

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Российский государственный
профессионально-педагогический университет»

И. Л. Щеклеина

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Учебное пособие

Часть 1

Екатеринбург
РГППУ
2015

УДК 621.3.031(075.8)

ББК 3292-5я73-1

Щ 39

Щеклеина, Ирина Леонтьевна.

Щ 39 Электротехнологические установки: учебное пособие: в 2 частях /
И. Л. Щеклеина. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2015.
Ч. 1. 145 с.

ISBN 978-5-8050-0586-3

В пособии отражена физическая сущность технологических процессов, в которых электрическая энергия преобразовывается в тепловую энергию. Проведена классификация и приведены устройства электротермических установок и их применение.

Предназначено для бакалавров профиля «Энергетика», профилизаций «Электропривод и автоматика», «Управление производством: электроснабжение, электро-механика и автоматика» и др.

УДК 621.3.031(075.8)

ББК 3292-5я73-1

Рецензенты: доктор технических наук, профессор А. Л. Карякин (ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»); кандидат технических наук, доцент Ф. Д. Босько (ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»); кандидат педагогических наук, доцент Е. Д. Тельманова (ФГАОУ ВПО «Российский профессионально-педагогический университет»)

ISBN 978-5-8050-0586-3

© ФГАОУ ВО «Российский
государственный профессионально-
педагогический университет», 2015

Оглавление

Введение.....	5
Глава1. Электротехнология.....	8
1.1. Классификация электротехнологических процессов.....	8
1.2. Структура электротехнологического процесса.....	10
1.3. Классификация электротехнологических установок	12
Вопросы и задания для самоконтроля	14
Глава 2. Электротермия	15
2.1. Физико-технические основы электротермии	15
2.1.1. Виды теплопередачи	15
2.1.2. Материалы для электротермических установок.....	18
2.1.3. Принципы измерения и регулирования температуры, при- боры температурного контроля	19
2.1.4. Классификация электротермических установок	28
2.2. Электрические печи сопротивления	29
2.2.1. Физическая сущность нагрева сопротивлением.....	29
2.2.2. Нагревательные элементы.....	32
2.2.3. Основные типы печей сопротивления	36
2.2.4. Электрический расчет печи сопротивления.....	59
2.2.5. Автоматическое регулирование температурного режима	61
2.3. Индукционный нагрев	63
2.3.1. Физические основы индукционного нагрева	63
2.3.2. Классификация индукционных установок	67
2.3.3. Индукционные канальные электропечи	69
2.3.4. Индукционные тигельные печи.....	77
2.3.5. Индукционный нагрев под термообработку	81
2.4. Установки для нагрева полупроводников и диэлектриков.....	83
2.4.1. Физические основы диэлектрического нагрева.....	83
2.4.2. Установки диэлектрического нагрева.....	87
2.5. Электродуговые и руднотермические печи	91
2.5.1. Основы теории и свойства дугового разряда.....	91
2.5.2. Электродуговые печи, их классификация	103
2.5.3. Электрооборудование дуговых печных установок	110
2.5.4. Рабочие режимы и характеристики электродуговых печей	114
2.5.5. Вакуумные дуговые печи	117

2.5.6. Печи электрошлакового переплава	122
2.5.7. Рудно-термические печи	125
2.5.8. Конструкция и электрооборудование рудно-термических печей	130
2.6. Установки плазменного нагрева	132
2.7. Электронно-лучевые установки	136
Вопросы и задания для самоконтроля	140
Заключение	143
Список используемой литературы	144

Введение

Научно-технический прогресс на рубеже XX–XXI вв. неразрывно связан с развитием высоких технологий, обеспечивающих, с одной стороны, получение новых материалов и изделий, а с другой – снижение энерго- и ресурсозатрат и повышение экологических показателей производства.

Значительное место в ряду новых технологий занимают электротехнологии, что связано с многообразием электрофизических, электрохимических эффектов, лежащих в их основе, с простотой контроля и управления электротехнологическими процессами и возможностью их комплексной автоматизации.

К *электротехнологическим* относятся процессы, основанные на преобразовании непосредственно в рабочей зоне технологических установок энергии электрического тока, электрического и магнитного полей в тепловую, химическую или механическую энергии, за счет которых реализуется заданный процесс.

