощности возникает при использовании мощных преобразователей с управляемыми вентилями. 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 непроизводительные потери электроэнергии  $\Delta W_3$  при компенсации реактивной мощности

$$\Delta W_3 = Q_a^2 R_a^2 (2v - v^2) / U_a^2, \quad (12.11)$$

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

$$\Delta W_3 = S_a \cos \varphi_a \sin^2 \varphi (2v - v^2) (1 - \eta_{ц}) / \eta_{ц}, \quad (12.12)$$

где  $S_a$  — потребляемая с шин подстанции кажущаяся мощность, кВ·А;  $\varphi_a$  — фазный угол сдвига тока и напряжения на шинах подстанции;  $\eta_{ц}$  — нагрузочный КПД цепи электроснабжения, рас-

считанный с учетом активных потерь в токопроводах, трансформаторах и синхронных генераторах, связанных с выработкой реактивной мощности.

При использовании ПЕК нагрузочный КПД системы электропитания

$$\eta_{пек} = \eta_a \eta_n \eta_r, \quad (12.13)$$

а при использовании компенсационных выпрямительных агрегатов

$$\eta_k = \eta_a \eta_r, \quad (12.14)$$

где  $\eta_a$  — нагрузочный КПД участка радиальной цепи от шин системы до шин подстанции без учета постоянных потерь;  $\eta_n$  — нагрузочный КПД преобразовательной подстанции без учета постоянных потерь и потерь в вентилях и ошиновке;  $\eta_r$  — нагрузочный КПД генераторов, связанный с выработкой реактивной энергии.

Значение  $\eta_r = 0,995$  можно принять постоянным. Значение  $\eta_n$  находят по величине потерь и перетоков мощности на участках, по которым проходит поток мощности рассматриваемой преобразовательной подстанции.

Экономический эффект  $\mathcal{E}$  (руб/год), определяемый степенью компенсации  $\nu$ ,

$$\mathcal{E} = 3S_a \sin^2 \varphi_a [\cos \varphi_a (2\nu - \nu^2) (1 - \eta_{ц}) / \eta_{ц} - \nu], \quad (12.15)$$

где  $\mathcal{Z}$  — удельные годовые затраты, руб/(кВт·год).

Оптимальная степень компенсации

$$\nu_{опт} = 1 - \frac{3Q_a}{z \frac{1 - \eta_{ц}}{\eta_{ц}} \sin \varphi_a}, \quad (12.16)$$

где  $z = 3S_a \sin \varphi_a \nu$  — приведенные затраты в зависимости от степени компенсации, руб/год.

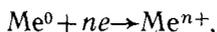
При  $\nu_{опт} < 0$  компенсация реактивной мощности для данной преобразовательной подстанции неэффективна. Если  $\nu_{опт} > 0$ , то следует продолжить расчет по определению экономической эффективности компенсации реактивной мощности.

#### § 12.4. 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.

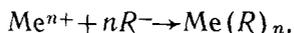
В большинстве новых методов используется преимущественно процесс анодного растворения, т. е. перехода металла, помещае-

мого 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:



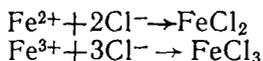
где  $n$  — число единичных зарядов.

Затем происходит образование различных металлических соединений, состав которых определяется химическим составом электролита или продуктов электролиза. В растворах кислот

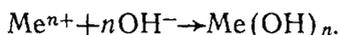


где  $R$  — кислотный остаток (анион), например  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  и т. д.

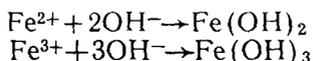
При растворении железа в соляной кислоте



В нейтральных и щелочных растворах



Например,



Анодное растворение в нейтральных электролитах сопровождается образованием гидратов оксида металла  $\text{Me}(\text{OH})_n$ , которые практически не растворяются в электролите, выпадают в осадок, пассивируют растворяемую поверхность и забивают межэлектродный промежуток. 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 металлов в кислых растворах, когда продукты реакции 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 электрохимической обработки подразделяют на две группы: 1) электрохимическая обработка при невысокой плотности тока в стационарном электролите; 2) электрохимическая обработка при высокой плотности тока в проточном электролите.

На рис. 12.5 показана схема электрохимической обработки в стационарном электролите для наиболее типичной операции — электролитического шлифования или полирования.

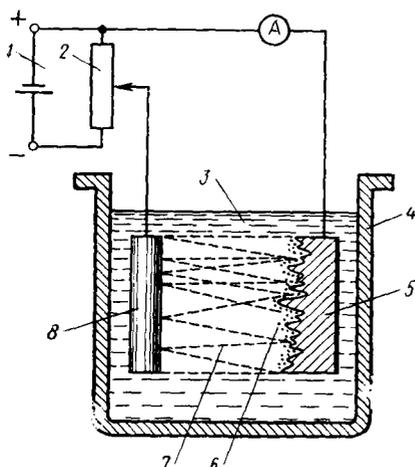


Рис. 12.5. Схема электрохимической обработки в стационарном электролите:

1 — источник питания; 2 — регулятор тока; 3 — электролит; 4 — ванна; 5 — обрабатываемое изделие; 6 — продукты растворения; 7 — линии тока; 8 — электрод

род, через который прокачивается электролит. Деталь подключена к положительному полюсу и является анодом, а электрод-инструмент — катодом.

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.

Электрохимическим способом 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 обраба-

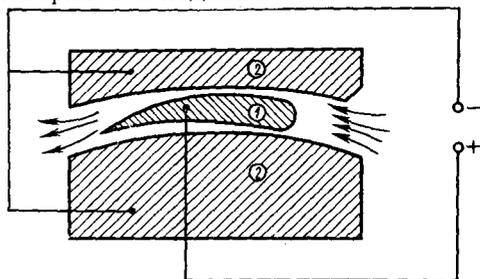


Рис. 12.6. Схема электрохимической обработки в проточном электролите

тываемое 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 путем их анодной обработки в соответствующих растворах. Оно широко применяется для защиты от коррозии изделий из алюминия, магния и их сплавов. При анодировании на поверхности алюминия образуется двойной оксидный слой: верхний — толстый пористый слой и нижний — тонкий плотный. Алюминиевая оксидная пленка обладает хорошими антикоррозионными и электроизолирующими свойствами.

Для обеспечения достаточной прочности сцепления металлопокрытия с основным металлом поверхность последнего подвергается специальной очистке различными методами: механическим (шлифование, полирование), электрохимическим (обезжиривание, травление), а также ультразвуковой обработке.

Ванны для металлопокрытий изготавливают из стали и изнутри футеруют пластмассами. По бортам ванн на изоляторах монтируют анодные и катодные шины, присоединяемые к источнику питания постоянного тока. На катодные шины подвешивают изделия, а на анодные — пластины металла, которым покрывается изделие. Находящийся в ванне электролит подогревается установленным на дне ванны змеевиком, по которому циркулирует горячая вода.

Иногда ванны изготавливаются с двойной стенкой — паропроводящей рубашкой.

Ванны могут быть включены в цепь последовательно, если для процесса электролиза требуется одинаковый ток. В этом случае контроль за работой ванн осуществляется с помощью одного амперметра. Если же ванны работают с переменной нагрузкой, то каждая из них подключается к источнику питания параллельно и каждая снабжается амперметром.

### § 12.5. Источники питания установок электрохимической обработки

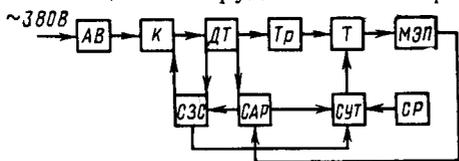
Электрохимическая обработка, основанная на анодном растворении, ведется на постоянном, импульсном, пульсирующем или асимметричном переменном токе. Источники питания (ИП) преобразуют электрическую энергию промышленной сети в необходимую для электрохимической обработки.

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. Кроме того, они должны быть экономичными, удобными в эксплуатации, малогабаритными. 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 состоят 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.

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



Структурная схема тиристорного источника питания установок электрохимической обработки показана на рис. 12.7.

Напряжение сети после срабатывания автоматического выключателя АВ и си-

Рис. 12.7. Структурная схема источника питания установок ЭХО

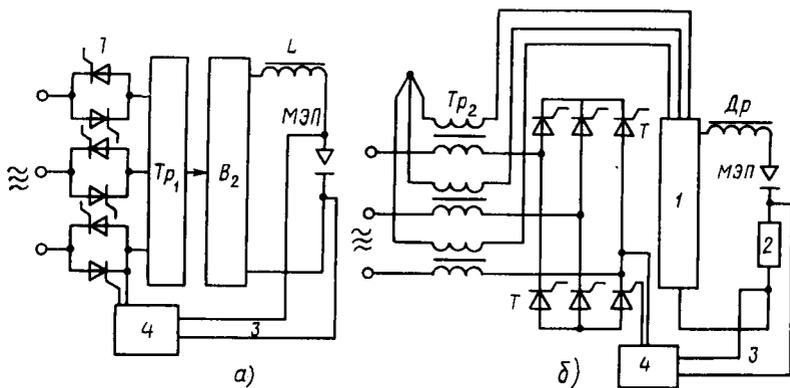


Рис. 12.8. Принципиальная схема тиристорного источника питания установок ЭХО

лового контактора  $K$  через датчики тока  $ДТ$  подается на силовой трансформатор  $Тр$ . Пониженное напряжение поступает на блок тиристоров  $T$ , 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.

Предусматривается отключение в источнике питания и от сети, и от силового трансформатора, что обеспечивает нормальную работу электрической части оборудования.

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. 12.8 показаны принципиальные схемы тиристорных источников питания установок ЭХО на токи выше 600 А.

В схеме рис. 12.8, *а* используются тиристоры  $T$  на первичной стороне силового трансформатора  $Тр_1$  с неуправляемым выпрямителем  $B_2$  на его вторичной стороне. Тиристоры  $T$  включены в расщепку фаз сети (рис. 12.8, *а*) или по трехфазной мостовой схеме в разрыв нейтрали звезды на первичной стороне трансформатора (рис. 12.8, *б*).

Для получения жесткой внешней характеристики источника питания блок 4 управляет тиристорами по сигналам обратной связи 3 по выходному напряжению с межэлектродного промежутка (рис. 12.8, а). Для создания крутопадающей характеристики (рис. 12.8, б) тиристоры  $T$  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 13

### ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

#### § 13.1. 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*. 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. При его использовании значительно снижается трудоемкость по сравнению с обработкой резанием, возможно осуществление механизации и автоматизации с целью глубокого регулирования параметров процесса.

Однако по сравнению с механической электроэрозионная обработка имеет ряд существенных недостатков: производительность при такой обработке обычных материалов (стали, цветных металлы и т. д.) значительно ниже, чем при обработке резанием, а расход энергии выше; для получения высокой чистоты поверхности приходится затрачивать больше времени, чем, например, при абразивной обработке.

Картина происходящих поэтапно в межэлектродном зазоре физических процессов при электроэрозионной обработке показана на

рис. 13.1. По достижении импульсным напряжением  $u$  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. 13.1, а).

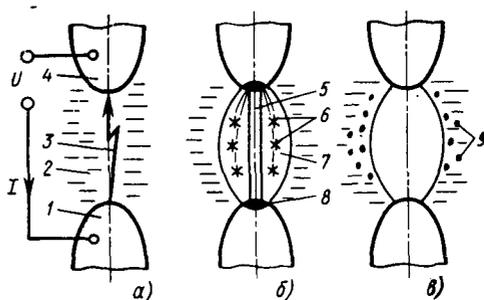


Рис. 13.1. Схема физических процессов в межэлектродном промежутке при электроэрозионной обработке

Через канал проводимости в виде импульса выделяется электрическая энергия, накопленная в источнике питания (рис. 13.1, б). При этом происходит электрический разряд 5, длительность которого составляет  $10^{-6}$ — $10^{-4}$  с, для которого характерна падающая вольт-амперная 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 разряда и застывают в окружающей электродами жидкой среде в виде мелких сферических частиц 9 (рис. 13.1, 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. Это обусловило уменьшение длины межэлектродных промежутков между электродами (1—10 мкм), что диктуется также условиями техники безопасности по снижению рабочего напряжения установки.

Электрическая эрозия электродов определяется процессами, проходящими в приэлектродных областях на границе разряда, с одной стороны, и анодом или катодом — с другой. Поток тепловой энергии, поступающий на граничащую с токопроводящим каналом часть катода, складывается из нескольких составляющих:

*Кинетическая энергия ионов*, приобретаемая при их ускорении в зоне катодного падения потенциала,  $U_k$ .

При столкновении с катодом ион выделяет энергию  $eU_k$ , а ток ионов на единице поверхности выделяет мощность, равную  $j_n U_k = \beta_n j_k U_k$ , где  $\beta_n = j_n / j_k$  — доля ионного тока;  $j_n$  и  $j_k$  — плотности ионного и полного тока на катоде.

*Потенциальная энергия ионов*, которые, разрядясь на катоде, отдают ему энергию ионизации, а отходя от него в виде атома, уносят энергию, равную работе выхода электрона  $\phi_k$ . Ионный ток передает единице поверхности катода мощность  $-j_n [A_n - (\phi_k + \sqrt{eE_k / \sqrt{\epsilon_0}})]$ , где  $E_k$  — напряженность поля в зоне катодного падения потенциала;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

*Тепловая энергия нейтральных частиц* с температурой  $T_{ч}$ , отдающих мощность  $P_T$  на единичной площадке:  $P_T = (3/2) k T_{ч} n_{пов}$ , где  $n_{пов}$  — количество частиц, пропорциональное их давлению в канале, приходящееся на единицу поверхности за 1 с.

Суммарный тепловой поток, поступающий на катод,

$$q_k = j_k [\beta_n (U_k - A_n) - (\phi_k - \sqrt{eE_k / \sqrt{\epsilon_0}})] + P_T. \quad (13.1)$$

Как следует из уравнения (13.1), износ катода-инструмента, а также съем с катода-заготовки определяются ионным током и мощностью  $P_T$ .

Поступающий на анод тепловой поток состоит из следующих компонент.

*Кинетическая энергия электрона*  $eU_a$ , накопленная им при ускорении в области анодного падения потенциала  $U_a$ . Мощность, поступающая на единицу поверхности анода, обусловленная электронами, равна  $j_a (1 - \beta_n) U_a$  ( $j_a$  — плотность анодного тока).

Энергии, равной *работе выхода электрона* из анода  $\phi_a$ , соответствует мощность на единице поверхности  $j_a (1 - \beta_n) \phi_a$ .

*Тепловая энергия нагретых нейтральных частиц*, соответствующая мощности на единице поверхности  $P_T$ .

*Тепловая и кинетическая энергия паров*, исходящих из катодного пятна. Передаваемая ими удельная мощность  $P_{пар}$  растет с повышением температуры плавления материала катода и скорости пара в струе.

*Удельные потери энергии* на аноде равны  $j_n \phi_n$ , где  $j_n$  — плотность ионного тока;  $\phi_n$  — работа выхода положительных ионов;  $\phi_n = \phi_{исп} + \phi_{ион} - (\phi_a - \sqrt{eE_a / \sqrt{\epsilon_0}})$ , здесь  $\phi_{исп}$  — энергия, эВ, достаточная для «испарения» одного атома;  $E_a$  — напряженность поля в зоне анодного падения потенциала.

*Удельный тепловой поток* на анод

$$q_a = j_a [U_a + (\phi_a - \sqrt{eE_a / \sqrt{\epsilon_0}})] - j_n \beta_{исп} [\phi_{исп} + \phi_{ион} - (\phi_a - \sqrt{eE_a / \sqrt{\epsilon_0}})] + P_T + P_{пар}. \quad (13.2)$$

Как следует из формул (13.1) и (13.2), интенсивность процесса электрической эрозии определяется тепло- и электрофизическими свойствами обрабатываемых металлов.

В месте действия импульса тока на поверхности электродов остаются небольшие углубления — лунки, образовавшиеся вследствие удаления разрядом некоторого количества металла. Параметры лунки (диаметр и высота) определяются мощностью импульсного разряда, его длительностью и свойствами материала. Таким образом, для лунки диаметром  $d$  и глубиной  $h$  можно записать:

$$\begin{aligned} d &= f(\varphi_a, k, A_{\text{д}}, U_{\text{к}}, U_a); \\ h &= f_1(C_p, \lambda), \end{aligned} \quad (13.3)$$

где  $C_p$  — удельная теплоемкость;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала.

В процессе электроэрозионной обработки материалов могут изнашиваться оба электрода. 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 остался целым.

### § 13.2. 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  $di/d\tau$  — 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. 13.2 показана форма импульсов тока при электроэрозионной обработке.

В составе импульса различают две стадии: рабочую — с импульсом прямой полярности  $\tau_{\text{пр}}$  и холостую — с импульсом обратной полярности  $\tau_{\text{обр}}$ .

Прямой полярностью импульса считается та его часть, которая вызывает наибольшее разрушение обрабатываемой детали. Она изображается над осью абсцисс независимо от ее истинной полярности.

Часть импульса, вызывающая разрушение электрода-

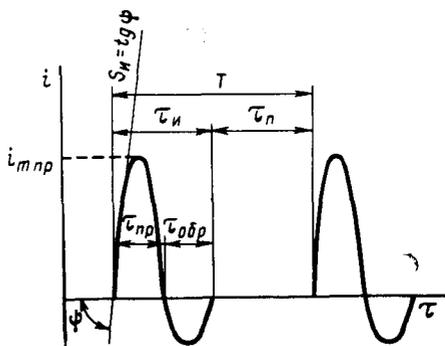


Рис. 13.2. Форма импульсов тока в межэлектродном промежутке

инструмента, называется *обратной полярностью импульса* и располагается под осью абсцисс.

Униполярные импульсы — это импульсы, разрушающие только изделие.

Количество импульсов в секунду называется частотой импульсов  $f_{и}$ . Величину, обратную частоте, называют периодом  $T = 1/f_{и}$ . Он состоит из длительности импульса  $\tau_{и}$  и паузы между импульсами  $\tau_{п}$ . Отношение периода импульса к его длительности называют скважностью. Скорость нарастания тока  $di/d\tau$  называют крутизной импульса  $S_{и}$ ; она равна тангенсу угла  $\psi$  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

$$\left. \begin{aligned} I_{ср} &= \frac{1}{\tau_{и}} \int_0^{\tau_{и}} i(\tau) d\tau, \\ U_{ср} &= \frac{1}{\tau_{и}} \int_0^{\tau_{и}} u(\tau) d\tau, \end{aligned} \right\} \quad (13.4)$$

где  $i$  и  $u$  — мгновенные значения тока и напряжения.

Действующие значения тока и напряжения за период соответственно

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(\tau) d\tau}, \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(\tau) d\tau}. \quad (13.5)$$

Энергия импульса

$$A = \int_0^{\tau_{и}} u(\tau) i(\tau) d\tau. \quad (13.6)$$

Средняя мощность импульса

$$P_{и,ср} = A/\tau_{и}.$$

### § 13.3. Генераторы импульсов

Требования к генераторам импульсов (ГИ) включают в себя необходимость достижения *высокого КПД*. Кроме того, они определяются свойствами межэлектродного промежутка (МЭП) — резко нелинейного элемента электрической цепи.

*Стабильность импульсов тока* — постоянство их длительности зависит от постоянства свойств промежутка и крутизны переднего

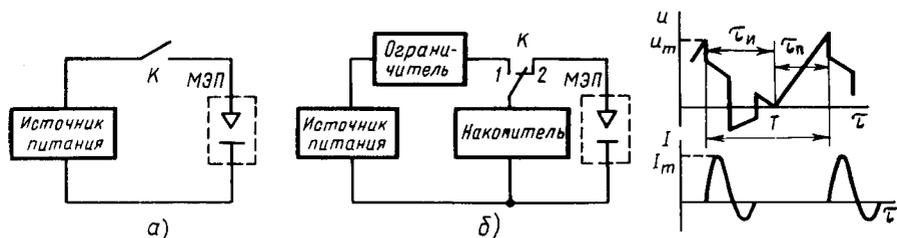


Рис. 13.3. Структурная схема импульсного генератора

фронта импульса напряжения. Чем больше эта крутизна, тем стабильнее импульсы тока. Отсюда следует еще одно требование к генераторам импульсов — *высокая степень крутизны переднего фронта* импульса напряжения.

Подвод импульсов энергии к межэлектродному промежутку при электроэрозионной обработке можно осуществить по структурной схеме, показанной на рис. 13.3, а.