Развитие электротехнологических процессов обеспечивается совершенствующейся 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 неиспользовавшегося ранее сырья или отходов производств, работающих по старой технологии.

Следует отметить, что 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 и десятки миллионов элементов, объединенных в системы сотнями тысяч соединений.

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. Благодаря внедрению контактной сварки достигнут высокий уровень механизации сборочных работ в автомобильной промышленности и авиастроении, обеспечивающий высокую скорость изготовления транспортных средств; благодаря электрошлаковому переплаву стало возможным получение высококачественных металлов.

Только на основе электротехнологий возможен термоядерный синтез, который, как считает лауреат Нобелевской премии В. Л. Гинзбург, является первой по важности задачей физики XXI столетия. Такой синтез в будущем станет источником неисчерпаемой энергии, которая заменит нефть и газ, а его продукт – высокотемпературную плазму – именуют искусственным солнцем.

Прорыв в самой передовой технологии сегодняшнего дня – нанотехнологии, которую называют реализуемой фантастикой, также возможен с помощью электротехнологии, поскольку она имеет дело с электронно-микроскопическими и лазерно-оптическими исследованиями.

Следует отметить, что в настоящее время место государства в мировой экономике определяется не тем, какие отрасли доминируют в его экономике, а тем, какие в этих отраслях используются технологии. Известно, что все высокоразвитые страны (Америка, Япония, Германия) отличаются в первую очередь уровнем технологического процесса и долей в нем самых передовых технологий – электротехнологий.

В первой части данного пособия описаны *электротермические* процессы, в которых используется превращение электрической энергии в тепловую для нагрева материалов и изделий в целях изменения их свойств или формы, а также для их плавления и испарения.

Во второй части будут представлены электротехнологические установки, в которых реализуются следующие процессы, методы и технологии:

- *электросварочные* процессы, в которых получаемая из электрической энергии тепловая энергия используется для нагрева тел в целях осуществления неразъемного соединения с обеспечением непосредственной сплошности в месте сварки;

- *электрохимические* методы обработки и получения материалов, при которых с помощью электрической энергии осуществляется разложение химических соединений и их разделение путем перемещения заряженных

частиц (ионов) в жидкой среде под действием электрического поля (электролиз, гальванотехника, анодная электрохимическая обработка);

- *электрофизические* методы обработки, при которых для воздействия на материалы используется превращение электрической энергии как в механическую, так и в тепловую (электроэрозионная, ультразвуковая, магнитоимпульсная, электровзрывная);

- *аэрозольная* технология, при которой энергия электрического поля используется для сообщения электрического заряда взвешенным в газовом потоке мелким частицам вещества с целью перемещения их под действием поля в нужном направлении.

Последний раздел во второй части будет посвящен *нанотехнологии*, под которой подразумеваются знание и управление процессами, как правило, в масштабе 1 нм (нанометр – это одна миллиардная часть метра), но не исключающее масштаб менее 100 нм, в одном или более измерениях, когда ввод в действие размерного эффекта (явления) приводит к возможности новых применений.

Глава 1. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

1.1. Классификация электротехнологических процессов

Традиционно выделяют пять групп электротехнологических процессов (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Классификация электротехнологических процессов

Наряду с указанными на рис. 1.1 методами в различных отраслях промышленности нашли применение технологические процессы и установки, в которых основные и вспомогательные операции реализуются за счет непосредственного механического (силового) воздействия электрического и магнитного полей на обрабатываемые изделия и материалы. Такие методы и установки можно классифицировать по виду полей, воздействующих на объекты технологической обработки: стационарные, пульсирующие, вращающиеся, бегущие.

Наиболее известные и широко применяемые электротехнологические установки (ЭТУ) используют силовое действие стационарных электрического и магнитного полей. Например, стационарные электрические поля применяются в аэрозольных технологиях (пылегазоочистка, электроокраска, электрография, нанесение порошковых покрытий), в электрических сепараторах для разделения твердых сыпучих смесей, в устройствах водоочистки.

Стационарные магнитные поля используются в магнитных сепараторах для извлечения ферромагнитных предметов и частиц из сырья и отходов, для разделения минеральных смесей в обогательном производстве, при водоочистке, а также для захвата или фиксации стальных заготовок и удаления металлоотходов из рабочей зоны при металлообработке.

С использованием пульсирующих магнитных полей работает ряд электродинамических устройств и некоторые виды магнитных или электродинамических сепараторов.

Воздействие импульсных электромагнитных полей применяется в устройствах для магнитоимпульсной обработки материалов давлением и при электродинамической сепарации.

Вращающиеся и бегущие магнитные поля используются в магнито-гидро-динамических технологиях (МГД-технологиях), обработке жидких металлов (перемешивание, транспортировка и т. д.), при электродинамической сепарации и водоочистке.

Перечисленные процессы и установки, использующие механическое действие электрического и магнитных полей, нашли достойное применение в самых различных отраслях промышленности (металлургия, металлообработка, машиностроение, горнообогатительное производство, природоохранные технологии).

Отличительной особенностью всех указанных электромеханических технологических устройств является то, что их рабочим телом непосредственно служат обрабатываемые изделия и материалы, т. е. отсутствуют промежуточные электромеханические преобразования энергии. Наличие такого четкого обобщающего признака позволяет классифицировать электромеханические технологические процессы и установки как отдельную группу в ряду других электротехнологических методов и установок. Очевидно, что выделяемая в традиционной классификации группа «аэрозольные технологии» поглощается более широким понятием «электромеханические методы».

В левой части схемы (см. рис. 1.1) указаны процессы, основанные на преобразовании электрической энергии в тепловую.

В центре схемы (см. рис. 1.1) – электрохимические и электрофизические методы, в которых основные процессы под действием электрической энергии происходят на молекулярном уровне.

В правой части схемы (см. рис. 1.1) – методы, основанные на использовании электромагнитных сил.

Группу технологий, размещенных в центре схемы (см. рис. 1.1) можно разбить на следующие подгруппы:

- первая подгруппа – методы высокоинтенсивного нагрева (электронно-лучевые, плазменные, лазерные), тяготеющие к электротермии и электросварке;

- вторая подгруппа – ионно-обменные методы (электрохимические технологии);
- третья подгруппа – электроакустические ультразвуковые методы, примыкающие к электромеханическим процессам.

Такая схема приближается к схеме идеальной классификации электротехнологических методов (электротермические, электрохимические, электромеханические), соответствующих трем видам преобразования электрической энергии в тепловую, химическую, механическую.

1.2. Структура электротехнологического процесса

Современный электротехнологический процесс характеризуется множеством параметров, определяющих его основные технико-экономические показатели: производительностью, качеством конечного продукта, удельными затратами энергии и труда, массой и габаритами установленного оборудования, себестоимостью готовой продукции и многим другим. На рис. 1.2 представлена функциональная схема электротехнологического процесса.

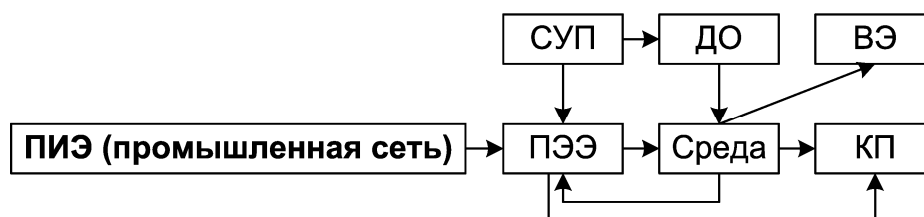


Рис. 1.2. Функциональная схема электротехнологического процесса:

ПИЭ – первичный источник энергии; СУП – система управления процессом;
ДО – дополнительное оборудование; ВЭ – выводимая энергия; ПЭЭ – преобразователь электроэнергии; КП – конечный продукт

При этом определяющие показатели технологического процесса зависят не только от выбранного способа обработки (технологии), но в существенной мере и от параметров и режимов работы отдельных элементов (блоков технологического оборудования).

Для создания заданного конечного продукта с требуемыми характеристиками необходимо определенным образом преобразовать электроэнергию, получаемую, как правило, от промышленной сети переменного тока.

В зависимости от вида технологического процесса первичная электроэнергия преобразуется в конечном виде в энергию химических связей, механическую энергию, либо во внутреннюю энергию. Нередко процесс пре-

образования энергии является многократным. Например, при лазерной резке электрическая энергия первоначально превращается в энергию когерентного светового излучения, которая, воздействуя на деталь, разогревает либо испаряет материал детали, совершая тем самым механическую работу. При ионном азотировании на поверхности обрабатываемых деталей образуются химические соединения обрабатывающей газовой среды с материалом деталей при одновременном ускорении диффузионных процессов в обрабатываемом материале. Таким образом, между обрабатываемым изделием и источником электроэнергии, как правило, присутствует определенная среда (газовая, жидкая, световая и т. д.), характеристики которой определяют характеристики нагрузки преобразователя электроэнергии.