В течение времени  $\tau_n$  коммутатор  $K$  замкнут и источник питания отдает нагрузке (МЭП) мощность  $P_n$ , которая в  $n$  раз превосходит среднюю мощность за период следования импульсов  $T$ .

Мощность источника питания должна быть равной  $P_n = I_m U_m$ , где  $I_m$  и  $U_m$  — амплитудные значения напряжения и тока в течение импульса. Она расходуется только в промежутке времени  $\tau_n$ .

Если пренебречь потерями в накопителе энергии, то отдаваемая накопителем в МЭП энергия составит  $A = P_n \tau_n$ , а мощность источника  $P = A/T = P_n \tau_n / T = P_n / n$ , т. е. при введении в структурную схему накопителя энергии мощность источника может быть уменьшена в  $n$  раз.

Схема электроэрозионной установки, обеспечивающая импульсную работу с накопителем энергии, приведена на рис. 13.3, б.

В течение паузы  $\tau_n$  коммутатор  $K$  находится в положении 1 и через ограничитель тока накопителем от источника питания потребляется мощность  $P/n$ . Накопитель при этом запасает энергию  $A = P_n \tau_n$ , которая при переключении коммутатора  $K$  на время импульса  $\tau_n$  в положение 2 отдает мощность  $P_n = A/\tau_n$ .

Работа по этой схеме дает возможность трансформировать мощность источника  $P = P_n/n$  в мощность, которая расходуется на нагрузке.

Импульсные генераторы различают по принципу действия, конструкции и параметрам импульсов. ГИ условно подразделяют на *зависимые, ограниченно зависимые и независимые*. В первых из них параметры 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

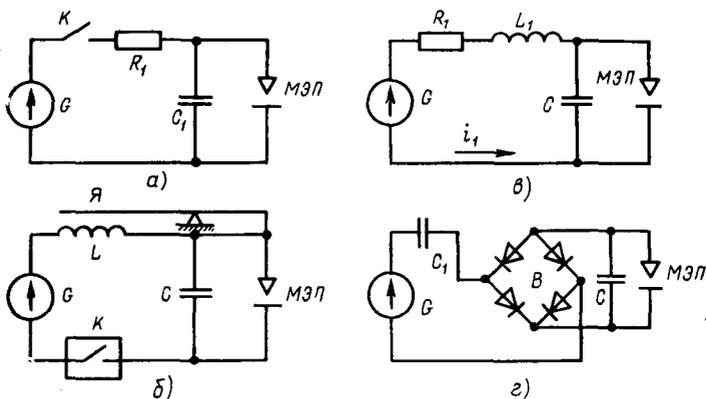


Рис. 13.4. Схемы импульсных релаксационных генераторов

индуктивной катушки. Применяются также комбинированные накопители, содержащие активное сопротивление, емкость и индуктивность — *релаксационные генераторы* (рис. 13.4). В процессе их разрядки расходуется энергия, накопленная в реактивных элементах цепи (конденсаторе или индуктивной катушке).

*RC-генератор импульсов* (рис. 13.4, 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  $i_1 = (dU_c/d\tau)C$ . Напряжение на конденсаторе  $u_c = \frac{1}{C} \int_0^{\tau} i_1 d\tau + U_{c0}$ , где  $U_{c0}$  — начальное напряжение на конденсаторе в момент  $\tau=0$ . К концу зарядки напряжение  $u_c$  будет равно напряжению источника питания. Разрядка происходит в течение времени  $\tau_{и} = T/n$ . 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 электроэрозионной обработки более широко применяются генераторы с емкостным накопителем, поскольку индуктивный накопитель уступает емкостному по энергетическим показателям.

Схема импульсного *LC-генератора* показана на рис. 13.4, 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. 13.4, в) работают при более низком напряжении, чем *RC-генераторы*, так как при наличии резонанса между индуктивностью и емкостью напряжение на конденсаторе-накопителе оказывается больше напряжения источника питания.

Уравнение переходного процесса зарядной цепи *RLC-генератора* имеет вид

$$u = R_1 i_1 + L_1 (di_1/dt) + \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt.$$

Из данного уравнения следует, что заряд конденсатора может проходить по экспоненциальному либо по колебательному закону.

Колебательный процесс возникает при  $(R_1^2/4L_1) - (1/L_1C) = 0$ . 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 электроэрозионной обработке применяется также *СС-генератор импульсов* (рис. 13.4, г), в котором в качестве токоограничивающего элемента используется конденсатор *C*<sub>1</sub>. 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 *B*.

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 электроэрозионной обработки существуют статические генераторы импульсов, регулирующие времен-

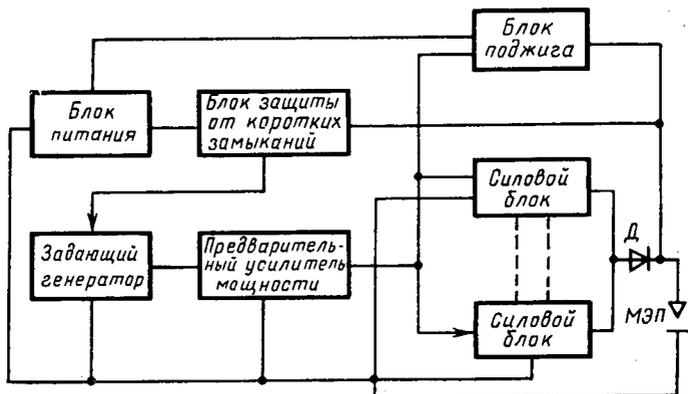


Рис. 13.5. Структурная схема широкодиапазонного генератора импульсов

ные 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. 13.5. Она включает в себя источник питания, силовые блоки, число которых может быть равно шести, с разделительным диодом *Д*, 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 малоэнергетичный импульс. Он способствует пробое промежутка и формированию низковольтного разряда. До пробоя разделительный диод *Д* заперт. После пробоя напряжение на промежутке снижается до 40—25 В, диод *Д* 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.

Для электроэрозионной обработки 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 генераторов импульсов, которые по принципу работы подразделяют на коммутаторные и индукторные генераторы.

*Машинный коммутаторный генератор (МКГ)* включает в себя переменного-полюсную магнитную систему на статоре и обмотку на якоре. Обмотка якоря по его окружности распределена неравномерно, а на узких частях под полюсами, которых у МКГ значительно больше, чем у обычных машин, благодаря чему повышается частота тока генератора. При вращении якоря генератора в его обмотке, расположенной на узком участке напротив полюсов индуктора, в момент прохождения ею переменного-полюсного индуктора индуцируется симметричная импульсная ЭДС.

Униполяризацию импульсов производят с помощью расположенного на одном валу с якорем коллектора (коммутатора), состоящего из двух систем сегментов с наложенными на них щетками. Наличие пауз между импульсами облегчает коммутацию, поскольку переход щеток с одной системы сегментов на другую происходит в моменты отсутствия напряжения в обмотке якоря.

*Машинный индукторный генератор импульсов (МИ)* — электрическая машина бесколлекторного типа, вырабатывающая переменное напряжение повышенной частоты. Его основная особенность — отсутствие вращающейся полюсной системы, которая заменена зубчатым индуктором. Обмотки якоря и возбуждения расположены на статоре генератора. Переменный магнитный поток возникает за счет изменения сопротивления магнитной цепи генератора, обусловленного зубчатостью вращающегося индуктора.

Вследствие применения зубчатого индуктора получают несимметричную кривую переменного напряжения с различными амплитудами полуволн положительной и отрицательной полярности. При достаточно малой амплитуде обратной полуволны напряжения пробой межэлектродного промежутка происходит только при импульсах напряжения прямой полярности, в результате чего импульсы тока будут униполярными.

### **§ 13.4. Разновидности электроэрозионной обработки и элементы ее 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 электрода-инструмента, представляющего собой обратное отображение формы детали. При этой схеме обработки путем поступательного движения электрод-инструмент внедряется в заготовку по мере удаления металла под воздействием импульсов электрической энергии. Точность формы получаемой детали в этом случае зависит от точности изготовления электрода-инструмента и его износа.

2. Взаимное перемещение заготовки и электрода-инструмента 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. Осуществляя взаимное перемещение специального инструмента и заготовки по определенному закону, получают изделие сложной формы. Эта схема требует сложного оборудования и электродов-инструментов.

Наиболее широкое распространение в практике получила первая схема, а выполняемые с ее помощью операции называют копировально-прошивочными. Электроэрозионное прошивание круглых отверстий сплошным электродом-инструментом — одна из наиболее широко применяемых в машиностроении операций. Ее частным случаем является прошивание отверстий с криволинейной осью. Принципиальные схемы проведения этих операций показаны на рис. 13.6, а, б.

Последнюю из этих операций производят аналогично первой, но электрод-инструмент, являющийся катодом, имеет криволинейную форму, повторяемую в изделии.

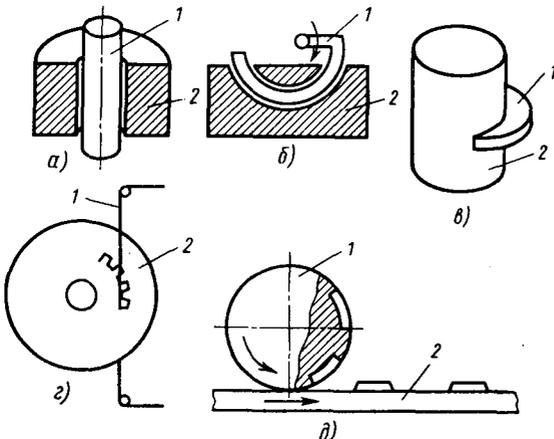


Рис. 13.6. Схема электроэрозионной обработки:  
1 — электрод-инструмент; 2 — электрод-изделие

По второй технологической схеме электроэрозионной обработки проводят резание с использованием в качестве электрода-инструмента металлического диска или проволоки (рис. 13.6, в, г). Обработка проволочным ЭИ позволяет вырезать сложноконтурные детали высокой точности. Для нее характерны доступность и относительная несложность автоматизации движе-

ния подачи по заданной программе. Недостатком операций по этой схеме является ограничение их использования только вырезными или отрезными работами.

Операции третьей схемы электроэрозионной обработки получили наименьшее распространение. Они используются при обкатке (рис. 13.6, *д*), электроэрозионной правке фасонных электроалмазных кругов, образовании в стальных и твердосплавных роликах и валках узких (менее 0,5 мм) канавок и т. д.

**Элементы электроэрозионного станка.** Процесс электроэрозионной обработки происходит при объединении в одно целое генератора импульсов, системы автоматического регулирования МЭП, а также непосредственно электроэрозионного станка. Последний должен обеспечить необходимое взаимное расположение обоих электродов, их закрепление и относительное перемещение, подвод к ним питания от ГИ, заданные условия для протекания электрических разрядов в рабочей жидкости, условия для наблюдения за процессом обработки с соблюдением правил безопасности.

Генераторы импульсов (типа *RC*, *CC* и др.) располагают в станине станков. Если этого не позволяют размеры ГИ, то его выполняют как отдельный агрегат и располагают возможно ближе к станку. Электрическую цепь между ГИ и электродами делают возможно короче и выполняют ее многожильными коаксиальными проводами для уменьшения влияния поверхностного эффекта.

Электроэрозионные станки снабжены специальными ваннами для обеспечения условий протекания электрических разрядов в рабочей жидкости. У одного типа станков имеются стол, служащий для установки и закрепления детали, и рабочая головка с несущим ЭИ электрододержателем. Стол и головка смонтированы на общем угловом кронштейне. После закрепления и выверки взаиморасположения ЭЗ и ЭИ кронштейн перед началом ЭЭО вместе с деталью и ЭИ погружают в заполненную рабочей жидкостью ванну. У станков этого типа имеется недостаток — при опускании кронштейна в ванну может возникнуть дополнительная погрешность.

У станков другого типа, лишенных указанного недостатка, кронштейн с закрепленными на нем ЭИ и деталью остается неподвижным, а перед ЭЭО поднимается заполненная рабочей жидкостью ванна.

Необходимое движение электрода-инструмента обеспечивается приводом его подачи. Контроль за процессом производят по показаниям электрических приборов (вольтметра и амперметра). Кроме регулирования электрического режима в установках ЭЭО необходимо осуществлять автоматическое регулирование перемещения электрода-инструмента. Для этого существуют автоматические регуляторы межэлектродного промежутка. Они должны удовлетворять следующим основным требованиям: точно поддерживать заданное значение управляемой величины, определяющей

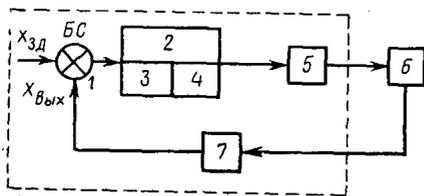


Рис. 13.7. Функциональная схема электроэрозионного станка

установленный зазор; обладать малой инерционностью всех своих элементов; быть малогабаритным, экономичным, недорогим в изготовлении, простым и надежным в работе.

Функциональная схема для электроэрозионных станков в общем случае представляет собой автоматическую систему с обратной связью по выходному сигналу (рис. 13.7). С датчика 7 выходной величины  $X_{\text{вых}}$  сигнал с объекта управления 6 (МЭП) поступает на блок сравнения 1 (БС). С БС разность выходного и заданного  $X_{\text{зд}}$  сигналов усиливается схемой 2, через преобразователь 3 и усилитель мощности 4 поступает на исполнительный орган 5. При ЭЭО конфигурация МЭП постоянно изменяется, что всегда дает отличную от нуля разность между заданным  $X_{\text{зд}}$  и выходным  $X_{\text{вых}}$  значениями. Под ее воздействием привод подает электрод-инструмент, поддерживая заданный зазор в определенной части МЭП.

Ввиду затруднительности непосредственного измерения зазора межэлектродного промежутка в качестве параметра регулирования используется ток разряда, падение напряжения на нем или их комбинация.

Регуляторы могут быть выполнены взвешенного типа. При этом сила тяжести несущего электрода-инструмента подвижной системы частично или полностью уравнивается усилием электромагнита, являющимся функцией падения напряжения на разрядном промежутке. В регуляторах жесткого типа электродвигатель в зависимости от полученного сигнала перемещает подвижную систему вверх или вниз. От электродвигателя к электроду применяется жесткая механическая передача (рейка, винтовая, эксцентриковая или роликовая передача).

В прецизионных станках используется дифференциальный привод с двумя электродвигателями, вращение которых в нормальном режиме компенсирует друг друга, а перемещение электрода происходит при неравенстве их частот вращения.

Существующие станки для ЭЭО можно условно подразделить на два типа: копирувально-прошивочные и для обработки непрофилированным инструментом. Первые предназначены для создания полостей сложной формы, прошивания сложноконтурных окон фасонных и прямолинейных щелей, отверстий цилиндрической и более сложной конфигурации и др.

Электроэрозионный копирувально-прошивочный станок включает в себя станину, рабочий стол для крепления детали, ванну с рабочей жидкостью, устройства вертикального, поперечного и продольного перемещений ЭИ, генератор импульсов, блок управления

станком, бак с рабочей жидкостью и вспомогательные устройства (перекачки жидкости и т. д.).

Примером станков этого типа может служить станок модели 4A724 нормальной точности. Он оснащен генераторами ГМС-400 и МГП-П9 и позволяет обрабатывать заготовки массой до 1200 кг при максимальной производительности по стали — 7000 мм<sup>3</sup>/мин, шероховатость поверхности не выше 7-го класса, потребляемая мощность — до 45 кВт.

В станках для обработки непрофилированным инструментом тонкая медная, латунная или вольфрамовая проволока перематывается с одной катушки на другую. Электрод-заготовка закреплена на рабочем столе, который может перемещаться по координатам *X* и *Y* соответствующими приводами, работающими по командам от системы управления.

Один из зажимов *ГИ* крепится к электроду-инструменту (чаще — отрицательный); второй — к ЭЗ.

Станки для проволочной вырезки оснащены электроконтактной копировальной системой. В качестве шупа в них используется сам электрод-проволока. Примером станков такого типа может служить электронскровой станок для профильной вырезки по копиру моделей 4531, предназначенный для получения деталей со сложным контуром. Его модификация — станок модели 4531П — имеет числовое программное управление с записью программы на перфоленте. В этом случае станок работает по программе в автоматическом режиме.

В электроэрозионных станках напряжение до 250 В подводится непосредственно к электродам и возможно поражение обслуживающего персонала электрическим током. Хотя при работе оба электрода малодоступны, токоведущие части станка должны быть размещены внутри металлического заземленного корпуса. При питании станков от генераторов импульсного напряжения они снабжены импульсными трансформаторами и имеют относительно низкое напряжение разряда. Тем не менее необходимо заземление хотя бы одного из электродов во избежание появления на них высокого напряжения при повреждении изоляции импульсного трансформатора.

При использовании станков с конденсаторными батареями необходимо устанавливать сопротивления для снятия с них заряда. В станках с высоким напряжением на конденсаторах необходимы блокировки, которые автоматически разряжают батарею замыкателем при открывании дверей шкафа. При питании схемы управления станка от сети напряжением 220—380 В предусматривается блокировка на дверцах шкафа, отключающая при их открывании все цепи управления от сети.

### § 13.5. 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 электроэрозионной обработки.

Схема простейшего устройства для ЭКО показана на рис. 13.8. 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. Диск 2 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.

Электроды в общем случае подвергаются одновременно механическому и электрическому воздействию. Мощность электрического воздействия определяется произведением  $UI \cos \varphi$ , где  $U$  и  $I$  — действующие значения напряжения и тока.

Мощность механического воздействия равна  $2\pi M_c n / 60$ , 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  $G_c = k_{тр} G_{пр}$ , где  $k_{тр}$  — коэффициент трения между электродами.

Суммарная мощность, поступающая в МЭП,

$$P = UI \cos \varphi + (2\pi / 60) n G_{пр} k r_d.$$

В зависимости от соотношения между механической и электрической 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 высокой напряженности 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

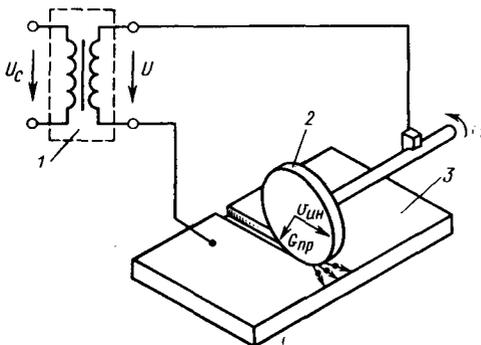


Рис. 13.8. Схема электроконтактной обработки

участками электродов и в результате возникновения электрических разрядов между электродами (как и при ЭЭО).

В наиболее общем случае действуют три источника теплоты: механический, электроконтактный и электроэрозионный. В зависимости от конкретных условий возможны различные сочетания этих источников, порождающие большое разнообразие не схожих по физической сущности процессов.

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 используется относительно простое оборудование, причем станки для ЭКО, как правило, изготовлены на базе металлорежущих станков. В случае ЭКО на переменном токе не требуется специально разработанных источников питания. Применяемые для этих целей источники обычно содержат понижающие трансформаторы, первичные обмотки которых включены в промышленную сеть, а со вторичной обмотки напряжение подается на электроды.

Для ЭКО мощность применяемых трансформаторов составляет 30—500 кВ·А, при напряжении на вторичной обмотке 30—70 В (марки СТЭ-34, 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. В этом случае проблема заключается в правильном выборе токопроводов к электродам. Если электродзаготовка неподвижна, токоподвод состоит из двух элементов: скользящей щетки, подводящей ток к электроду-инструменту, и жестко соединенного с электродом-заготовкой контакта. При одновременном вращении ЭИ и ЭЗ токоподвод к ним от зажимов вторичной обмотки трансформатора также осуществляется щеточными устройствами.

В случае разрезания заготовки двумя изолированными друг от друга дисками зажимы трансформатора посредством щеток подключаются к каждому из дисков.

ЭКО на переменном токе имеет более высокие показатели, чем на постоянном; в частности, это экономия электроэнергии, снижение стоимости оборудования и установленной мощности, а также уменьшение занимаемой полезной площади. Применение переменного тока значительно улучшает электробезопасность при ЭКО.