Задача преобразователя электрической энергии: согласовать электрические параметры питающей сети с электрическими параметрами среды при обеспечении заданных условий. Качество конечного продукта существенно зависит от свойств среды, которые определяются характеристиками преобразователя электрической энергии и характеристиками дополнительного оборудования (например, откачной системы, характеристиками газовой среды в ионном азотировании).

В современной электротехнологии электроэнергия, получаемая от промышленной сети переменного тока, должна быть преобразована к виду, удобному для потребления (электрическая энергия постоянного тока с заданными параметрами, импульсная электроэнергия, энергия переменного тока повышенной частоты и т. д.). При этом через преобразователь электроэнергии передается основная часть либо вся энергия, потребляемая технологическим процессом, а также вспомогательная энергия, выводимая из технологического контура (например, в виде избыточной тепловой энергии, снимаемой с газовой среды в ионном азотировании, лазерных установках и т. д.).

Таким образом, преобразователь электрической энергии оказывает непосредственное влияние на физические характеристики технологического процесса (коэффициент полезного действия η , коэффициент мощности $\cos \varphi$, гармонический состав потребляемого тока, несимметрию и т. д.). Нередко выходные характеристики преобразователя оказывают непосредственное воздействие на конечный продукт и могут приводить к его необратимым изменениям (браку).

При возникновении дуговых разрядов в камере ионного азотирования необходимо быстрое отключение нагрузки от питающей сети во избе-

жание образования раковин на обрабатываемой поверхности. Скорость отключения энергии, передаваемой в нагрузку при дуговом разряде, непосредственно определяется динамическими и нагрузочными характеристиками преобразователя. В процессе технологической обработки характеристики среды, в которой происходит процесс, непрерывно изменяются самопроизвольно, либо по программе, определяемой видом технологии. Наблюдаются плавные самопроизвольные изменения (деформация вольтамперной характеристики (ВАХ) среды с ростом температуры, давления и т. д.), либо скачкообразные изменения (переход одного вида разряда в другой в ряде технологических процессов, образование контактных точек при электроконтактной сварке и т. д.). Следовательно, существует некоторая обратная связь со стороны нагрузки, поэтому выходные характеристики преобразователя должны отвечать требованиям, определяемым не только статическими, но и динамическими параметрами среды (нагрузки преобразователя).

Таким образом, преобразователь электрической энергии является одним из главных, определяющих звеньев технологической цепи, оказывающих влияние на основные технико-экономические характеристики технологического процесса. Часто не удастся оптимальным образом организовать электротехнологический процесс, приспособивая к требованиям технологии известные типы преобразователей. Поэтому актуальна разработка новых видов преобразователей электроэнергии, наилучшим образом отвечающих задачам электротехнологии.

1.3. Классификация электротехнологических установок

Следует отметить, что в электротехнологических процессах используются свойства самих обрабатываемых веществ и материалов: электропроводность, магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость, теплопроводность, теплоемкость, скрытая теплота плавления или парообразования, теплосодержание и другие.

Применение электротехнологий позволяет с веществом, находящимся в каждом из агрегатных состояний, указанных на блок-схеме (рис. 1.3), посредством постоянных и переменных (различной частоты) токов, постоянных и переменных электрических и магнитных полей (с широким диапазоном напряженностей) совершать бесчисленное множество операций (изменение температуры, формы, структуры, состава, изменение свойств в разных направлениях и т. д.).



Рис. 1.3. Классификация агрегатных состояний вещества

Электротехнологические установки условно можно подразделить на установки общепромышленного и специального назначения.

Основные группы *электротехнологических* установок общепромышленного назначения представлены на блок-схеме (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Основные группы электротехнологических установок общепромышленного назначения

Электротермические установки применяются в промышленности для термообработки металлических заготовок под пластическую деформацию, отжиг, отпуск, закалку, для плавления легкоплавких цветных металлов и химически активных тугоплавких металлов и сплавов, нагрева диэлектриков; в сельском хозяйстве – для обогрева помещений различного технологического назначения; в быту (бытовые нагревательные приборы).

Электрохимические установки применяются в промышленности при электролизе расплавов и растворов, для нанесения защитных и декоративных покрытий, электро- и химико-механической обработки изделий в электролитах.

Электромеханические установки используются в промышленности для ультразвукового воздействия на обрабатываемый материал, магнитоимпульсной обработки металлов.

Электрокинетические установки применяются для разделения сыпучих материалов и эмульсий, очистки сточных вод, электроокраски, электроэрозионной обработки металлов.

Применяются также *электротехнологические установки специального назначения* – установки, представляющие совокупность различного рода воздействий (например, осуществляющие перенос энергии за счет электромагнитного поля).

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое «электротехнология»?
2. Представьте агрегатные состояния вещества.
3. По каким признакам классифицируются электротехнологические установки?
4. Назовите основные группы электротехнологических установок.

Глава 2. ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

2.1. Физико-технические основы электротермии

Одной из наиболее распространенных групп электротехнологических установок общепромышленного назначения является группа электротермических установок.

Электротермия объединяет разнообразные технологические процессы тепловой обработки с использованием электроэнергии в качестве основного энергоносителя.

Применение электрической энергии для нагрева имеет ряд достоинств:

- существенное снижение загрязнения окружающей среды;
- получение строго заданных значений температур, в том числе и превосходящих уровни, достигаемые при сжигании любых видов топлива;
- создание сосредоточенных интенсивных тепловых потоков;
- достижение заданных диапазонов температур в нагреваемом пространстве;
- строгий контроль и точное регулирование длительности выделения энергии;
- гибкость в управлении потоками энергии;
- возможность нагрева материалов изделий в газовых средах любого химического состава и вакууме;
- выделение тепловой энергии непосредственно в нагреваемом веществе.

Внедрение электротермии обеспечивает экономию материальных и трудовых ресурсов, что в конечном результате приводит к повышению экономической эффективности.

2.1.1. Виды теплопередачи

Электротермические процессы связаны с преобразованием электрической энергии в тепловую с переносом тепловой энергии внутри тела (твердого, жидкого, газообразного) или из одного объема в другой по законам теплопередачи.

Теплопередачей (теплообменом) называется переход тепла из одной части пространства к другой, от одного тела к другому или внутри тела от

одной его части к другой. Непременным условием теплообмена является наличие разности температур отдельных тел или участков тел.

Различают стационарный и нестационарный теплообмен.

При стационарном (установившемся) теплообмене температурное поле постоянно, не меняется во времени. Так как ни одна точка пространства не остывает и не нагревается, то общий запас тепловой энергии (аккумулированное данным веществом тепло) также остается без изменения.

При нестационарном (неустановившемся) теплообмене температура отдельных точек рассматриваемого пространства или тела меняется во времени, следовательно изменяются температурное поле в теле и аккумулированное в нем или в отдельных его частях тепло, его теплосодержание.

Существуют три вида теплообмена, три различных способа передачи тепла (рис. 2.1).