## 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.

### § 14.1. 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.

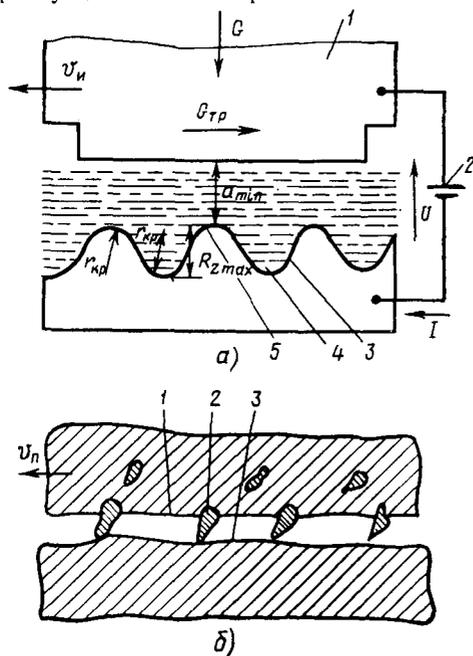


Рис. 14.1. Схема межэлектродного промежутка при анодно-абразивной обработке:

1 — электрод-инструмент (ЭИ); 2 — источник постоянного тока; 3 — электрод-заготовка (ЭЗ); 4 — раствор электролита; 5 — межэлектродный промежуток (МЭП)

Схема межэлектродного промежутка при анодно-абразивной обработке (ААО) показана на рис. 14.1, а, б. Электрод-инструмент, поверхность которого со скоростью  $v_n$  движется вдоль поверхности ЭЗ, подключен к отрицательному полюсу, а к положительному полюсу подключен ЭЗ. Межэлектродный промежуток заполняется раствором электролита.

Приложенная к электроду-инструменту (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 межэлектродный промежуток проходит ток  $I$ , а рас-

ходуемая на обработку электрическая мощность  $P=UI$ , где  $U$  — напряжение источника питания.

Внешняя сила  $G$  вызывает силу трения  $G_{тр}$ , которая приложена к поверхности ЭИ, движущегося со скоростью  $v_n$ . Таким образом, для обработки детали затрачивается также и механическая энергия  $A=v_n G_{тр}$  (обычно она меньше электрической).

При ААО удаляются выступы  $\delta$  на ЭЗ (рис. 14.1, а). Во впадинах материал снимается менее интенсивно.

Снятое с поверхности ЭИ вещество может находиться в трех конечных 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 упомянутых воздействий. Менять роль любого из воздействий можно подбором режима.

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.

При ААО одновременно с процессом анодного растворения некоторого микроучастка на нем нарастает пассивирующая пленка, препятствующая дальнейшему снятию металла. Она образуется вследствие применения соответствующих растворов. В процессе ААО используют электролиты, которые образуют слои оксидов или нерастворимых соединений металла. Поэтому по истечении некоторого времени на первоначально токопроводящем микроучастке обрабатываемого изделия плотность тока снижается. Для возобновления анодного растворения на пассивном участке необходимо удалить образовавшуюся на его поверхности пленку. Для очистки микровыступов от возникшей пленки применяется механическое (абразивное) воздействие на ЭЗ.

Ускорить обработку микровыступов можно подбором таких режимов, при которых плотность тока на выступах больше, чем во впадинах.

Напряжение на столбе электролита для параллельного межэлектродного промежутка (МЭП) определяется по закону Ома:

$$U_{ст} = ja/\sigma_p, \quad (14.1)$$

где  $j$  — плотность тока в МЭП;  $a$  — межэлектродное расстояние;  $\sigma_p$  — средняя электропроводность электролита, зависящая от местных значений температуры и газонаполнения.

Средняя кажущаяся плотность тока

$$j_{ср} = I/F_з, \quad (14.2)$$

где  $F_з$  — площадь обрабатываемой поверхности ЭЗ.

Распределение действительной местной плотности тока в МЭП крайне неравномерно. В соответствии с уравнением (14.1)

$$j = j_з \approx (U_{ст}/a) \sigma_p \approx [(U - \varphi_a - \varphi_k)/a] \sigma_p. \quad (14.3)$$

Плотность тока  $j_z$  имеет максимальные значения на выступах, где  $a = a_{\min}$ , и минимальные — во впадинах, где  $a = a_{\min} + R_{z \max}$ . Действительная плотность тока на выступах  $j_{\text{выст}}$  больше наблюдаемой средней плотности, а во впадинах  $j_{\text{вп}}$  меньше.

Поскольку силовые линии электрического поля концентрируются на микровыступах, которые имеют малый радиус кривизны  $r_{\text{кр}}$ , расстояние  $a$  между ЭЗ и ЭИ на дне впадин уменьшается с увеличением  $R_{z \max}$  и уменьшением местного радиуса кривизны.

Снятие металла будет в большей мере происходить на выступах, если условия ААО обеспечивают такую геометрию МЭП, при которой отношения  $R_{z \max}/a_{\min}$  и  $a_{\min}/r_{\text{кр}}$  имеют небольшие значения. Такие отношения  $j_{\text{выст}}/j_{\text{вп}}$  обеспечиваются подбором режимов в сочетании с применением пассивирующего раствора.

Среда, заполняющая МЭП, расширяется при прохождении через нее рабочего тока вследствие газовой выделении и выделения теплоты. Для сближения электродов необходимо приложить внешнее усилие  $G$ , уравнивающее гидростатическое давление. Такое равновесие наступает при зазоре, которому соответствует среднее давление электрода-инструмента  $P_{\text{ин}} = G/F_z$ .

При давлениях выше  $P_{\text{ин}}$  электропроводные участки касаются друг друга, что приводит к механическому срыву пассивирующей пленки и короткому замыканию на большой площади. При малой же внешней силе длина МЭП увеличивается, при этом падает отношение плотностей токов  $j_{\text{выст}}/j_{\text{вп}}$ . С увеличением зазора анодно-абразивная обработка переходит в электрохимическую. Следовательно, увеличение МЭП и устранение механического контакта электродов повышают долю электрохимических процессов в снятии металла с 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 могут быть установлены на сравнительно большом 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.

### § 14.2. 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 межэлектродном промежутке 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. 14.2).

Формообразование при АМО происходит в основном за счет удаления микровыступов с поверхности ЭЗ термоэрозионным способом.

При высоком напряжении и большом давлении ЭИ на деталь плотность тока на выступах достигает значений, при которых преобладающими становятся *электротермические* явления, обусловленные местным выделением теплоты. В момент кратковременного электрического контакта микровыступа с ЭИ теплота может выделяться и в осевшей пленке, на которую приходится некоторое падение рабочего напряжения. Прохождение тока будет сопровождаться нагреванием или плавлением пленки и распространением теплоты в глубь микровыступа.

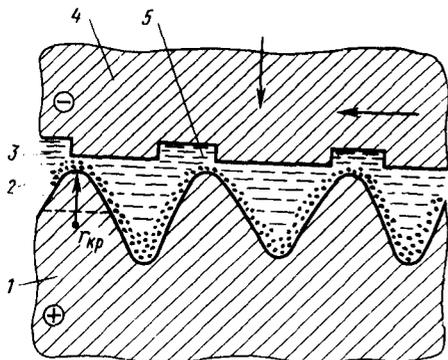


Рис. 14.2. Схема анодно-механической обработки:

1 — обрабатываемая деталь; 2 — пассивная пленка; 3 — электродит; 4 — электрод-инструмент; 5 — канавка

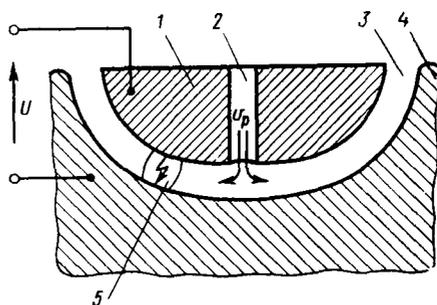


Рис. 14.3. Схема электроэрозионно-химической обработки:

1 — катод — электрод-инструмент (ЭИ); 2 — отверстие для подачи электролита; 3 — межэлектродный промежуток; 4 — анод — электрод-заготовка; 5 — канал разряда

Внутри самого микровыступа плотность тока больше, чем на его поверхности, благодаря свойствам электрического поля в выступе. Если в первом приближении выступ принять за полусферу с радиусом  $r_{кр}$ , то его площадь  $S=2\pi r_{кр}^2$ . Ток через поверхность  $I=2\pi r_{кр}^2 j_{выст}$  сосредоточен в основании выступа, т. е. в глубине металла на площади  $\pi r_{кр}^2$ . Таким образом, плотность тока у подножия выступа в два раза больше, чем на его поверхности, и гораздо выше наблюдаемой средней плотности тока.

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 и 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 анодно-механической обработки одновременно с термоэрозионным разрушением детали может иметь место электрическая эрозия электрода-инструмента, обусловленная разрядами между ближайшими точками электродов. 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.

**Электроэрозионно-химическая обработка.** 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. 14.3. Электроды 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  $\delta$ , заполненный плазмой. На ЭЗ в зоне электродного пят-

на 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.

### § 14.3. Характеристика операций электрохимической обработки

Особенностями электрохимической обработки являются:

а) высокая производительность при высокой чистоте обработки;

б) возможность широкого регулирования режимов обработки от черновой до чистовой без прекращения процесса и без снятия детали со станка;

в) возможность обработки токопроводящих материалов (металлических и металлокерамических) любой твердости;

г) пониженное количество отходов по сравнению с механической обработкой на металлорежущих станках.

Однако существуют и некоторые недостатки. К ним относят необходимость взаимного относительного перемещения инструмента и обрабатываемой детали, что ограничивает область применения такого метода обработки в основном процессами резки и шлифования.

Рассматриваемым методом можно проводить *анодно-механическое резание* заготовок (рис. 14.4).

Деталь 1 соединяется с положительным полюсом источника тока 4 напряжением 20—30 В, а инструмент 2 — с отрицательным. В зазор, образованный между инструментом и поверхностью обрабатываемого изделия, вводят электролит 3, представляющий собой водный рас-

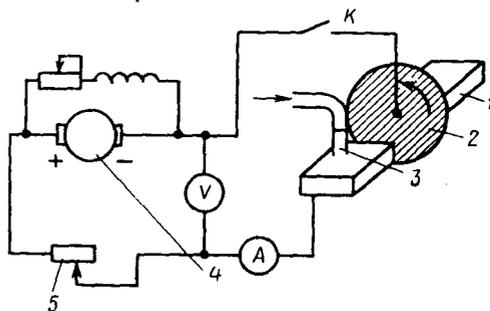


Рис. 14.4. Схема анодно-механического резания

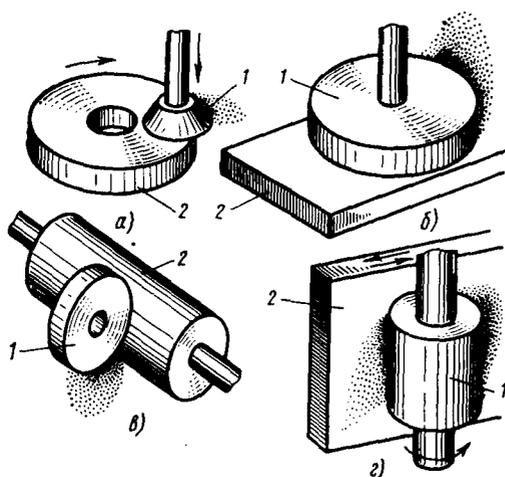


Рис. 14.5. Анодно-механическое шлифование:

1 — вращающийся металлический диск (катод);  
2 — обрабатываемая деталь

кого тока через электролиты. Обработка происходит в результате непрерывного удаления пленки вращающимся диском-инструментом и электролиза, вызывающего растворение металла анода в местах, очищенных от пленки.

*Обдирку — черновое шлифование* (рис. 14.5, а—г) производят с помощью вращающегося металлического диска-анода, который прикасается к поверхности обрабатываемого изделия в среде электролита. При черновом шлифовании применяется повышенная плотность тока, благодаря чему процесс по характеру протекания приближается к электроэрозионному и при высокой производительности обрабатываемая поверхность получается шероховатой.

*Электрохимико-механическую* обработку (ЭХМО) проводят с применением электрически нейтральных инструментов. Она предназначена для получения поверхностей высших классов чистоты. Сюда можно отнести такие операции, как полирование в электролите с суспензией абразива, хонингование катодными головками с абразивными вставками и т. д.

Общим для всех разновидностей этого метода обработки является разделение функций токопроводящей и механической частей инструмента.

Основными положительными чертами ЭХМО являются возможность получения наивысшей чистоты поверхности по сравнению с получаемой другими методами анодно-механической обработки; использование неагрессивных электролитов; работа при низких напряжениях (2—16 В); возможность обработки сплавов повы-

штор жидкого стекла. Регулирование тока производят резистором 5.

Электроду-инструменту придают форму диска и сообщают быстрое вращение. Вращающийся диск увлекает в зазор электролит. Съем металла в месте разрезания происходит в результате протекания рассмотренных выше процессов. В качестве ЭИ может быть использована и бесконечная металлическая лента.

*Чистовая анодно-механическая* обработка происходит за счет анодного растворения металла при прохождении электрического

шенной вязкости, обработки плоских деталей большой площади при небольшой мощности установок и т. д.

#### § 14.4. 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. 14.6) включает в себя трансформатор  $Tp$ , 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 уравнивающим реактором  $УР$ . Ввод команды в блок автоматической подачи ЭИ осуществляется по цепи, включающей трансформатор  $ДТ$ , выпрямитель  $Д$  и настроенный резистор  $R$ . Трансформатор  $ДТ$  фактически является магнитным усилителем с последовательно включенными об-

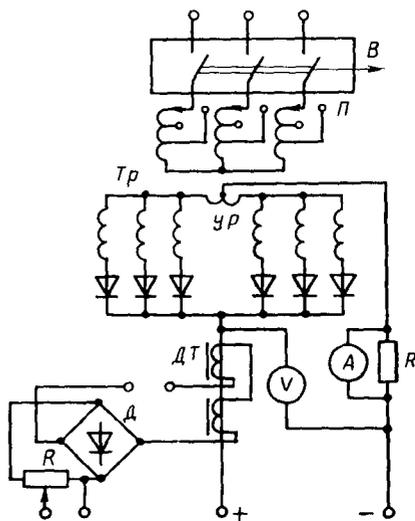


Рис. 14.6. Схема источника питания установки анодно-механической обработки

мотками, питаемыми переменным током через выпрямитель  $Д$ . Обмоткой управления является выходная шина источника питания. Реле тока и автоматический выключатель  $B$  обеспечивают защиту от перегрузок и коротких замыканий. В процессе обработки напряжение питания 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.

## Раздел пятый

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

#### Глава 15

#### УСТАНОВКИ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

##### § 15.1. 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. Рассмотрим эти силы.

Из металлического тела (рис. 15.1) мысленно выделим элементарный объем  $dv$  высотой  $dh$ , шириной  $dr$  и длиной  $dl$ , через который проходит элемент тока  $dI$ . К элементу объема приложено механическое усилие  $dF$ , называемое электродинамической силой:

$$dF = dl [dl B], \quad (15.1)$$

здесь  $B = \mu H$  — магнитная индукция в месте, где находится элемент тока.

Если по индуктору проходит переменный синусоидальный ток, то средняя за период электродинамическая сила

$$dF = 1/2 \operatorname{Re} \{ dl [dl B^*] \}. \quad (15.2)$$

(Символ  $\operatorname{Re}$  указывает, что в расчетах необходимо использовать действительную составляющую комплексного выражения в фигурных скобках.) Элемент тока  $dI = jdq$ , где  $j$  — плотность тока в данной точке;  $dq$  — поперечное сечение элемента тока. Так как  $j = \sigma E$ , то

$$dI = \sigma E dq; \quad dl = l dl; \\ B^* = \mu_a H^*.$$

С учетом изложенного уравнение (15.2) запишем в виде \*

\* Вайнберг А. М. Индукционные плавильные установки. — М.: Энергия, 1967.

$$dF = (1/2) \operatorname{Re} \{ \sigma E dq [ \int l dl \mu_a H^* ] \} = dl dq \mu_a \sigma (1/2) \operatorname{Re} \{ E [ \int l H^* ] \} = \mu_a \sigma \operatorname{Re} \{ (1/2) [ E H^* ] \} dv, \quad (15.3)$$

здесь  $dv = dl dq$  — элемент объема, занимаемый элементарным током.

Выражение в фигурных скобках уравнения (15.3) представляет собой поток энергии, действительную часть которого ( $\operatorname{Re} S$ ) обозначим через  $S$ . Тогда  $dF = \mu_a \sigma S dv$ .

Запишем в общем виде выражение для удельной электродинамической силы, приложенной к единице объема проводника  $F_{уд} = dF/dv$ ;

$$F_{уд} = \mu_a \sigma S. \quad (15.4)$$

Отсюда следует, что направление электродинамических усилий совпадает с направлением потока энергии в данной точке.

Поэтому запишем это выражение в скалярном виде, мысленно приписав  $F_{уд}$  направление потока энергии.

Электродинамические усилия создают в каждой точке металла давление, которое может быть найдено из формулы для  $F_{уд}$ . Так, если в точке, где проходит элементарный ток  $dl$ , имеет место удельная сила  $F_{уд}$ , то значит к элементарному объему  $dv = dl dq$ , через который проходит ток  $dl$ , приложено бесконечно малое усилие  $dF = F_{уд} dv$ . Бесконечно малое давление, создаваемое этим усилием, равно его отношению к площади  $dQ$  (см. рис. 15.1):

$$dp_{сж} = \frac{dF}{dQ} = F_{уд} dv/dQ = F_{уд} dl,$$

так как  $dv = dQ dl$ .

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,

$$p_{сж} = \int_0^r F_{уд} dr, \quad (15.5)$$

или

$$p_{сж} = \mu_a \sigma \int_0^r S dr.$$

Для определения  $F_{уд}$  и  $p_{сж}$  в конкретных случаях надо в урав-

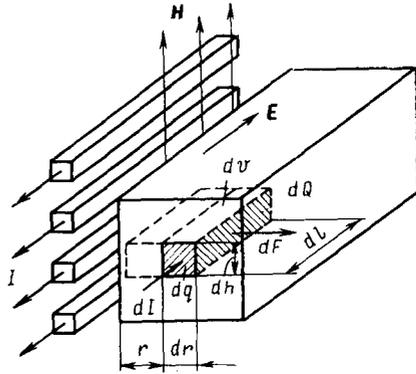


Рис. 15.1. Электродинамические силы в проводящем теле, помещенном в индуктор с переменным током

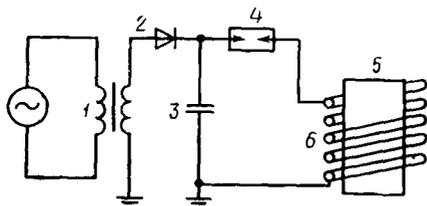


Рис. 15.2. Принципиальная схема электрической цепи установки для магнитоимпульсной обработки металлов

нение (15.5) подставить значение  $S$ , соответствующее этому случаю. Возникающие электродинамические усилия и обусловленные ими давления сжимают металлическое тело и могут вызвать деформации его стенок.

Принципиальная схема установки для осуществления магнитоимпульсной обработки показана на рис. 15.2. Она

включает в себя зарядное устройство, батарею конденсаторов — накопитель энергии, коммутирующее устройство и индуктор.

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

$$W_{\text{разр}} = LI^2/2 + BI^2\tau, \quad (15.6)$$

поскольку  $R \ll L$ ,

$$W_{\text{разр}} = 0,5I^2(L_{\text{уст}} + L_{\text{инд}}),$$

где  $L_{\text{уст}}$  — индуктивность установки (батареи конденсаторов, обмотки и разрядника);  $L_{\text{инд}}$  — индуктивность индуктора.

Электромагнитная энергия (15.6), выделяющаяся в цепи, расходуется на механическую работу деформации заготовки, нагрев заготовки и проводников цепи и частично рассеивается в пространстве.

Эффективность использования энергии батареи определяется соотношением  $\eta = W_{\text{инд}}/W_{\text{разр}} = L_{\text{инд}}/L$ , где  $L = L_{\text{инд}} + L_{\text{уст}}$ .

Полное давление на заготовку ( $\text{кг/см}^2$ ), обусловленное плотностью энергии электромагнитного поля,

$$p = B^2 10^{-6} / (8\pi),$$

где  $B$  — индукция магнитного поля.

При невысокой скорости нарастания магнитного поля и значительной длительности импульса оно может проникнуть за заготовку и вызвать противодействие, что ослабляет результирующее давление на заготовку. Для предотвращения противодействия не-

обходимо, чтобы длительность импульса не превышала времени деформации заготовки:

$$\tau_{\text{деф}} = 2\sqrt{\epsilon\delta}/v,$$

где  $\epsilon$  — перемещение стенки трубчатой заготовки в направлении обжатия, см;  $\delta$  — толщина стенки заготовки;  $v$  — скорость перемещения стенки, см/с.

Скорость перемещения стенки заготовки при деформации

$$v = [B^2/(4\pi\gamma)]^{1/2},$$

где  $\gamma$  — плотность материала заготовки, г/см<sup>3</sup>.

При разрядке конденсатора часть электромагнитной энергии  $W_n$  используется на нагрев материала заготовки:

$$W_n = \frac{B^2}{8\pi} \rho S,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала заготовки, Ом·м;  $S$  — ее поперечное сечение, м<sup>2</sup>.

## § 15.2. Элементы оборудования установок магнитоимпульсной обработки

Установки для магнитоимпульсной обработки (МИО) состоят из двух основных узлов: подготовительного (накопление энергии и формирование импульсного напряжения и тока) и узла 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 накоплении заданного количества энергии батарея разряжается в импульсном режиме на рабочий индуктор 9 через коммутатор 10 и токопровод 11. 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 уста-

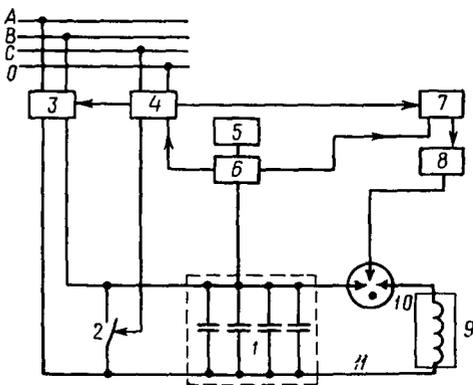


Рис. 15.3. Функциональная схема установки магнитоимпульсной обработки

новленного 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, которые образуются при разряде мощной батареи. Основными элементами генератора являются зарядное устройство, батарея конденсаторов, коммутирующее и поджигающее устройство.

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. В установках МИО для этих целей применяются импульсные конденсаторы, что обусловлено их способностью отдавать накопленную энергию в виде коротких импульсов большой мощности. Конденсаторы должны иметь минимальную индуктивность. Их конструкция должна обеспечивать возможность длительной работы в режиме, близком к режиму короткого замыкания. Соединение конденсаторов в батарею определяется требуемой рабочей характеристикой генератора импульсного тока. Для уменьшения времени разрядки батарей конденсаторов и обеспечения кратковременности выделения энергии в индукторе необходимо уменьшать общую индуктивность установки за счет снижения индуктивности батареи конденсаторов, ошиновки и разрядника, что, в свою очередь, повышает эффективность магнитоимпульсной обработки.

*Коммутирующее устройство* (коммутатор) 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. Коммутатор должен пропускать значительные токи, иметь малую собственную индуктивность, минимальный разброс времени срабатывания и большой срок службы. В установках магнитного формообразования используются механические, ионные и дуговые коммутирующие устройства.

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.

Электрическая схема двухэлектродного газонаполненного разрядника показана на рис. 15.4. В ней предусмотрена емкость  $C_{\Pi}$ , подключаемая к основной цепи с помощью вспомогательного разрядника  $P_{\Pi}$ . При его включении емкость  $C_{\Pi}$  начинает разряжаться через цепь  $L_{\Pi} - L_{\kappa} - 0,5L_{\text{ош}} - \text{земля}$ , при этом в

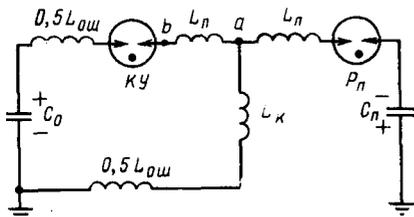


Рис. 15.4. Схема двухэлектродного разрядника

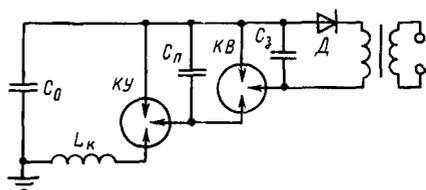


Рис. 15.5. Схема поджигающего устройства

контуре  $C_n - L_n - L_k - 0,5L_{0ш}$  возникают электромагнитные колебания. В момент включения  $P_n$  напряжение в точке  $a$  скачкообразно возрастает от 0 до  $U_{сп}$ , а затем падает по косинусоиде. В начальный момент времени напряжение в точке  $b$  равно  $U_c = U_{сп}$ , в результате чего напряжение на основном коммутирующем устройстве КУ равно сумме напряжений:  $U_{co} + U_{сп}$ . При пробивном напряжении разрядника  $U_{пр} < U_{co} + U_{сп}$  происходит разрядка и основная батарея включается на индуктор.

Поджигающее устройство предназначено для запуска основного разрядника. Они могут быть с механическим и электрическим запуском. Схема поджига с поджигающей емкостью  $C_n$ , заряжаемой от основного зарядного устройства, показана на рис. 15.5. Для запуска основного разрядника КУ надо разрядить емкость поджига  $C_n$ . При этом на электрод поджига подается импульс напряжения, вызывающий вспомогательный разряд. Разрядка конденсатора осуществляется с помощью дополнительной емкости  $C_3$ , заряжаемой вспомогательным выпрямителем  $D$ . Схемы с электрическим запуском применяются в том случае, когда необходимо синхронизировать подачу поджигающего импульса с запуском измерительных или регистрирующих приборов.

Технологический узел—индуктор является одним из наиболее важных узлов установки МИО, поскольку от его конструкции и качества исполнения зависят возможность выполнения МИО и ее качество. К технологическому узлу предъявляют следующие требования:

- высокая эффективность преобразования электрической энергии в механическую энергию деформации заготовки;
- высокие механическая и электрическая прочности;
- конструктивная и технологическая простота.

В зависимости от назначения индукторы выполняют в виде одно- и многовитковых катушек, плоской спирали и др. Долговечность индукторов во многом зависит от качества применяемой изоляции, ее электрических и механических свойств. Чрезмерный нагрев индуктора может вызвать электрический пробой или механическое разрушение изоляции спирали. При прохождении по спира-

ли индуктора больших токов она подвергается значительным механическим и тепловым нагрузкам. Это может вызвать пластическое деформирование спирали, приводящее к разрыву ее витков. Спираль и ее изоляция могут быть частично разгружены от механического воздействия магнитного поля специальными экранирующими вставками.

Необходимый тепловой режим индуктора обеспечивается охлаждением его спирали жидкостью, пропускаемой через специальные каналы в нем. Это позволяет создавать индукторы, способные работать в условиях большой частоты следования разрядов в течение длительного времени.

В одновитковом индукторе спираль изготовлена из высокоэлектропроводного металла (медь, латунь) в виде массивной плиты, сильно увеличенной в радиальном направлении. Для снижения паразитной индуктивности зазор паза между токопроводами выполняют минимально допустимым, исходя из механической и электрической прочности изоляции.

### § 15.3. Характеристика операций магнитоимпульсной обработки

Области применения МИО металлов весьма разнообразны и определяются импульсным характером и большой удельной мощностью возникающих давлений. Этот метод охватывает преимущественно операции обработки давлением при обработке тонкостенных металлических заготовок любых форм.

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

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

Операциями, которые выполняются методом электромагнитного формообразования, могут быть развальцов-

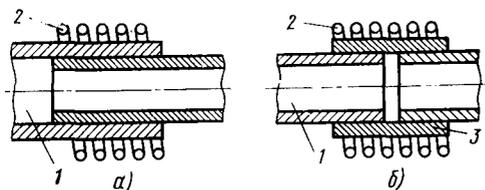


Рис. 15.6. Схема магнитоимпульсной обработки:

а — соединение концов труб; б — соединение труб муфтой; 1 — заготовки; 2 — соленоид; 3 — муфта

ка тонкостенных металлических заготовок любых форм, опрессовка, выдавливание гофров, раздача труб, чеканка, штамповка. Этим методом можно также выполнять опрессовку кабельных наконечников, обжатие тонкостенных металлических труб с образованием резьбы, напрессовку металлических колпачков на фарфоровые изоляторы, многогранные торцовые ключи из цилиндрических заготовок, соединение деталей напрессовкой соединительных колец, соединение металлических деталей с неметаллическими, сборку узлов и изделий, напрессовку втулок на тросы. Принципиальные схемы таких операций предназначены на рис. 15.6.

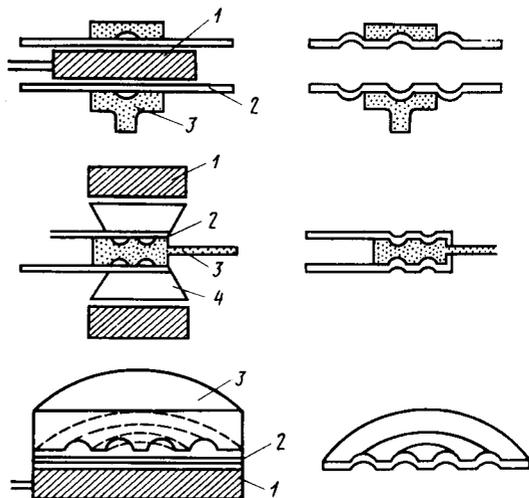


Рис. 15.7. Схема магнитоимпульсного формообразования:

1 — индуктор; 2 — заготовка; 3 — матрица;  
4 — концентратор магнитного поля

Метод формообразования импульсным магнитным полем можно применять для штамповки из металлического листа (рис. 15.7). 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.

Метод формообразования импульсным магнитным полем можно применять для штамповки из металлического листа (рис. 15.7). 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.

## § 15.4. Электромагнитные насосы

Существующие установки электромагнитной транспортировки жидких металлов по принципу действия подразделяют на кондукционные и индукционные, хотя и те и другие являются насосами магнитогидродинамического принципа действия.

**Кондукционные насосы.** 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. Кондукционный насос постоянного тока (рис. 15.8) подобен электродвигателю постоянного тока, в котором обмотка якоря

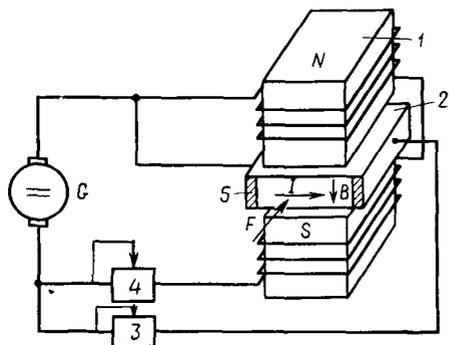


Рис. 15.8. Схема кондукционного насоса постоянного тока:

1 — электромагнит; 2 — канал с токопроводящими шинами 5; 3, 4 — регуляторы тока через канал и катушку электромагнита

заменена электропроводящей жидкостью. Сила, действующая на элементарный проводник  $dl$  с током  $I$  в магнитном поле  $B$ ,

$$F = I [dl \times B]. \quad (15.7)$$

Эта сила перпендикулярна  $dl$  и  $B$ , измеряется в ньютонах и ее направление определяют по правилу левой руки. Сила  $F$  максимальна в случае, когда  $dl$  и  $B$  взаимно перпендикулярны. Если же угол между  $dl$  и  $B$  не равен  $90^\circ$ , то

$$F = IBdl \sin \alpha. \quad (15.8)$$

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

Часто такие насосы и трансформаторы объединяют в одно целое (рис. 15.2). В каждый из полупериодов взаимодействие тока  $i$  и магнитного потока  $\Phi$  создает электромагнитную силу  $F$ , действующую в одном и том же направлении.

**Индукционные насосы.** Индукционные электромагнитные 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,

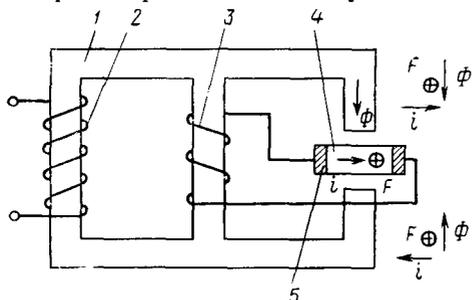


Рис. 15.9. Схема насоса-трансформатора:

1 — магнитопровод; 2, 3 — обмотки трансформатора; 4 — канал с жидкостью; 5 — токопроводящая шина

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. 15.10). Он имеет два статора: внешний 1 и внутренний 2. Трехфаз-

ная обмотка, питающаяся от сети трехфазного тока, размещена в пазах магнитопровода внешнего статора. Иногда трехфазная обмотка размещена и на внешнем и на внутреннем статоре. Между статорами в зазоре находится плоская труба из немагнитного материала 4, внутри которой протекает жидкий металл 3.

На рис. 15.10 показана конструкция, одновиткового насоса, когда труба с жидким металлом делает один виток вокруг внутреннего статора. Она имеет сечение  $\Delta l$ , где  $\Delta$  — толщина слоя металла в радиальном направлении;  $l$  — длина внутренней полости трубы, заполненной жидким металлом, в осевом направлении.

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  $v$  в сторону вращения поля.

Процессы преобразования энергии в индукционном насосе с одним витком жидкого металла могут быть описаны с помощью уравнений и схемы замещения асинхронного электродвигателя с полым немагнитным ротором, если допустить, что индуктивное сопротивление рассеяния ротора в этом случае равно нулю. Электромагнитная мощность, передаваемая от статора жидкому металлу,

$$P_{эм} = m_1 E_1 I_2' = p S v_1^2 B_m^2 t \tau \Delta / \rho, \quad (15.9)$$

где  $E_1 = 2\sqrt{2} f_1 \omega_1 k_{01} \pi l B_m$  — ЭДС взаимной индукции в обмотке статора;  $I_2' = E_1 S / R_2'$  — приведенный ток жидкого металла [ $R_2'$  — приведенное активное сопротивление жидкого металла, которое рассчитывают так же, как и для полого ротора];

$$R_2' = 2\rho l m_1 (\omega_1 k_{01})^2 / (\pi R \Delta),$$

$m_1, \omega_1, k_{01}$  — число фаз, витков и обмоточный коэффициент обмотки статора;  $R$  — радиус полого ротора;  $p$  — число периодов поля;  $S = (v_1 - v) / v_1$  — скольжение жидкого металла относительно поля;  $v_1 = 2\tau f_1 = R\Omega_1$  — линейная скорость перемещения поля;  $B_m$  — амплитудное значение индукции магнитного поля;  $\tau$  — полюсное де-

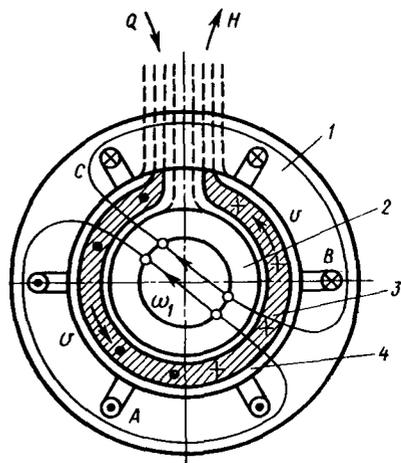


Рис. 15.10. Схема винтового индукционного насоса

ление;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление жидкого металла.

На жидкий металл действует сила

$$F = M/R = P_{эм}/(\Omega_1 R) = P_{эм}/v_1 = \rho S v_1 B^2_m \tau l \Delta / \rho. \quad (15.10)$$

Развиваемый насосом напор

$$H = N/(l \Delta) = \rho S v_1 B^2_m \tau / \rho. \quad (15.11)$$

Механическая мощность насоса

$$P_{мех} = Fv = [F/(l \Delta)](v l \Delta) = HQ, \quad (15.12)$$

где  $Q = v l \Delta$  — объемный расход насоса.

В многотвитковом насосе (труба  $n$  раз охватывает внутренний статор) напор  $H$  увеличивается в  $n$  раз, а расход  $Q$  во столько же раз уменьшается.

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

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

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

### ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

#### § 16.1. 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  $300 \text{ МН/м}^2$ .

По существу, электрический разряд в жидкости — это новый способ преобразования электрической энергии в механическую, которое совершается без промежуточных звеньев и с высоким КПД. Принципиальная схема осуществления электрогидравлического эффекта показана на рис. 16.1. Элементами схемы являются повышающий трансформатор *Tr*, выпрямитель *D*, накопитель энергии *C*, формирующий промежуток *ФП* и разрядный промежуток *РП*.

Искровой высоковольтный разряд в жидкости характеризуется очень быстрым преобразованием запасенной в накопителе электрической энергии в тепловую, световую, механическую и т. д.

При пробое практическая несжимаемость жидкостей приводит к появлению такого явления, как *электрогидравлический удар*, что еще больше усиливает действие электрического взрыва.

В образовании и развитии искрового канала в жидкости можно выделить следующие стадии.

1. При подаче высокого напряжения на разрядный промежуток в жидкости в течение некоторого времени  $\tau_1$  напряжение на нем остается постоянным или незначительно уменьшается. Затем в зависимости от параметров контура и начального напряжения оно довольно резко падает.

При высоких напряжениях на рабочих электродах механизм образования канала разряда обусловлен появлением лидеров. Они образуют потоки электронных лавин, срывающихся с отрицательного и устремляющихся к положительному электроду. В начальной стадии пробоя образуется несколько лидерных каналов, которые затем сливаются в один общий канал.

Длительность промежутка времени  $\tau_1$  определяется свойствами жидкости, напряжением, формой и размерами электродов. Чем выше напряжение, меньше длина рабочего промежутка и площадь положительного электрода, тем меньше  $\tau_1$ . Время  $\tau_1$  характеризует так называемую лидерную стадию разряда. На рис. 16.2 показаны зависимости тока, напряжения, мощности и сопротивления канала разряда от времени. Лидерная, или стриммерная, стадия

длится от момента приложения напряжения к разрядному промежутку до момента завершения пробоя промежутка, т. е. до образования токопроводящего канала между электродами, и составляет около  $10^{-7}$  с.

2. Стадия яркой вспышки начинается после пробоя межэлектродного промежутка. Во время ее прохождения выделяется большая часть запасенной в накопителе энергии. Эта стадия характеризуется небольшим временем протекания и значительным световым излучением. После пробоя сопротивление межэлектродного промежутка падает на несколько порядков, ток при этом резко возрастает (максимум тока на несколько порядков превосходит токи лидерной

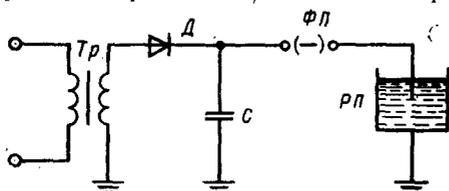


Рис. 16.1. Электрическая схема электрогидравлической обработки

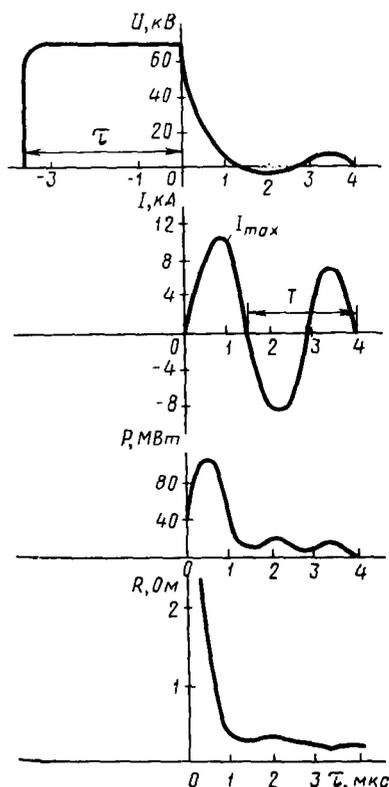


Рис. 16.2. Зависимости тока, напряжения, мощности и сопротивления канала разряда от времени

стадии). Плотность тока в канале разряда достигает значений до  $10^6$  А/см<sup>2</sup> и выше. Плотность выделяющейся в канале энергии также очень велика, что приводит к разогреву окружающей среды, ее диссоциации и ионизации. В результате этого в канале разряда образуется плазма с температурой порядка 15—20 тыс К.