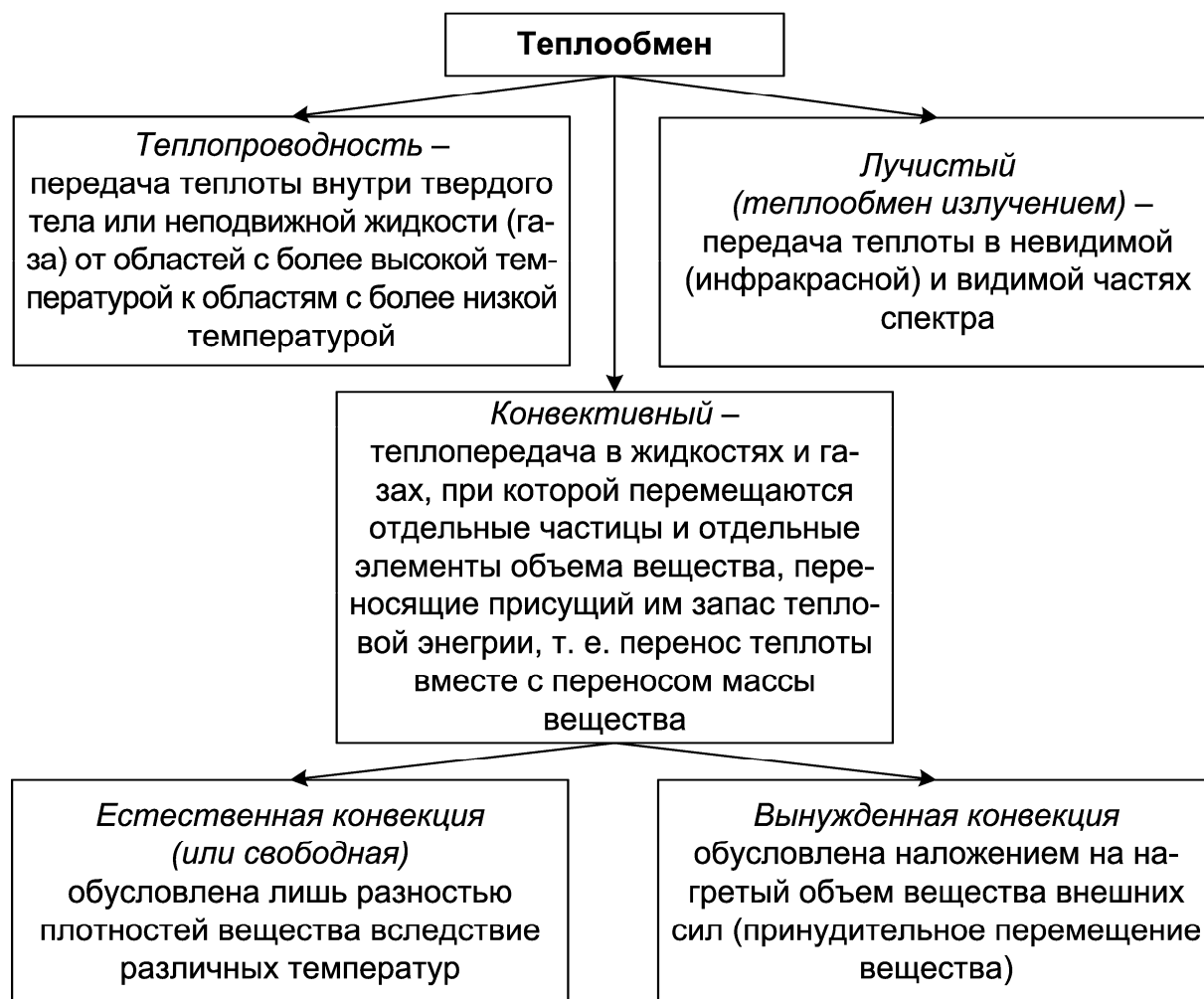


Рис. 2.1. Классификация теплообмена по способу передачи тепла

Теплопроводность обусловлена тепловым движением и энергетическим взаимодействием микрочастиц (молекул, атомов, электронов), частицы с большей энергией (более нагретые и, следовательно, более подвижные) отдают часть своей энергии менее нагретым (менее подвижным). Скорость теплопередачи в этом случае зависит от физических свойств вещества, в частности от его плотности. У плотных тел (металл) скорость теплопередачи больше, у пористых (пенопласт) – меньше.

Тепловой поток q через плоскую стенку при установившемся режиме (определяется по закону Фурье) пропорционален разнице температур поверхности стенки и обратно пропорционален термическому сопротивлению стенки:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} d\tau dF,$$

где λ – коэффициент теплопроводности, характеризующий способность вещества проводить теплоту;

$\frac{\partial t}{\partial n}$ – градиент температуры в направлении распространения тепловой энергии;

$d\tau$ – элементарное время;

dF – элементарная площадка, перпендикулярная направлению теплового потока.

Передача теплоты конвекцией неотделима от передачи теплоты теплопроводностью. Количественно переданной теплоты конвекцией $q_{\text{кон}}$ от твердого тела, омываемого жидкостью или газом (или в обратном направлении), описывается следующей формулой:

$$q_{\text{кон}} = \alpha_{\text{кон}} (t_{\text{ст}} - t_{\text{г}}) F_{\text{кон}},$$

где $\alpha_{\text{кон}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией;

$t_{\text{ст}}, t_{\text{г}}$ – температура стенки и газа;

$F_{\text{кон}}$ – поверхность теплоотдачи.