Интенсивный нагрев плазмы разрядным током приводит к повышению давления в канале и его расширению. Во время быстрого расширения канала (скорость увеличения диаметра канала  $10^6$  см/с) в прилегающей жидкости возникает ударная волна, распространяющаяся от канала разряда в виде зоны сжатия с очень крутым передним фронтом. Фронт ударной волны, сначала неотделимый от стенки канала, спустя некоторое время отделяется от нее, поскольку скорость распространения ударной волны в среде гораздо выше скорости расширения канала разряда.

Когда ударная волна подходит к некоторой точке среды, давле-

ние, плотность и другие характеризующие среду параметры скачкообразно возрастают. По мере удаления фронта волны от канала скорость ее распространения приближается к звуковой, а давление на фронте волны падает в результате рассеивания энергии.

3. С уменьшением тока в разрядном контуре при достаточной мощности источника электрической энергии искровой разряд может перейти в стадию дугового. При этом уменьшается плотность тока в канале и температура плазмы в нем. При дуговом разряде ток поддерживается в основном за счет термоэлектронов катода. В канале происходит образование пара за счет превращения остывающей плазмы в пар и испарения некоторой части жидкости из окружающих канал разряда слоев. Канал разряда превращается в парогазовую сферу. По мере расширения сферы давление в ней понижается и становится меньше гидростатического. Окружающие газовую сферу слои воды при этом продолжают двигаться по инерции. После достижения максимального размера сфера начинает сжиматься. Таких циклов расширение — сжатие может быть несколько.

Начальная форма канала разряда, образовавшегося в результате высоковольтного пробоя жидкости, определяется формой лидера, замыкающего электроды. Поэтому такой канал почти всегда искривлен. Возбуждение же разряда с помощью взрывающейся проволоочки образует канал, имеющий геометрически правильную форму в виде прямого цилиндра со сферическими торцами. Начальный диаметр канала при высоковольтном пробое воды составляет несколько десятых долей миллиметра. При возбуждении же разряда проволоочкой начальный диаметр канала разряда определяется диаметром проволоочки.

Материал взрывающихся проволоочек и их размеры существенно влияют на значение и характер выделяемой энергии при высоковольтном разряде в жидкости. Так, время от начала протекания тока до взрыва зависит от сечения взрывающейся проволоочки:

$$\tau_{\text{в}} = kS (U_0/L)^{-2/3}, \quad (16.1)$$

где  $k$  — постоянная, зависящая от свойств материала проволоочки;  $S$  — площадь поперечного сечения проволоочки,  $\text{см}^2$ ;  $L$  — индуктивность разрядного контура, Гн.

С увеличением диаметра проволоочки максимум мощности электрического разряда растет, достигая некоторого оптимального значения, а затем убывает.

Материал и размеры взрывающихся проволоочек влияют и на гидродинамические параметры электрического разряда, в частности на давление и скорость образующейся при разряде ударной волны.

Выбор размера проволоочек обусловлен соблюдением оптимальных параметров разряда как по электрическим, так и по гидродинамическим показателям.

Оптимальный диаметр медной проволоочки при разряде в воде определяют по эмпирической формуле

$$d_{\text{опт}} = 1,6 \cdot 10^{-5} C^{1/3} U^{1/2} L^{-1/6}, \quad (16.2)$$

где  $C$  — емкость конденсаторов, Ф;  $U$  — напряжение, В;  $L$  — индуктивность разрядного контура, Гн.

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. В соответствии с этим режимы работы электрогидравлической установки подбирают так, чтобы большая часть запасенной в конденсаторах — накопителях энергии выделилась в разрядном промежутке за первый полупериод колебания тока. Для питания импульсной энергией установок обработки различных материалов электрогидравлическим методом применяются специальные генераторы, принципиальные схемы которых аналогичны схеме на рис. 16.1.

Конденсатор-накопитель  $C$  заряжается от сети через автотрансформатор, повышающий трансформатор и выпрямитель. Значения импульсов тока в зарядной цепи ограничиваются зарядным сопротивлением. При пробое формирующего промежутка  $\Phi\Pi$  конденсатор разряжается на рабочий искровой промежуток  $P\Pi$  технологического устройства.

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

## § 16.2. Технологическое использование высоковольтного электрического разряда в жидкости

**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 высокой интенсивности, возникающих в жидкости при импульсном электрическом разряде. Основными факторами формообразования методом электрогидравлического разряда являются

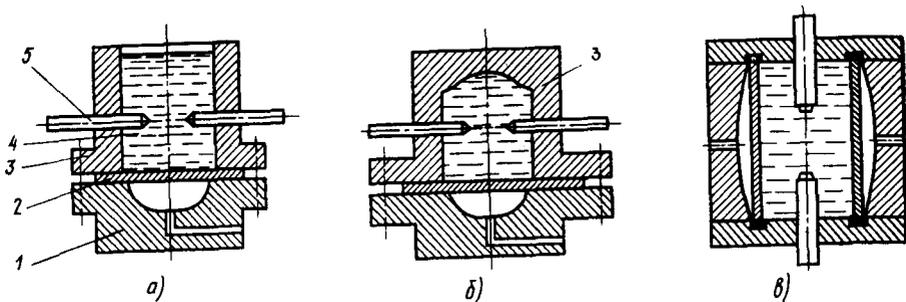


Рис. 16.3. Схема электрогидравлической штамповки

ся сверхвысокие ударные гидравлические давления, мощные кавитационные процессы, ультразвуковое излучение.

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 проволочек, закорачивающих межэлектродный промежуток. Схема электрогидравлической штамповки детали показана на рис. 16.3. 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 гидротока (рис. 16.3, а).

Более эффективно использованию энергии разряда способствует размещение рабочих электродов в замкнутой камере 3 (рис. 16.3, б) или внутри самой заготовки (рис. 16.3, 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 мгновенно испаряется при прохождении импульса 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.

Кроме рассмотренных установок с непосредственным воздействием рабочей среды на заготовку существуют устройства, в которых деформация заготовки производится посредством промежуточного звена (рис. 16.4). Под действием давления, возникающего в верхней части матрицы 2, пуансон 4 движется вниз и придает заготовке 5 необходимую форму.

**Тонкое измельчение.** При этом технологическом приеме материал диспергируется или разрушается волной, которая возникает при электрогидравлическом ударе в жидкости. Разрушающая способность волны зависит от параметров разрядного контура, а энергия импульса — от напряжения и емкости конденсатора.

Для дробления различных минеральных сред применяются специальные электрогидравлические вибраторы (ЭГ-вибраторы). Эти устройства просты и надежны. Они представляют собой систему цилиндр — поршень. Принципиальная схема электрогидравлического вибратора показана на рис. 16.5. Корпус вибратора 2 заполнен жидкостью 3 (водой). От специального источника питания на электроды 4 вибратора подается высоковольтный импульс, вызывающий искровой разряд между ними. При этом в жидкости возникает импульс давления. Под его действием поршень 1 перемещается вдоль своей оси. Следствием движения поршня в полости цилиндра является разрежение, и под действием атмосферного давления поршень возвра-

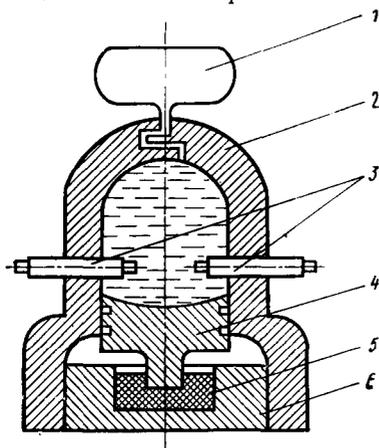


Рис. 16.4. Электрогидравлическая установка для формообразования с жидким промежуточным звеном: 1 — резервуар; 2 — корпус; 3 — электроды; 4 — поршень с пуансоном; 5 — заготовка; 6 — матрица

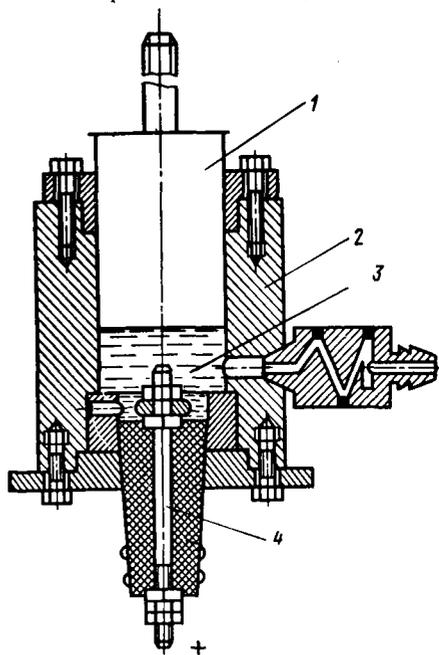


Рис. 16.5. Схема электрогидравлического вибратора

щается в исходное положение. Так осуществляется движение поршня назад—вперед. Оно характеризуется определенным механическим импульсом, который передается на обрабатываемый объект. Частота перемещения поршня задается частотой электрических разрядов в том случае, если общее время движения поршня вперед—назад меньше периода следования разрядов.

## Глава 17

### УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

#### § 17.1. Физическая сущность ультразвуковой обработки

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

Звуковые волны представляют собой механические упругие колебания, которые могут распространяться только в упругой среде в отличие от электромагнитных колебаний. Длина звуковой волны  $\lambda = v/f$ , где  $v$  — скорость распространения волны;  $f$  — частота волны. При распространении звуковой волны в упругой среде 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:  $p/y = \gamma v = R_a$ , где  $p$  — звуковое давление;  $y$  — колебательная скорость;  $\gamma$  — плотность среды,  $\text{г/м}^3$ ;  $v$  — скорость распространения волны;  $R_a$  — акустическое сопротивление.

Скорость распространения звуковой волны зависит от плотности среды, в которой движется волна:  $v = S/\gamma$ , здесь  $S$  — модуль продольной упругости (модуль Юнга).

Из формулы следует, что скорость звуковой волны тем больше, чем жестче и легче материал среды.

При распространении в материальной среде звуковая волна переносит определенную энергию, которая может использоваться в технологических процессах. Преимуществами ультразвуковой обработки следует считать:

1) возможность получения акустической энергии различными техническими приемами;

2) широту диапазона технологического применения ультразвука — от размерной обработки до получения неразъемных соединений (сварка, пайка и т. д.);

3) простоту эксплуатации и автоматизации промышленных установок.

К недостаткам этого метода относятся: повышенная стоимость акустической энергии по сравнению с другими видами энергии; необходимость изготовления специальных установок и аппаратов для генерации ультразвуковых колебаний, их передачи и распределения.

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

*Кавитация* — нарушение сплошности жидкости, возникающее при давлении ниже некоторого критического значения. При этом происходит процесс образования полостей и пузырьков в ультразвуковом 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  $10^7$ — $10^8$  Н/м<sup>2</sup>.

*Поглощение ультразвуковых колебаний* веществом — необратимый процесс, в котором часть энергии превращается в тепловую энергию, другая же часть расходуется на изменение структуры вещества. Поглощение возникает вследствие взаимного трения частиц, зависит от свойств вещества и пропорционально квадрату частоты.

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 неомогенных 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 ультразвуковых колебаний происходит вследствие вытеснения газовых пузырьков, которые приходят в движение, объединяются в пузырьки больших размеров и всплывают.

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

## § 17.2. Элементы оборудования ультразвуковых установок

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

**Источники ультразвуковых колебаний** могут быть двух видов: механические и электрические.

К *механическим источникам* относятся ультразвуковые сирены и свистки, принцип действия которых основан на преобразовании механической энергии (например, скорости движения жидкостей или газов). *Электрические источники УЗК* преобразуют электрическую энергию в механические упругие колебания соответствующей частоты. Для этих целей служат различные преобразователи: электродинамические, магнитострикционные, пьезоэлектрические. Наиболее распространенными являются магнитострикционные и пьезоэлектрические.

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

Пакет магнитострикционного преобразователя представляет собой сердечник из тонких пластин, на котором размещена обмотка для возбуждения в нем переменного электромагнитного поля высокой частоты. При магнитострикционном эффекте знак деформации сердечника не изменяется при изменении направления поля на обратное. Частота изменения деформации в 2 раза больше частоты изменения переменного тока, проходящего по обмотке преобразователя, поскольку в положительный и отрицательный полупериоды происходит деформация одного знака.

На основе уравнений магнитострикционного эффекта с использованием метода электромеханических аналогий составляют схемы замещения магнитострикционных преобразователей. Вывод этих уравнений основан на рассмотрении магнитострикционного преобразователя как системы с распределенными параметрами.

В окончательном виде эти уравнения выглядят так:

$$\frac{-jWs}{\sin kl} (\xi_1 + \xi_2) + j\xi_1 W \operatorname{stg} \left( \frac{kl}{2} \right) + \xi_1 z_1 = \frac{\alpha_m U}{j\omega n}; \quad (17.1)$$

$$\frac{-jWs}{\sin kl} (\xi_1 + \xi_2) + j\xi_2 W \operatorname{tg} \left( \frac{kl}{2} \right) + \xi_2 z_2 = \frac{\alpha_m U}{j\omega n}, \quad (17.2)$$

где  $W = \rho c$  — волновое сопротивление материала пакета (здесь  $\rho$  — плотность, г/м<sup>3</sup>;  $c$  — скорость распространения звука, м/с);

$s$  — площадь поперечного сечения пакета,  $m^2$ ;  $k = \omega/c$  — волновое число (здесь  $\omega$  — угловая скорость,  $c^{-1}$ );  $l$  — амплитудное значение механических колебаний,  $m$ ;  $\xi_1$  и  $\xi_2$  — колебательные скорости концов стержней,  $m/c$ ;  $z_1$  и  $z_2$  — суммарные механические сопротивления на концах стержней;  $\alpha_m/(\omega n)$  — коэффициент электромеханической связи пакета (здесь  $n$  — число витков на стержне пакета);  $U$  — электрическое напряжение на обмотке преобразователя;  $B$ ;  $-Ws/(\sin kl)$  и  $Wstg(kl/2)$  — реактивные сопротивления активных стержней пакета (разный знак они имеют потому, что одно из них эквивалентно колеблющейся массе, а другое — упругости).

Протекающий по обмотке преобразователя ток

$$I = U/(j\omega L) - j(\xi_1 + \xi_2)\alpha_m/(\omega n).$$

Первый член в правой части этого уравнения соответствует составляющей тока, вызванной индуктивным сопротивлением преобразователя, а второй — составляющей тока, обусловленной реакцией механической системы и приведенной к электрическим параметрам схемы посредством коэффициента электромеханической связи  $\varphi = \alpha_m/(\omega n)$ .

Входное сопротивление параллельной схемы замещения преобразователя  $Z = U/I$  также имеет две составляющих: электрическую и механическую. Входное сопротивление преобразователя является комплексной величиной с активной и реактивной составляющими:  $Z = R + jX$ . Активная составляющая входного сопротивления в последовательной схеме замещения

$$R_{вх} = R / \{1 + [R / (2\pi f L_s)]^2\}$$

реактивная составляющая

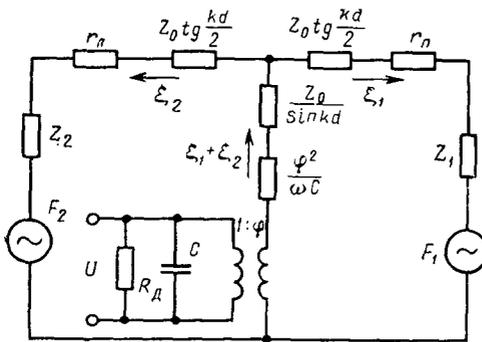


Рис. 17.1. Схема замещения магнитострикционного преобразователя с распределенными параметрами:

$X_L = \omega L_s$  — индуктивное сопротивление преобразователя;  $r$  — сопротивление электрических потерь;  $x_1$  и  $x_2$  — реактивные сопротивления активных стержней пакета, соответственно равные  $tg(kl/2)$  и  $-1/(\sin kl)$

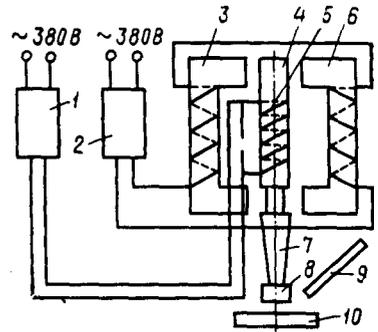


Рис. 17.2. Схема магнитострикционного преобразователя

$$X_{\text{вх}} = 2\pi f L_3 / (1 + 2\pi f L_3 / R)^2,$$

где  $R$  — активное сопротивление параллельной схемы замещения.

По уравнениям (17.1) и (17.2) можно построить схему замещения магнитострикционного преобразователя (рис. 17.1). При этом механическая часть схемы должна иметь три параллельные ветви: первую с колебательной скоростью  $\xi_1$ , вторую с  $\xi_2$  и третью с  $\xi_1 + \xi_2$ . Механическая часть связана с электрической посредством электромеханического трансформатора, на вторичной стороне которого сумма колебательных скоростей пропорциональна току в первичной обмотке.

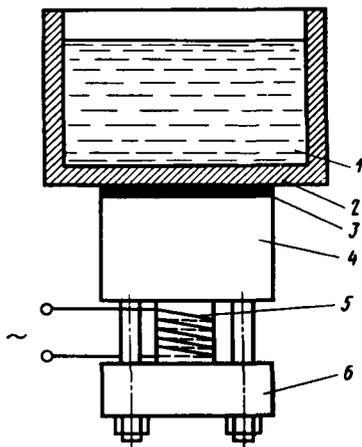
Уравнения (17.1) и (17.2) и схема замещения (рис. 17.1) составлены при условии двустороннего излучения преобразователя.

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  $\varphi/j$  используют при пересчете электрических напряжений в механические усилия;  $j\varphi$  — пересчетный коэффициент колебательных скоростей в токе, а  $\varphi^2$  — коэффициент пересчета электрических сопротивлений в механические. Параметры схемы замещения изменяются в зависимости от конструкции и материала преобразователя.

На рис. 17.2 показана схема магнитострикционного преобразователя. 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. Оно создает в сердечнике преобразователя состояние первоначальной намагниченности — поляризацию. Вследствие магнитострикции сердечник 4 в постоянном магнитном поле изменит свою длину до значения  $l_1$ . При подключении обмотки 5 к генератору 1 протекающий по ней переменный ток высокой частоты создает магнитное поле такой же частоты. В результате в системе будет проходить два магнитных потока: постоянный с индукцией  $B_0$  и переменный с индукцией  $B_n$ . В любой момент времени результирующий магнитный поток  $B_p$  равен их алгебраической сумме  $B_p = B_0 + B_n$ . 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.

Рис. 17.3. Схема замещения пьезоэлектрического преобразователя при двустороннем излучении

Рис. 17.4. Конструкция многослойного пьезопреобразователя:  
 1 — ванна с раствором; 2 — днище ванны; 3 — клеящийся состав; 4 — верхняя накладка; 5 — диски из ЦТС; 6 — нижняя отражающая накладка



Недостатками магнитострикционных преобразователей 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 (толщину и объем) в электрическом поле. Пьезоэлектрический эффект обратим, т. е. если пластину из пьезоматериала подвергнуть деформациям сжатия или растяжения, то на ее гранях появятся электрические заряды. Если пьезоэлемент поместить в переменное электрическое поле, то он будет деформироваться, возбуждая в окружающей среде ультразвуковые колебания. Широкое распространение получили пьезоэлементы на основе титаната бария, цирконата-титаната свинца (ЦТС).

Колеблющаяся пластинка из пьезоэлектрического материала является электромеханическим преобразователем.

Схема замещения пьезоэлектрического преобразователя (рис. 17.3) построена по уравнениям, вытекающим из основных уравнений пьезоэлектрических преобразователей:

$$\begin{aligned}
 -j \frac{W_1 s_1}{\sin kd} (\xi_1 + \xi_2) + j \xi_1 W_1 s_1 \operatorname{tg} \left( \frac{kd}{2} \right) + \xi_1 Z_1 + F_1 &= \varphi U; \\
 -j \frac{W_1 s_1}{\sin kd} (\xi_1 + \xi_3) + j \xi_2 W_1 s_1 \operatorname{tg} \left( \frac{kd}{2} \right) + \xi_2 Z_2 + F_2 &= \varphi U.
 \end{aligned}
 \quad (17.3)$$

Здесь  $W_1 s_1 = Z_0$  — механическое сопротивление пьезопластины;  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  относятся непосредственно к среде;  $Z_1$  и  $Z_2$  — механические сопротивления среды;  $r_n^2$  — сопротивление потерь на внутреннее трение.

При излучении в безграничную среду  $F_1$  и  $F_2$  исключаются. В реальных условиях работы ультразвуковых излучателей значения  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $F_1$  и  $F_2$  определяются конкретным технологическим процессом.

Электрические и механические элементы схемы связаны друг с другом посредством электромеханического трансформатора, что позволяет производить перерасчет механических параметров в электрические, и наоборот.

Емкость  $C$  определяем по формуле для плоского конденсатора:

$$C = \epsilon_n S/d,$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость пьезоматериала;  $S$  — площадь;  $d$  — толщина пьезоматериала.

Сопротивление, обусловленное диэлектрическими потерями,

$$R_d = 1/(2\pi f C \operatorname{tg} \delta),$$

здесь  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь материала. Мощность электрических потерь

$$P_{\text{эл}} = U^2/(2R_d).$$

По схеме замещения можно определить входное сопротивление и амплитуду колебаний торцов преобразователя. Если размеры преобразователя намного превышают длину волны в среде и  $(\rho c)_{\text{сп}}/(\rho c) \ll 1$ , то входное сопротивление и амплитуды рабочих торцов преобразователя определяют по формулам:

$$\begin{aligned} Z &= j\rho c \operatorname{tg}(kd) + (\rho c)_{\text{сп}}/\cos^2(kd), \\ \xi_2 &= \xi_1/\cos(kd), \end{aligned} \quad (17.4)$$

где  $\xi_1$  и  $\xi_2$  — колебательные скорости торцов преобразователя.

Второй член уравнения (17.4) учитывает реакцию среды на изменение входного сопротивления преобразователя.

Как следует из схемы замещения, резонансная частота пьезоэлектрического преобразователя при постоянном напряжении на обкладках определяется реактивным сопротивлением механической части системы.

Условие резонанса пьезоэлектрического преобразователя определяется уравнением

$$\operatorname{tg} kd = 2/(kD_1),$$

где  $D_1$  — толщина пластины, приведенная к площади обкладок. Примером технического применения пьезоэлектрического преобразователя являются установки для озвучивания растворов с целью их гомогенизации (рис. 17.4). Раствор, протекающий по каналу или находящийся в сосуде, облучается определенное время в звуковом поле, что ускоряет растворение компонентов.

**Акустические трансформаторы скорости** (концентраторы продольных упругих колебаний). Они служат для согласования пара-

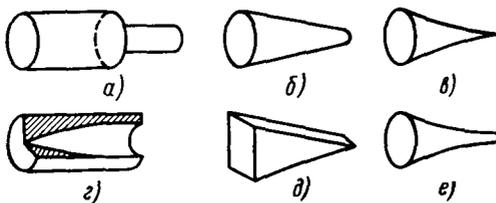


Рис. 17.5. Формы акустических трансформаторов скорости

метров преобразователя с нагрузкой, для крепления колебательной системы и ввода ультразвуковых колебаний в зону обрабатываемого материала. Эти устройства представляют собой стержни различного сечения, выполненные из материалов с коррозионной, кавитационной и жаростойкостью, а также стойкостью в агрессивных средах, на истирание и т. д.

Различные формы акустических трансформаторов скорости показаны на рис. 17.5, *a—e*. Они характеризуются коэффициентом концентрации колебаний. Он равен отношению площади сечения большего торца концентратора (соединенного с вибратором) к малому выходному его торцу (соединенному с инструментом). Увеличение амплитуды колебаний торца с малым сечением по сравнению с амплитудой колебаний торца большого сечения объясняется тем, что при одинаковой мощности колебаний во всех сечениях трансформатора скорости интенсивность колебаний малого торца в  $k$  раз больше.

**Источники питания ультразвуковых установок** предназначены для преобразования электрической энергии промышленной частоты

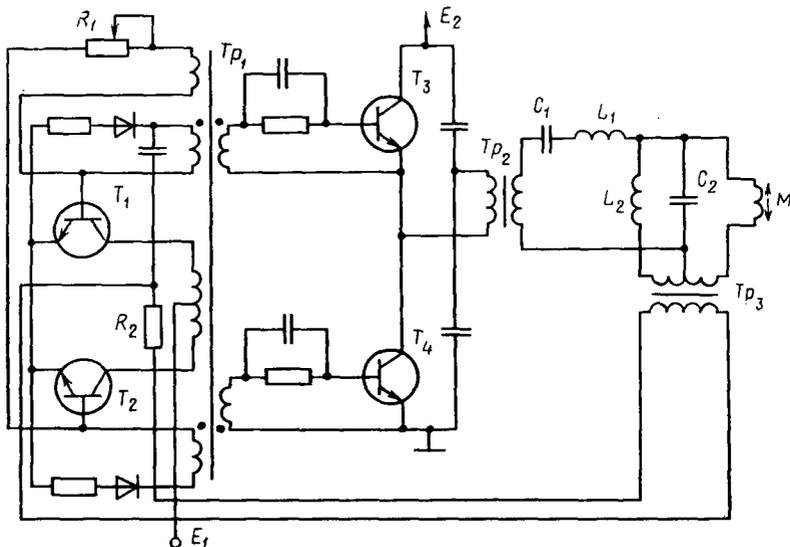


Рис. 17.6. Принципиальная схема ультразвукового генератора УЗГ8-01/22

ты в энергию переменного тока ультразвуковой частоты для возбуждения преобразователя. Они должны удовлетворять следующим основным требованиям: стабильность генерируемой частоты и возможность ее регулирования в заданных пределах; регулирование мощности; небольшие стоимость, масса и размеры; надежность в работе и удобство в эксплуатации.

Существуют ультразвуковые генераторы на транзисторах и тиристорах, ламповые и машинные. Рассмотрим схему ультразвукового генератора УЗГ8-0,1/22 с автоматической подстройкой частоты (рис. 17.6). Генератор предназначен для питания станков размерной обработки. Нагрузка генератора — магнитострикционный преобразователь  $M$ . Генератор состоит из двух каскадов. Первый — возбудитель 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 возбудителя. 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.

### § 17.3. Технологическое использование ультразвуковых колебаний

Технологическое использование ультразвука в промышленности осуществляется по трем основным направлениям: силовое воздействие на материал; интенсификация технологических процессов; ультразвуковые методы контроля.

**Ультразвуковые процессы с силовым воздействием на обрабатываемый материал** применяются для механической обработки твердых и сверхтвердых сплавов, диспергирования и эмульгирования, удаления поверхностных пленок, загрязнений и др.

Принципальная *схема ультразвуковой размерной обработки прошиванием* (долблением) показана на рис. 17.7. При этом методе обработки происходит направленное разрушение твердых и хрупких материалов с помощью инструмента  $З$ , колеблющегося с ультразвуковой частотой. При этом он оказывает на обрабатываемую поверхность  $1$  ударное воздействие посредством мельчайших зерен абразивного порошка  $9$ , вводимого в виде суспензии  $8$  в зазор между торцом инструмента и изделием.

Хотя производительность каждого удара ничтожно мала, производительность ультразвуковой обработки относительно высока, что обусловлено высокой частотой колебаний инструмента (16—

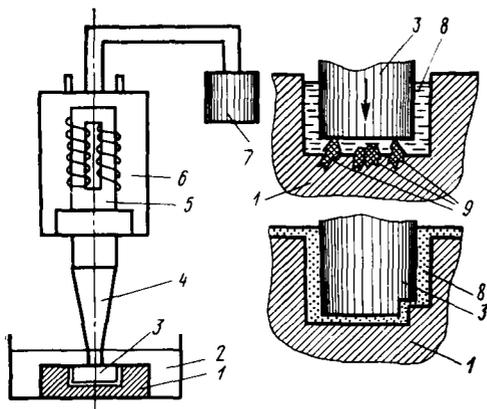


Рис. 17.7. Схема ультразвуковой размерной обработки (шлифование):

1 — обрабатываемая деталь; 2 — ванна; 3 — инструмент; 4 — акустический трансформатор скорости; 5 — магнитострикционный преобразователь; 6 — корпус с охлаждением; 7 — ультразвуковой генератор; 8 — зазор; 9 — частички абразива

30 кГц) и большим количеством зерен абразива (20—100 тыс/см<sup>3</sup>), движущихся одновременно с большим ускорением и ударяющих по обрабатываемой поверхности. Под ударами зерен абразива происходит скалывание мелких частиц материала изделия.

Ультразвуковое диспергирование и эмульгирование происходит под действием интенсивных ультразвуковых волн, вызывающих дробящее действие кавитации и турбулентное движение 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 ультразвуковых волн позволяет существенно повысить производительность процесса. Так, применение ультразвука сокращает длительность процесса изготовления суспензии оксида магния в четыреххлористом углероде с 25 ч до 40 мин.

Ультразвуковым 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 ультразвука с устройством для подвода колебаний в рабочую зону; ванну, сосуд или душевое устройство для ополаскивания изделий, прошедших ультразвуковую очистку.

Наиболее эффективна ультразвуковая очистка при удалении загрязнений из труднодоступных полостей, углублений и каналов небольших размеров, при очистке мелких деталей сложной конфигурации, оптических изделий и т. п.

**Интенсификация технологических процессов.** Ультразвуковые колебания существенно изменяют ход некоторых химических процессов. В частности, обработка ультразвуком значительно ускоряет полимеризацию винилацетата, эмульсии стирола, ацетальдегида и т. д. Интенсификация процесса полимеризации наблюдается лишь при определенной силе ультразвука. При ее снижении может начаться обратный процесс — деполимеризация. Это свойство

ультразвуковых колебаний используется для управления реакциями полимеризации. Изменяя частоту и интенсивность ультразвуковых колебаний, можно обеспечить требуемую технологией необходимую скорость реакции. В металлургии различных металлов введение упругих колебаний ультразвуковой частоты в расплавы приводит к существенному 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 же на расплав ультразвуковых колебаний способствует «растворению» одного металла в другом.

**Ультразвуковые методы контроля.** С помощью ультразвуковых колебаний можно непрерывно контролировать ход технологического процесса без проведения лабораторных анализов проб.

Установив предварительно зависимость параметров звуковой волны от физических свойств среды, измеряя затем амплитуду колебаний частиц, интенсивность ультразвуковых колебаний или скорость звука, можно достаточно точно судить о состоянии среды и ее изменениях.

Как правило, ультразвуковые методы контроля осуществляются с помощью ультразвуковых колебаний небольшой интенсивности. В зависимости от физико-химических характеристик среды скорости звука в ней будут различными. Измерив скорость звука, можно судить о происшедших физико-химических превращениях в данной среде, контролировать ее концентрацию, определять наличие примесей, следить за ходом технологического процесса.

Так как любая упругая среда обладает определенной вязкостью, то при распределении звуковых волн в среде происходит некоторая потеря энергии.

При удалении от источника колебаний амплитуда колебаний плоской волны изменяется по закону  $A = A_0 e^{-\alpha x}$ , где  $A_0$  — амплитуда колебаний в точке  $x=0$ ;  $\alpha$  — коэффициент поглощения среды.

По изменению энергии звуковой волны можно контролировать состав различных смесей, не являющихся химическими соединениями. Скорость звука в таких средах не изменяется, а наличие примесей взвешенного вещества влияет на коэффициент поглощения звуковой энергии. Это дает возможность определять процентное содержание примесей в исходном веществе.

При переходе звуковой волны через границу двух сред она частично отражается. Разность энергии волны, прошедшей через границу раздела, и отраженной волны зависит от соотношения акустических сопротивлений разных сред.

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 шестой

### ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

---

#### Глава 18

#### ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННО-ИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

##### § 18.1. Характеристика электронно-ионных процессов

При воздействии электрического поля высокой напряженности на вещество, находящееся в твердом, жидком или газообразном состоянии, возникают процессы, при которых наряду с изменением физических и химических свойств материала происходит изменение распределения образующих его частиц в пространстве. Это применение электрических полей высокой напряженности в технологических процессах получило общее название электронно-ионной технологии (ЭИТ).

Электронно-ионная технология 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;

*электронепечать* — формирование изображения, получение многократных копий, выполнение матриц для размножения;

*электроформообразование.*

В основе электронно-ионной технологии 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 протекают 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.

Электроосмос используется для удаления избыточной влаги из почв при прокладке транспортных магистралей и гидротехническом строительстве, для сушки торфа, обезвоживания пористых материалов, очистки воды, технических жидкостей и т. д.

Скорость воды при электроосмосе

$$v = c\rho \frac{\gamma^3}{\eta S} \text{ grad } E, \quad (18.1)$$

здесь  $c$  — константа;  $\rho$  — поверхностная плотность зарядов, Кл/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  — объемная плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  — вязкость воды;  $S$  — общая поверхность частиц грунта в единице объема, м<sup>2</sup>.

В электростатических установках протекание процессов обусловлено возникающими кулоновскими силами. Для их возникновения частицы должны быть заряжены.

На практике используются в основном три принципа зарядки частиц: 1) путем осаждения на поверхности частицы ионов из объема газа, окружающего частицу; 2) путем электростатической индукции, т. е. разделения зарядов в электрическом поле; 3) путем механической, химической и тепловой электризации.

Процесс зарядки частиц путем механической, тепловой или химической электризации сложен и мало изучен, поскольку в его основе лежат сложные молекулярные процессы.

Наиболее распространена на практике электризация частиц за счет трения друг о друга и о стенки сосуда (трибоэлектричество).

Контактный заряд проводящей частицы, коснувшейся заряженного тела,

$$q = C\Phi, \quad (18.2)$$

здесь  $C$  — емкость частицы,  $\Phi$ ;  $\phi$  — потенциал заряженного тела, В.

При неоднократном касании частицей заряженного тела ее заряд

$$q = (N_d/\pi) \sqrt{S_k/\pi}, \quad (18.3)$$

здесь  $S_k$  — площадь контактной поверхности, м<sup>2</sup>;  $N_d$  — число контактирований частицы с заряженным телом.

Чтобы уяснить сущность зарядки частиц путем электростатической индукции, представим себе плоский конденсатор, на нижней обкладке которого находится тонкий слой частиц. Если между обкладками конденсатора приложить разность потенциалов  $U$ , то все

частицы получают общий заряд  $q = CU \equiv (S/d)U = SE$  ( $C$  — емкость конденсатора;  $S$  — площадь поверхности пластин конденсатора;  $d$  — расстояние между пластинами конденсатора). Со стороны внешнего электрического поля  $E$  на каждую из частиц действует сила, стремящаяся оторвать частицу от пластины. При увеличении напряжения  $U$  эта сила может преодолеть силу сцепления частиц с обкладкой конденсатора. Частицы оторвутся от пластины и полетят к противоположной обкладке, но уже заряженные.

Наиболее часто в установках ЭИТ используется зарядка частиц путем осаждения ионов на их поверхность из-за достаточно высокой эффективности, т. е. большого значения заряда, приобретаемого частицами. Источником ионов в этом случае может быть коронный разряд.

### § 18.2. Заряд частицы в электрическом поле

Если в газовую среду поместить электроды и подать на них напряжение от источника ЭДС, то под влиянием электрического поля некоторое количество находящихся в среде заряженных частиц движется в этом поле. Вызванный движением частиц электрический ток очень мал. Этот ток существенно увеличится, если в газе возникнет ионизатор, обуславливающий резкое увеличение числа ионизованных частиц. Одним из таких ионизаторов может быть коронный разряд, возникающий в неоднородном электрическом поле. Такое поле имеет место в системе двух коаксиальных электродов, если их радиусы резко отличаются по значению. Причем диаметр внутреннего (коронирующего) электрода много меньше диаметра внешнего (осадительного).

Если на коронирующий и осадительный электроды электрофильтра подать напряжение и по-

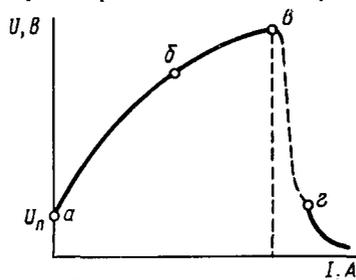


Рис. 18.1. Вольтамперная характеристика системы электродов ( $U_n$  — пороговая разность потенциалов)

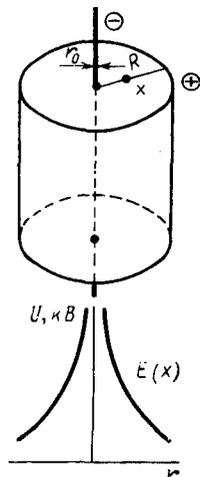


Рис. 18.2. Распределение напряженности электрического поля между коаксиальными электродами

стоянно повышать его, то между ними при определенном значении напряженности электрического поля возникает электрический разряд, имеющий ВАХ, показанную на рис. 18.1. На участке характеристики *ab* ток увеличивается при повышении *U*, что связано с возникновением новых носителей зарядов. При дальнейшем увеличении *U* и достижении начального напряжения между электродами возникает коронный разряд (участок *бв*). Начальную напряженность короны для цилиндрического коронирующего электрода определяем по формуле Пика:

$$E_0 = 30,3\delta (1 + 0,298/\sqrt{\delta r_0}), \quad (18.4)$$

где  $\delta = 3,86 P/T$  — относительная плотность воздуха (*P* — давление, Па; *T* — температура, К);  $r_0$  — радиус коронирующего электрода.

Уравнение ВАХ для любой системы электродов и для любой короны имеет вид

$$i_0 = c_1 U (U - U_0), \quad (18.5)$$

где  $c_1$  — постоянная для данной системы электродов.

Линейную плотность тока короны для системы электродов «коаксиальные цилиндры» определяем по формуле Таунсенда:

$$i_0 = \frac{2k \ 4\pi\epsilon_0}{R^2 \ln(R/r_0)} U (U - U_0).$$

Дальнейшее увеличение напряжения между электродами приводит к пробоеу МЭП и переходу к искровому разряду (участок *вг*), который в дальнейшем может трансформироваться в дуговой (правее точки *г*). Электрофилтры обычно работают в режиме, соответствующем активной короне (участок *бв*).

Из рассмотренных соотношений следует, что распределение электрического поля внутри системы электродов и значение проходящего между ними тока зависят от свойств газа, его температуры и влажности. Напряженность электрического поля вдоль радиуса системы coaxиальных электродов в точке *x* от центра

$$E_x = \frac{U}{x \ln(R/r_0)}, \quad (18.6)$$

здесь *U* — напряжение между электродами.

Качественная картина такого распределения показана на рис. 18.2.

Среда, подвергаемая электростатической очистке (двухфазная смесь — газ и твердые частицы, газ и капли жидкости и т. д.), пропускается через межэлектродный канал. При этом на твердую или жидкую фазу смеси воздействует электрическое поле.

Процесс зарядки частицы в ионном поле коронного разряда заключается в том, что под действием электродинамических сил на частице постепенно накапливается некоторое количество элементарных зарядов. Процесс сосредоточения зарядов на частице про-

текает не мгновенно, и в отдельных случаях для получения максимального заряда частицы необходимо значительное время.

Ионы оседают на поверхность частицы за счет следующих сил.

*Первая сила* создается внешним электрическим полем, часть силовых линий которого пересекает поверхность частицы. Движущиеся по ним ионы сталкиваются с частицей и удерживаются на ее поверхности за счет сил зеркального отображения.

*Вторая сила* обусловлена поляризацией частицы во внешнем поле. Это приводит к искривлению силовых линий результирующего (внешнего и поляризационного) поля и увеличению числа линий, пересекающих поверхность частицы. На частицу попадают те ионы, которые в ее отсутствие не пересекали бы области, ограниченной поверхностью частицы.

*Третья сила* — сила зеркального отображения действует на частицы и ионы, движущиеся вблизи поверхности. Под ее воздействием еще некоторое количество ионов оседает на поверхности частицы.

*Четвертая сила* обусловлена поглощающим действием поверхности частицы. Поэтому концентрация ионов вблизи частицы окажется меньше, чем вдали. Заряженная частица к тому же создает отталкивающее кулоновское поле, которое имеет максимальное значение вблизи ее поверхности. Вследствие наличия градиента концентрации возникает диффузия ионов к частице, стремящаяся выровнять концентрацию. В результате еще часть ионов сможет осесть на частице.