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

При передаче теплоты излучением энергия передается в форме электромагнитных волн. Этот вид теплопередачи может иметь место лишь в прозрачной для этих лучей среде.

Каждое непрозрачное нагретое тело, находящееся в прозрачной среде, излучает во все стороны лучистую энергию, распространяющуюся со скоростью света. При встрече с другими полностью или частично непрозрачными телами данная лучистая энергия вновь превращается (полностью или частично) в тепло, нагревая эти тела. Следовательно, лучистый теплообмен сопровождается двойным превращением энергии (тепловой энергии в лучистую и обратно).

Если температуры тел, между которыми осуществляется лучистый теплообмен, различны, то в результате теплообмена между ними тепло будет передаваться от более нагретого тела к менее нагретому, одно из них будет нагреваться, а другое – снижать свою температуру.

Согласно закону Стефана – Больцмана, при излучении нагретого тела в неограниченное пространство (при односторонней теплопередаче) лучистый тепловой поток q пропорционален постоянному коэффициенту излучения абсолютно черного тела, степени черноты тела, численно равной его поглощающей способности, и абсолютной температуре нагретого тела:

$$q = c_s \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где T – температура тела, °K ($T = t + 273$, °C);

c_s – излучательная способность абсолютно черного тела ($c_s = 5,7 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$).

Для «серого» тела закон Стефана – Больцмана имеет вид

$$q = c \left(\frac{T}{100} \right)^4 = c_s \varepsilon \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где ε – коэффициент теплового излучения.

Таким образом, по закону Стефана – Больцмана можно определить лучистый тепловой поток как для черного, так и для «серого» тел.

2.1.2. Материалы для электротермических установок

В электротермических установках применяются материалы, способные работать при высоких температурах. К ним относятся огнеупорные и теплоизоляционные материалы, назначение которых состоит в том, что-

бы отделить рабочее пространство от окружающей среды и уменьшить тепловые потери. На рис. 2.2 приведена классификация материалов, применяемых в электротермии.



Рис. 2.2. Классификация материалов в электротермии

Применяются также жароупорные материалы, способные выдерживать механические нагрузки при высоких температурах и материалы, из которых изготавливаются нагревательные элементы.

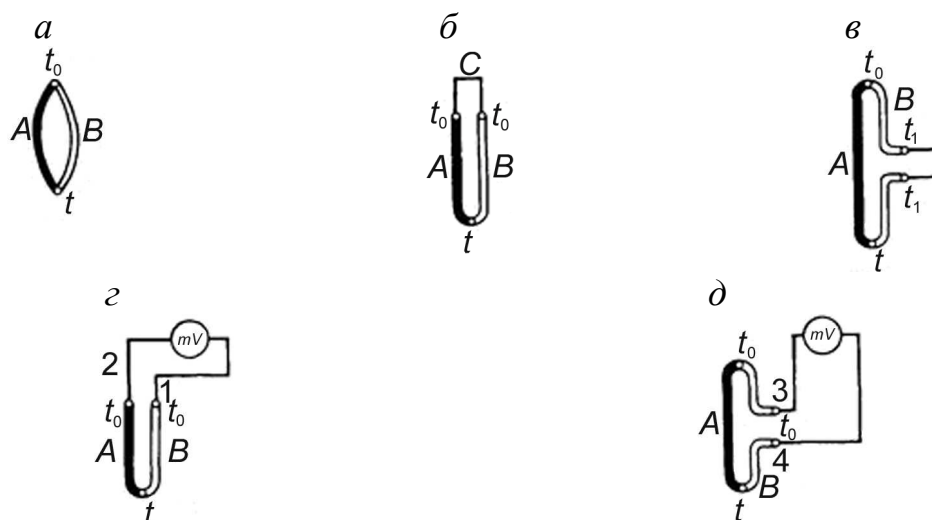
2.1.3. Принципы измерения и регулирования температуры, приборы температурного контроля

Под термином «температура» имеют в виду величину, характеризующую степень нагретости вещества. Для точного определения температуры тела используют косвенные методы измерения температуры, так как непосредственное определение температуры весьма приблизительно (холодное, теплое, горячее, раскаленное) [3].