Рассмотренные силы заставляют ион двигаться к поверхности частицы. Этому движению препятствует лишь одна сила — сила отталкивания между ионами, осевшими на частицу, и ионами, приближающимися к ее поверхности. Зарядка, очевидно, прекратится в тот момент, когда отталкивающая сила равна сумме всех притягивающих. Мгновенный заряд проводящей сферической частицы радиусом  $a$  в поле короны:

$$q(\tau) = 12 \pi \epsilon_0 E_k a^2 \frac{\pi e n k \tau}{4 \pi \epsilon_0 + n k e \tau}, \quad (18.7)$$

здесь  $e$  — заряд электрона;  $n$  — концентрация ионов;  $\tau$  — время зарядки;  $k$  — подвижность иона.

Предельный заряд проводящей частицы

$$q_m = 12 \pi \epsilon_0 E_k a^2.$$

Уравнение (18.7) определяет кинетику зарядки проводящей частицы в поле коронного разряда напряженностью  $E_k$ .

При зарядке диэлектрических частиц в поле коронного разряда (в отличие от проводящих частиц) заряд может не распределиться на поверхности частицы по определенному закону, обеспечивающему отсутствие электрического поля внутри частицы. Плотность заряда на поверхности диэлектрической частицы определяется

лишь количеством ионов, осевших в данной точке ее поверхности.

Зарядка частицы продолжается до тех пор, пока к ней присоединяются ионы. С увеличением времени зарядки и числа осевших на частице ионов растет напряженность электрического поля, создаваемая заряжающейся частицей и направленная навстречу основному полю. В результате этого уменьшается скорость зарядки частицы за счет уменьшения скорости движения очередных ионов к частице. При равенстве напряженностей электрических полей, создаваемого заряженной частицей, и внешнего — частица перестанет заряжаться, поскольку на нее перестанут оседать новые ионы. В этот момент диэлектрическая частица имеет предельный заряд

$$q_m = 4\pi\epsilon_0[1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)]E_3a^2, \quad (18.8)$$

где  $E_3$  — напряженность электрического поля в той точке, где частица получает свой заряд, В/м.

### § 18.3. Движение заряженной частицы в электрическом поле

На твердую или жидкую частицу, движущуюся с потоком газа в электрическом поле, действуют следующие силы:

1. Сила тяжести

$$F_d = mg.$$

2. Сила, обусловленная воздействием электрического поля на заряженную частицу,  $F_k = Eq$ . С учетом (18.8)

$$F_k = 4\pi\epsilon_0[1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)]E_3E_k a^2.$$

3. Сила, обусловленная неравномерностью напряженности электрического поля,

$$F_E = 2\pi\epsilon_0 a^3 [(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)] \text{grad} E^2.$$

Расчеты показывают, что сила, обусловленная воздействием поля на взвешенную заряженную частицу, во много раз больше силы, возникающей из-за неравномерного распределения напряженности электрического поля. Поэтому в инженерных расчетах последней можно пренебречь.

4. Сила сопротивления среды движению частицы  $F_c$ . Она всегда имеет место при относительном движении среды и частицы и отсутствует только в вакууме. При обычных атмосферных условиях эта сила оказывает существенное влияние и определяет установившуюся скорость движения.

Нахождение этой силы в различных условиях является одной из основных задач при расчете скорости частицы.

Для шарообразных частиц при их равномерном движении относительно среды со скоростью  $v$  силу сопротивления среды движению частицы определим по формуле Стокса:

$$F_c = 6\pi\mu a v,$$

где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости среды, Н·с/м<sup>2</sup>,  $a$  — радиус частицы.

5. Сила взаимодействия рассматриваемой частицы с другими находящимися поблизости частицами. Это воздействие может быть электрическим и гидродинамическим.

6. Сила, вызванная электрическим ветром. Двигаясь под действием электрического поля, поток ионов оказывает механическое воздействие на молекулы газа, находящиеся на его пути. При этом возникает движение газа, известное под названием *электрического ветра*. Скорость частицы в газе зависит от скорости электрического ветра. Считаться с электрическим ветром следует лишь при скоростях газа порядка 1 м/с.

В общем случае траектория заряженной частицы в электрическом поле может быть описана векторным уравнением:

$$m \frac{dV}{d\tau} = \sum_1^n F,$$

где  $m$  — масса частицы;  $dV/d\tau$  — ее ускорение;  $\sum_1^n F$  — векторная сумма всех перечисленных сил, воздействующих на частицу.

### § 18.4. Осаждение в электрическом поле

Рассмотрим два вида осаждения в электрическом поле: электроосаждение аэрозольных частиц; электроосаждение в электрофильтре.

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):

$$F_k = \frac{q_{\text{ч}} q_{\text{к}}}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

где  $q_{\text{ч}}$ ,  $q_{\text{к}}$  — заряды частицы и капли соответственно, Кл;  $r$  — расстояние между ними, м.

2. Сила индукции между зарядом на капле и индуцированным зарядом на частице:

$$F_{\text{ик}} = - \frac{(\epsilon - 1) d_{\text{ч}}^3 q_{\text{к}}}{(\epsilon + 2) 16\pi\epsilon_0 r^2}.$$

3. Сила индукции между зарядом на частице и индуцированным зарядом на капле:

$$F_{\text{ич}} = \frac{q_{\text{ч}}^2 d_{\text{к}}}{13\pi\epsilon_0 r^3} - \frac{2q_{\text{ч}} d_{\text{к}}^2 r}{\pi\epsilon_0 (4r^2 - d_{\text{к}}^2)^2}.$$

В этих уравнениях  $d_{\text{ч}}$ ,  $d_{\text{к}}$  — 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 возмущающих между ними сил отталкивания.

Механизм осаждения частиц в электрофильтре связан с электрическим полем. Большое значение в этом процессе имеют физические характеристики вещества: проводимость, диэлектрическая проницаемость, плотность и т. д.

Однако кроме физических свойств частиц на процесс осаждения влияет много других факторов: скорость газа, режим встряхивания осадительного электрода, температура, влажность и состав газа, размеры и форма частиц, степень чистоты осадительного электрода, обратная корона. Особенно сложно протекает процесс улавливания в смеси из проводящих и непроводящих частиц.

Рассмотрим простейший случай осаждения частиц, когда осадительный электрод представляет собой чистую зеркальную поверхность, закрепленную неподвижно, 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

$$\frac{dq}{d\tau} = - \frac{\varphi}{R} e^{-\tau/RC} = - 4\pi\epsilon_0 \frac{[1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)] E a^2}{RC}, \quad (18.9)$$

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.

Из (18.9) следует, что важную роль при удержании частицы на стенке осадительного электрода играет ее проводимость. При вы-

сокой проводимости частица разряжается чрезвычайно быстро. Если сила, действующая на частицу со стороны внешнего поля, окажется равной нулю и если при этом пренебречь силами сцепления, то частица потоком газа будет сорвана с электрода. В результате она снова окажется во взвешенном состоянии. Отсюда следует, что в идеальном электрофилт্রে проводящую частицу удержать принципиально невозможно. Если же проводимость частицы мала, то разряжается она медленнее. В любой момент времени на ней будет находиться заряд и частица окажется прижатой полем к электроду.

## Глава 19

### ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ

#### § 19.1. Принцип действия и устройство электрофильтров

Электрофилтър, как агрегат, состоит из следующих основных элементов (рис. 19.1):

1) система подготовки газов для подачи в электрофилтър, в которую входят устройства для увлажнения газа и выравнивания профиля скоростей;

2) источник питания — повышающий трансформатор в комплекте с регулирующим автотрансформатором и высоковольтный выпрямитель;

3) собственно электрофилтър.

Процесс воздействия поля на частицы вещества в электро-

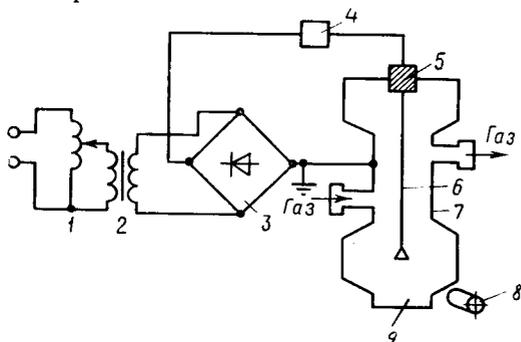


Рис. 19.1. Принципиальная схема электрофилттра:

1 — регулирующий автотрансформатор; 2 — повышающий трансформатор; 3 — высоковольтный выпрямитель; 4 — кабель с ограничительным сопротивлением; 5 — изолирующий ввод; 6 — коронирующий электрод; 7 — осадительный электрод; 8 — механизм встряхивания; 9 — бункер

филттрах включает две стадии: а) предварительная бесконтактная зарядка частиц; б) осаждение частиц за счет кулоновского взаимодействия их зарядов с электрическим полем.

Принцип действия электрофилттра заключается в следующем. От источника питания через изолирующий ввод на коронирующий электрод и осадительный электрод подается высокое напряжение постоянного тока.

Между электродами возникает резко неоднородное электрическое поле. Необходимая разность потенциалов  $U_0$  для возникновения коронного разряда в электрофилт্রে определяется по известному значению  $E_0$  [см. формулу (18.4)] для соответствующей системы электродов. По мере повышения напряжения после возникновения коронного разряда ток быстро возрастает. При дальнейшем повышении напряжения коронный разряд может перейти в искровой. Рабочие токи в электрофилт্রে обычно составляют порядка 0,1—0,5 мА/м длины электрода.

По достижению разностью потенциалов между электродами электрофилтра значения 50—80 кВ напряженность электрического поля способна сообщить свободным электронам и ионам газа скорость выше критической. Энергия таких электронов становится достаточной для ударной ионизации нейтральных частиц. Образующиеся при этом ионы и свободные электроны разгоняются электрическим полем до критических скоростей и ионизируют, в свою очередь, другие атомы и молекулы. Этот процесс нарастает лавинообразно. Подобная ионизация называется *коронированием*. После образования короны в электрофилт্রে возникают две различные зоны. Первая из них расположена вокруг коронирующего электрода. Она заполнена положительно и отрицательно заряженными ионами и электронами. Вторая зона занимает пространство между короной и осадительным электродом, она заполнена только отрицательными ионами и электронами. Поэтому при прохождении через полость электрофилтра 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.

Электрическую энергию, необходимую для сепарации частиц из потока газа в электрофилт্রে, можно теоретически определить при рассмотрении процесса перемещения частицы в газах на расстоянии  $l$  до осадительного электрода под действием силы  $F$  (так как необходимая для зарядки частицы энергия мала, то ею можно пренебречь).

Эту работу определяют по закону Стокса, как силу сопротивления газовой среды движению сферической частицы:

$$A_n = Fl = 6\pi\mu a\omega_n l, \quad (19.1)$$

здесь  $\mu$  — динамическая вязкость газов;  $a$  — радиус частицы;  $\omega_n$  — скорость дрейфа частицы;  $l$  — расстояние.

Практически за счет создания непрерывного коронного разряда энергия, затрачиваемая в электрофилт্রে для выделения взвешенных частиц, в несколько раз больше, чем рассчитанная теоретически. Однако она значительно меньше мощности, расходуемой для

выделения взвешенных частиц из газового потока в аппаратах газоочистки других типов.

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

$$P = \frac{U_m I_{cp} k_{\phi} \cos \varphi}{\sqrt{2} \eta_s} + P_1, \quad (19.2)$$

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);  $k_{\phi}$  — коэффициент формы кривой;  $\eta_s$  — КПД электроагрегата ( $\eta_s \approx 0,8$ );  $\cos \varphi \approx 0,7 \div 0,75$ ;  $P_1$  — мощность, потребляемая механизмами встряхивания электродов, приводами обдувочных устройств, нагревательными и другими вспомогательными устройствами электрофильтров, кВт.

Поскольку эффективность электрофильтра повышается с ростом значения тока и амплитудного (эффективного) значения напряжения, необходимо стремиться к увеличению полезной мощности, затрачиваемой на работу электрофильтра.

Для обеспечения оптимальной эффективности работы потребляемая электрофильтром мощность не должна ограничиваться. Электрофильтр даже большого размера, например электрофильтр ДГПН-55-3, очищающий около  $100 \text{ м}^3/\text{с}$  дымовых газов ( $360\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) от золы при расходе электроэнергии около  $0,83 \text{ МДж}$  на  $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $0,23 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  на  $1000 \text{ м}^3$ ), потребляет всего  $83 \text{ кВт}$ . Ограничение потребляемой мощности ведет к небольшой экономии энергии, но сопровождается резким снижением степени очистки газов.

Достижимый установкой электрофильтров экономический эффект весьма значителен, поскольку пыль, улавливаемая электрофильтром, часто представляет большую ценность, в ней содержатся серебро, медь, никель, сурьма, цинк, свинец, магний и др.

Социально-общественный гигиенический эффект электрофильтров трудно переоценить, так как предприятия энергетической (тепловые электростанции) и металлургической промышленности выбрасывают в воздух огромное количество всевозможных газов, загрязняющих атмосферу и окружающую среду.

Созданы и успешно эксплуатируются электрофильтры для очистки воздуха в животноводческих помещениях и на птицефермах с большой запыленностью и бактерицидной осемененностью. Такие агрегаты ( $U = 7 \text{ кВ}$ ,  $I = 80 \div 100 \text{ мкА}$ ) улавливают более  $90 \%$  пылевых частиц с диаметром более  $1 \text{ мк}$  и  $80 \%$  микроорганизмов, имея при этом производительность  $350\text{—}420 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха.

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

Электрофильтры 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*.

Трубчатый электрофильтр изготовляют из стальных труб, называемых осадительными электродами. По оси труб натянута проволока — коронирующий электрод.

Пластинчатый электрофильтр собирают из ряда параллельных металлических пластин или частого ряда проволок, являющихся осадительными электродами. Между рядами осадительных электродов подвешивают проволочные коронирующие электроды.

В одном корпусе пластинчатого электрофильтра может быть размещено несколько независимых, последовательно расположенных систем электродов (электрических полей). По числу полей такие электрофильтры называются двух-, трех-, четырех- и многопольными.

Пластинчатые электроды улавливают как жидкие, так и твердые частицы. Электрическое поле в них несколько слабее, чем в трубчатых, но зато они проще в изготовлении и встряхивать электроды в них значительно легче, чем в трубчатых.

К вспомогательному оборудованию электрофильтров относятся узлы подвода, распределения и отвода газов, которые должны обеспечивать равномерное распределение газов по сечению каждого из параллельно работающих электрофильтров, а также *входные* и *выходные* коллекторы, имеющие сечение, соответствующее количеству пропускаемых газов на отдельных участках. Для регулирования количества газов, пропускаемых через секции электрофильтров, на выходных участках газопроводов установлены дроссельные заслонки. На входе в электрофильтр установлены специальные газораспределительные устройства в виде диффузоров, направляющих лопаток, решеток и т. д. На выходе электрофильтра чаще всего делают плавный переход от сечения электрофильтра к сечению газопровода или дымовой трубы.

В корпусе электрофилтра 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. В этом случае осадительные электроды расположены открыто между коробками.

Корпус изготовляют из стали (обычной или специальной), алюминия и других металлов или из кирпича, железобетона и других материалов. При необходимости его футеруют и снабжают теплоизоляцией.

*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.

Конструкции коронирующих электродов подразделяют на две группы.

К *первой группе* относятся электроды, которые не имеют фиксированных разрядных точек и при отрицательной короне точки разряда распределяются по поверхности электрода в зависимости от состояния этой поверхности и от режима работы электрофилтра.

К *второй группе* относятся электроды с фиксированными точками разряда по их длине. В качестве таких точек на поверхности электрода расположены острия или шипы. Типичным коронирующим электродом с фиксированными точками является колючая проволока. Применяются также электроды из ленты, уголка со штампованными зубцами или шипами. Иногда шипы располагаются на электродах квадратного или другого профиля.

Коронирующие электроды первой группы применяются в трубчатых и пластинчатых электрофилтрах, а второй группы — преимущественно в пластинчатых.

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

Надежность работы электрофилтров определяется в основном состоянием электродов, большинство которых эксплуатируется в условиях повышенной температуры и агрессивной пылегазовой среды. Поэтому такие ответственные узлы целесообразно изготовлять из материалов повышенного качества — конструкционных и специальных сталей, а также применять термообработку электродов для предотвращения деформации при изменении температуры в процессе эксплуатации. Для мокрых электрофилтров осадитель-

ные электроды можно изготавливать из угля, графита, дерева, кирпича, пластмасс и т. д.

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

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

Для подачи высокого напряжения к осадительным электродам электрофильтра прокладывают стальную шину положительной полярности, которую в нескольких местах присоединяют к контуру заземления. Разрывы линии положительной полярности от выпрямителя к электрофильтру недопустимы, так как в этом случае прикосновение к линии положительной полярности выпрямителя может вызвать поражение электрическим током. Для предотвращения этого у самого выпрямителя линия положительной полярности снабжена искровым предохранителем — прямым ответвлением к заземлению через небольшой воздушный промежуток. При разрыве цепи этот промежуток пробивается искрой и ток в цепи заземления восстанавливается автоматически.

К коронирующим электродам ток подводится по высоковольтному бронированному одножильному кабелю.

В случае небольшого расстояния от подстанции до электрофильтров к ним можно подводить ток по стальным шинам диаметром 10—12 мм, расположенным на опорных изоляторах внутри защитных кожухов.

## **§ 19.2. Источники питания электрофильтров и регулирование их параметров**

Агрегаты питания электрофильтров, их схемы, конструкции блоков и способы регулирования напряжений определяют надежность и эффективность процесса электроочистки газовых сред.

В состав агрегата питания 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 (автотрансформатор, магнитный усилитель с самонасыщением, тиристорный регулятор) ток короны практически остается постоянным, а выходное напряжение изменяется пропорционально сопротивлению нагрузки. При питании от источника напряжения (магнитный усилитель с последовательным, параллельным или смешанным соединением обмоток) ток короны сильно зависит от напряжения.

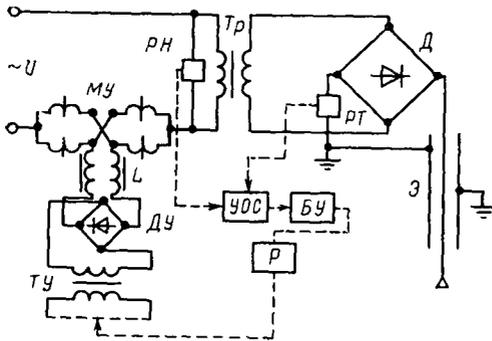


Рис. 19.2. Схема источника питания электрофильтра типа АИФ

Системы регулирования агрегатов питания электрофильтров снабжены устройствами, которые обеспечивают: автоматическое регулирование напряжения от  $U_{\min}$  до  $U_{\max}$  и поддерживают его в пределах пробивного и сниженного на заданное значение; ограничение энергии, выделяющейся при дуговых разрядах в электрофильтре (для предотвращения оп-

лавления электродов), и минимальные перебои в подаче питания, необходимые для гашения дуги при пробое; включение высокого напряжения только минимального значения; возможность повышения и понижения напряжения вручную; аварийное отключение агрегата; сигнализацию исправной работы агрегата и аварийного положения.

Агрегат, показанный на рис. 19.2, состоит из повысительно-выпрямительного блока с высоковольтным переключателем и панели управления. Блок включает в себя высоковольтный повышающий трансформатор  $Tr$  и высоковольтный выпрямитель  $D$ , расположенные в общем баке, заполненном трансформаторным маслом. Высоковольтный трансформатор питает электрофильтр  $\mathcal{E}$  через выпрямитель  $D$ . Отрицательный полюс выпрямителя соединен с коронирующими электродами электрофильтра, а положительный полюс и осадительные электроды заземлены. Магнитный усилитель  $MU$ , включенный последовательно с первичной обмоткой трансформатора, позволяет в широких пределах регулировать высокое напряжение за счет изменения тока подмагничивания.

Во время работы регулятор напряжения  $P$ , снабженный исполнительным механизмом, по команде блока управления  $БУ$  понижает или повышает напряжение на первичной обмотке трансформатора управления  $TU$ . Со вторичной обмотки трансформатора управления через выпрямитель  $D$  и сглаживающие дроссели  $L$  выпрямленное регулируемое по значению напряжение подается в цепь подмагничивания магнитного усилителя  $MU$ , чем регулируется напряжение высоковольтного трансформатора  $Tr$ . При отключении цепи подмагничивания напряжение на высоковольтном трансформаторе снижается до установленного минимума.

Блок управления  $БУ$  представляет собой релейно-контактную систему, состоящую из контакторов, реле, а также защитной и сигнальной аппаратуры. Устройство обратной связи  $УОС$  получает импульсы от датчиков — реле напряжения  $RH$  и реле тока  $PT$  и

передает в блок управления *БУ* для воздействия на регулятор напряжения *P*.

Автоматическое регулирование происходит следующим образом. После подачи напряжения на панель управления система автоматики приводит аппаратуру агрегата в пусковое положение. Напряжение подается на высоковольтный трансформатор *Tr*, и регулятор *P* начинает повышать напряжение на трансформаторе управления *TУ*, увеличивая ток подмагничивания магнитного усилителя *МУ*. При этом повышается напряжение на высоковольтном трансформаторе *Tr* и на электродах электрофильтра. Повышение напряжения продолжается до максимально возможного значения или до возникновения электрических разрядов в электрофильтре.

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 соответствующее реле защиты и отключает в блоке управления контактор в цепи подмагничивания магнитного усилителя *МУ*. Напряжение на высоковольтном трансформаторе снижается до минимального значения и возникшая дуга гаснет.

При отсутствии пробоев в течение установленного времени соответствующее реле включает исполнительный механизм на повышение напряжения в цепи подмагничивания магнитного усилителя до напряжения пробоя, после чего процесс снижения и повышения напряжения повторяется.

В случае возникновения длительных электрических пробоев или коротких замыканий в электрофильтре, т. е. при большом числе циклов понижения напряжения, специальное реле отключает электроагрегат и включает световую и звуковую аварийную сигнализацию.

Контроль работы электроагрегата осуществляется с помощью контрольно-измерительных приборов — вольтметра, амперметра, миллиамперметра и сигнальных ламп. Специальные блокировки служат для сочетания работы агрегата с технологическим процессом производства.

В некоторых источниках питания электрофильтров осуществляется экстремальное регулирование. При этом ведется непрерывный автоматический поиск электрического режима, соответствующего максимальному уровню среднего значения напряжения на электродах фильтра. В них осуществляется ручное и автоматическое управление напряжением и током короны от нуля до номинального значения. Система автоматического управления обеспечивает отрицательную обратную связь между интенсивностью иск-

ровых разрядов и напряжением на выходе источника питания. Интенсивность определяется суммарной длительностью искровых разрядов за некоторый период усреднения, длительность которого может регулироваться. При каждой серии разрядов производится скачкообразное снижение напряжения на фильтре на 0,5—1,5 % от номинального с последующим его плавным повышением. Глубина снижения напряжения агрегата тем больше, чем выше интенсивность разрядов и уровень напряжения перед разрядом.

В результате на электрофильтре существует некоторый близкий к оптимальному динамический уровень напряжения, который изменяется в зависимости от режима его работы.

При возникновении дугового разряда между электродами электрофильтра управляющее устройство на 0,01—0,02 с полностью снимает напряжение с электродов, а затем оно плавно восстанавливается до прежнего уровня в течение 0,02—0,03 с.

При прекращении тока происходит деионизация дугового канала в электрофильтре за время порядка 0,01 с. Такое быстрое действие схем происходит вследствие замены магнитного усилителя тиристорами. Схема силовой цепи такого источника питания показана на рис. 19.3. Тиристорный силовой блок 3 выполняет функции коммутирующей аппаратуры и плавного регулирования напряжения на входе повышающего трансформатора.

**Преобразовательные подстанции для электрофильтров.** Электроагрегаты для питания электрофильтров устанавливают в специальном помещении — преобразовательной подстанции, относящейся к разряду электрических установок напряжением выше 1000 В. Высоковольтное оборудование агрегата с механическим выпрямителем (трансформатор, механический выпрямитель и высоковольтный переключатель) смонтировано в закрытых металлических ячейках, двери которых снабжены механическими и электрическими блокировочными устройствами.

Высоковольтные трансформаторно-выпрямительные блоки с полупроводниковыми выпрямителями установлены в подстанции без ячеек, а при соответствующем исполнении могут быть установлены и вне подстанций возле электрофильтра или в цехе.

Панели (пульта) управления размещают рядом с ячейками (блоками) или напротив. Кроме электроаг-

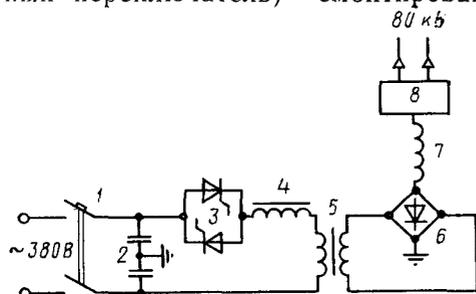


Рис. 19.3. Принципиальная электрическая схема источника питания типа АТФ:

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

регатов в подстанции устанавливают распределительные щиты, силовые сборки, станции управления и прочее электрооборудование установок газоочистки, а также резервные электроагрегаты.

Во время работы механических выпрямителей вследствие соединения азота и кислорода воздуха под действием электрических разрядов в помещении для электрофильтров образуется значительное количество озона и оксидов азота. Кроме того, трансформаторы, регуляторы напряжения, электродвигатели и другое электрооборудование выделяют теплоту, поэтому в помещениях подстанций необходимо устанавливать приточно-вытяжную вентиляцию.

Во время переходных процессов, возникающих при включениях, отключениях электрических разрядов между электродами, а также при работе механического выпрямителя, в цепи электрофильтра возникают колебания повышенной частоты, которые могут попадать в сеть питания и излучаться в окружающее пространство. Для защиты радио, телевизионных устройств и заводских электросетей от частотных воздействий колебаний предусматриваются следующие мероприятия:

линии питания электрофильтра, отходящие от механического выпрямителя, защищают индивидуальным сопротивлением (дросселями);

провода сети, питающей высоковольтные агрегаты с механическими выпрямителями, блокируют конденсаторами;

высоковольтные кабели, идущие от преобразовательной подстанции к электрофильтру, экранируют заземленной сплошной металлической оболочкой;

механические выпрямители устанавливают в экранированных кабинах;

высоковольтные шины заключают в металлические заземленные короба.

### § 19.3. Электростатические технологические процессы и их оборудование

Электрические установки, основанные на явлении электроосмоса, применяются для очистки воды, выделения растворенных в ней веществ, получения питьевой воды для населения и пресной воды для промышленности.

Рассматриваемая далее установка *электроосмотического опреснения* воды позволяет очищать морскую воду и получать из нее пресную. Установка разделена на 10—12 самостоятельных ячеек, принципиальная схема одной из которых показана на рис. 19.4.

Ячейка разделена диафрагмами 3 (из керамики, пергамента, замши и др.) на три отделения. В отделении 6 и 8 вводят электроды 2, на которые подают высокое напряжение постоянного тока. Подлежащая очистке вода по трубам 5 поступает в нижнюю часть

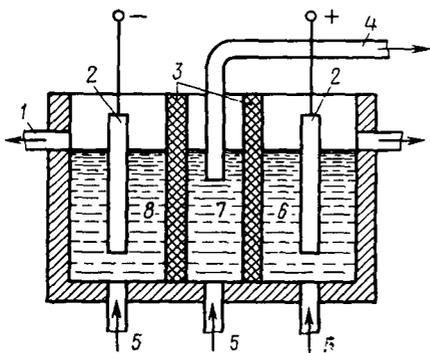


Рис. 19.4. Схема установки электроосмотического опреснения воды

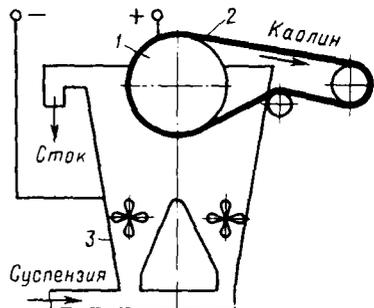


Рис. 19.5. Схема установки для разделения суспензий

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 б). В катодном отделении 8 вода становится щелочной, а в анодном б — кислой и по трубам 1 отводится из этих ячеек.

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

По мере обеднения очищаемой воды солями сопротивление раствора постепенно от ячейки к ячейке возрастает. Поэтому к электродам ячеек от источника постоянного тока подводится напряжение, изменяющееся от 55 до 220 В и увеличивающееся от ячейки к ячейке по мере роста сопротивления раствора. Например, в электроосмотической установке для очистки воды из 12 ячеек на первую группу из пяти ячеек подается напряжение 55 В, на вторую из четырех ячеек — 70 В, на третью из двух ячеек — 110 В и на четвертую из одной ячейки — 220 В.

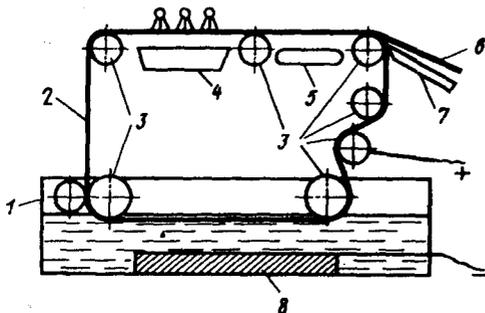


Рис. 19.6. Схема установки для разделения эмульсий

Разделение суспензий основано на явлении электрофореза. Установки для проведения этого процесса используются в промышленности для обезвоживания каолина при очистке его от примесей (пирита, слюды, кварца и т. д.). Для

этой цели загрязненный каолин размешивают в воде, добавляют в него жидкое стекло и после отстаивания удаляют грубые частицы. Полученную водную суспензию каолина пропускают через разделительную установку, принципиальная схема которой показана на рис. 19.5. В этой установке вследствие явления электрофореза твердые частицы суспензии перемещаются в направлении вращающегося анода 1 и осаждаются на фильтровальном сукне 2, покрывающем анод. Отделенная от каолина вода уходит к катоду 3 и затем в слив. Отложения каолина скапливаются на медленно перемещающемся сукне анода.

Разделение эмульсий каучука (латекса) также основано на явлении электрофореза. В помещенной в электростатическое поле эмульсии каучука частицы получают отрицательный заряд и в процессе электрофореза перемещаются к аноду. Осаждение каучука из эмульсии проводят в установке, принципиальное устройство которой показано на рис. 19.6. В наполненной эмульсией каучука

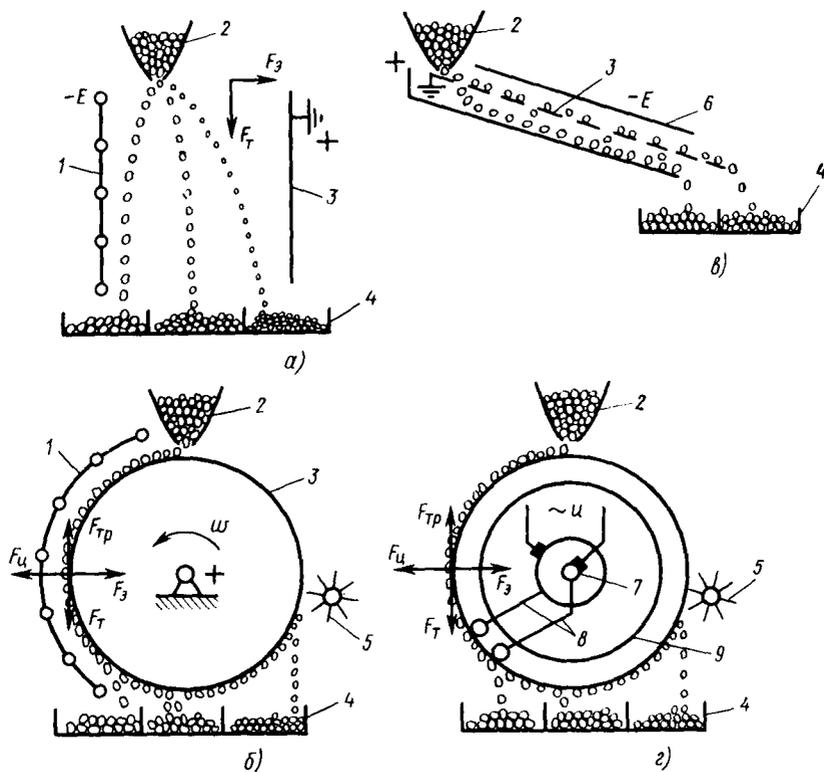


Рис. 19.7. Схемы установок для разделения сыпучих смесей:

1 — коронирующий электрод; 2 — бункер-дозатор; 3 — осадительный электрод; 4 — приемные бункера; 5 — щетка; 6 — плоский электрод; 7 — токопроводящие кольца; 8 — обмотки; 9 — диэлектрический цилиндр

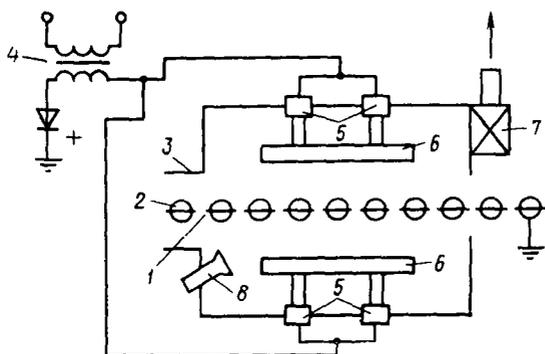


Рис. 19.8. Схема установки для окраски изделий в электростатическом поле

ванне 1 на валиках 3 движется служащая анодом бесконечная металлическая сетка 2. Катод 8 расположен на дне ванны. Осажденный на сетке 2 влажный каучук проходит промывку водой над ванной 4, просушивается на столе 5, после чего сухой каучук 6 срезают с металлической сетки ножом 7.

*Разделение сыпучих смесей* в электрическом поле проводят в установках, принципиальные схемы которых показаны на рис. 19.7. Эти установки предназначены для очистки семян различных культур.

Попадая из бункера-дозатора 2 в поле коронного разряда, семена заряжаются, ориентируются вдоль силовых линий поля и под действием силы  $F_p$  перемещаются от коронирующего электрода 1 к осадительному 3 (рис. 19.7, а, б). Степень перемещения зависит от вида семян и их электрофизических свойств. Наличие этих свойств у очищаемых семян позволило разработать зерноочистительные машины камерного (а), барабанного (б) и решетчатого (в) типов. Обработка семян в электрическом поле повышает их всхожесть, энергию прорастания, выживаемость и урожайность.

Диэлектрический сепаратор семян, принципиальная схема которого показана на рис. 19.7, г, подключается непосредственно к электрической сети переменного тока. Электрическое поле создается параллельно намотанными в один слой на диэлектрическом барабане 9 изолированными проводами 8. Семена подаются на барабан тонким слоем. Электрическое поле удерживает семена на поверхности барабана силой  $F_s$ , зависящей от их диэлектрической проницаемости. При вращении барабана результирующая сила ( $F_s - F_{ц}$ , где  $F_{ц}$  — центробежная сила) отрывает семена от барабана в разных местах нижней его части, что позволяет из одной и той же партии семян, предварительно очищенных другим способом, выделить фракции с однородными качественными показателями.

Принципиальная схема установки для окраски металлических изделий в высоковольтном электрическом поле показана на рис. 19.8. 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, соединенны-

ми 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. В камере окраски установлен вытяжной вентилятор 7, удаляющий из камеры пары растворителей и обеспечивающий заданный состав атмосферы.

Электронно-ионная технология с успехом применяется в сельском хозяйстве при опрыскивании растений, в кабельной и резиновой промышленности для припудривания изделий из резины и для других тонких операций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В книгу не вошли исторические справки по отдельным электротехнологическим процессам и установкам. Диалектику открытий физических явлений, создания на их основе инженерных решений технологических установок следует освоить самостоятельно, отдавая дань пытливости и изобретательности ученых, которые на заре изучения электричества предвидели его великое будущее.

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.

Обещает быть плодотворным взаимодействие электрических и магнитных полей в веществе, а также влияние электромагнитных излучений на биологическую среду. Внедряемые в производство установки для предпосадочной обработки клубней картофеля в электрическом поле, в результате которой урожайность повышается на 15—20 %, предпосевная обработка семян сельскохозяйственных культур излучением оптического квантового генератора, также повышающая всхожесть и урожайность, и другие открывают новую страницу в применении электротехнологии.

Хочется надеяться, что у прочитавших эту книгу появится желание раздвинуть границы электротехнологии, найти новые области ее применения, а может быть новые преобразования электрической энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Болотов А. В., Шепель Г. А. Электротехнологические установки. — Алма-Ата: Мектеп, 1983.
2. Евтюкова И. П. и др. Электротехнологические промышленные установки. — М.: Энергоиздат, 1982.
3. Электрические промышленные печи. Ч. II. Дуговые печи и установки специального нагрева. / Под ред. А. Д. Свенчанского. — М.: Энергоиздат, 1981.
4. Фомичев Е. П. Электротехнологические промышленные установки. — Киев: Вища школа, 1979.
5. Егоров А. В., Моржин А. Ф. Электрические печи. — М.: Metallургия, 1975.
6. Фарнасов Г. А., Рабинович В. Л., Егоров А. В. Электрооборудование и элементы автоматизации электроплавильных установок. — М.: Metallургия, 1976.
7. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в промышленности и приборостроении. — Л., Машиностроение, 1978.
8. Артамонов Б. А. и др. Размерная электрическая обработка металлов. — М.: Высшая школа, 1978.
9. Фомин Н. И., Затуловский Л. М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. — М.: Metallургия, 1979.
10. Гарнов В. И., Вишневский Л. М., Левин Л. Г. Оптимизация работы мощных электрометаллургических установок. — М.: Metallургия, 1981.
11. Электротермическое оборудование (справочник). — М.: Энергия, 1980.
12. Донской А. В., Рамм Г. С., Вигдорович Ю. В. Высокочастотные электротермические установки с ламповыми генераторами. — Л.: Энергия, 1974.
13. Простяков А. А. Индукционные печи и миксеры для плавки чугуна. — М.: Энергия, 1977.
14. Электрооборудование и автоматика электротермических установок (справочник). — М.: Энергия, 1978.
15. Степанов В. Г., Шавров И. Л. Высокоэнергетические импульсные методы обработки материалов. — Л.: Машиностроение, 1975.
16. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. — М.: Машиностроение, 1975.
17. Степанов В. В. Справочник сварщика. — М.: Машиностроение, 1975.
18. Электрошлаковые печи / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев, М.: Машгиз, 1969.
19. Алиев Г. М., Гоник А. Е. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров. — М.: Энергия, 1971.
20. Электрические печи сопротивления и дуговые печи / Под ред. М. Б. Гутмана. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
21. Вагин Г. Я. Электротехнологические промышленные установки. — Горький: изд. ГПТИ, 1981.
22. Миронова А. Н. Электроснабжение электротермических установок. — Чебоксары: изд. ЧГУ, 1983.
23. Яковлев П. Б. Электротехнология. — М.: изд. МЭИ, 1978.
24. Волохонский Л. А. Вакуумные дуговые печи. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

25. Донской А. В., Клубник В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1979.
26. Основы расчета плазмотронов линейной схемы / Под ред. М. Ф. Жукова. — Новосибирск: Наука, 1979.
27. Бортничук Н. И., Крутянский М. М. Плазменно-дуговые плавильные печи. — М.: Энергоиздат, 1981.
28. Четвертко А. И., Патон Б. Е., Тимченко В. А. Оборудование для механизированной дуговой сварки и наплавки. — М.: Машиностроение, 1981.
29. Донской А. В., Келлер О. К., Кратис Г. С. Ультразвуковые электротехнологические установки. — Л.: Энергоиздат, 1982.

*Учебное издание*

**Альберт Васильевич Болотов,  
Георгий Александрович Шепель**

### **ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ**

Зав. редакцией *Н. И. Хрусталева*, Редактор *И. Г. Волкова*. Художественный редактор *В. И. Мешалкин*. Младший редактор *М. В. Никифорова*. Технический редактор *Ю. А. Хорева*. Корректор *В. В. Кожуткина*.

ИБ № 6153

Изд. № СТД-492. Сдано в набор 17.09.87. Подп. в печать 21.03.88. Т-08664. Формат 60×88<sup>1/16</sup>. Бум. офс. № 1. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Объем 20,58 усл. печ. л. 20,58 усл. кр.-отт. 22,19 уч. изд. л. Тираж 17 000 экз. Зак. № 697. Цена 1 р. 20 к.  
Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
129041, Москва, Б. Переяславская, 46.