Для этой цели используют объемное или линейное расширение тел при нагревании (дилатометрические термометры – ртутные и манометрические), изменение электрического сопротивления тела (электрические термометры сопротивления), изменение развиваемой ими (в паре с другим телом) термоэлектродвижущей силы (термопары), изменение количества излучаемой ими энергии (пирометры излучения).

В электрических печах для измерения температуры и в качестве датчиков для автоматического управления температурным режимом применяют главным образом термоэлектрические термометры, а в высокотемпературных печах, особенно когда нужно измерить температуру жидкого металла, используют пирометры излучения.

Термоэлектрические термометры состоят из датчика (термоэлемента, термопары), измерителя термо-электро-движущей силы (термо-ЭДС) и соединительных проводов. Термоэлементы состоят из двух разнородных проводников A и B (рис. 2.3, a), соединенных друг с другом и образующих замкнутую цепь. В случае разности температур мест соединения проводников появляется термо-ЭДС и в образованной ими цепи начинает протекать ток.



2.3. Схемы термоэлектрической цепи:

a – из двух проводников; $б, в$ – из трех проводников; $г, д$ – схемы включения электроизмерительного прибора в спай и термоэлектрод термоэлемента

Значение термо-ЭДС зависит от материала обоих проводников и разности их температур. Если температуру одного из соединений t_0 поддерживать неизменной (например, как это принято, равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), то термо-ЭДС будет зависеть лишь от температуры t второго соединения (второго спаия). Если цепь из

двух таких проводников разрезать (в любом месте, в том числе и в одном из спаев) и вставить в цепь третий проводник C (рис 2.3, б, в), то термо-ЭДС не изменится, если температуры обоих концов будут одинаковыми.

Следовательно, можно в разрез цепи вставить электроизмерительный прибор (рис. 2.3, г, д); при этом требуется, чтобы на концах ведущих к нему от термоэлемента проводников была одна и та же температура t_0 или t_1 .

Прибор будет измерять термо-ЭДС, а следовательно, и температуру t рабочего спая. Из принципа действия термоэлектрического термометра следует, что способ изготовления рабочего конца термоэлемента (сварка, пайка, скрутка) не может влиять на развиваемую им термо-ЭДС, если размеры рабочего конца таковы, что температура во всех его точках одинакова.

Так как прибор в цепи термоэлемента измеряет не термо-ЭДС, а протекающий в этой цепи ток, то необходимо, чтобы сопротивление цепи в эксплуатации оставалось неизменным и равным его значению при градуировке. Поскольку сопротивление термоэлектродов и соединительных проводов меняется с изменением окружающей температуры, осуществить это практически невозможно. Отсюда возникает одна из принципиальных погрешностей метода – *погрешность от несоответствия схемы ее сопротивлению при градуировке*.

Для уменьшения этой погрешности приборы для тепловых измерений выполняются высокоомными (50–100 Ом при грубых измерениях, 200–500 Ом при более точных) и с малым температурным коэффициентом сопротивления. В настоящее время, как правило, применяются потенциометрические методы измерения термо-ЭДС.

Термоэлектрические термометры градуируют всегда при определенной температуре свободного конца термоэлемента – при 0 °С. Обычно в работе температура свободного конца отличается от градуировочной, в результате этого возникает вторая принципиальная погрешность метода – *погрешность на температуру свободного конца термоэлемента*. Так как эта погрешность может достигать десятков градусов, необходимо в показания прибора вносить соответствующую поправку. В современных приборах эта поправка вносится в их показания автоматически.

Любая пара проводящих разнородных материалов может быть использована для создания термо-ЭДС, однако лишь немногие из них применяются для изготовления термоэлектродов термопар. Эти материалы должны развивать высокую термо-ЭДС, значения которой должны быть по возмож-

ности приблизительно пропорциональны температуре. Материалы должны быть достаточно жаростойкими, чтобы длительно работать при рабочей температуре. Они должны также обладать в течение длительного времени неизменными физическими свойствами при нагреве до рабочей температуры, и их градуировка при этом не должна меняться.

Хорошо зарекомендовали себя и получили широкое распространение следующие термопары [3].

Платинородий-платиновая (ПП). Положительный электрод состоит из сплава платины «Экстра» (90 %) и родия (10 %), отрицательный электрод – из платины «Экстра». Ввиду дороговизны материала диаметр электродов обычно составляет 0,5 мм. Эти термометры могут быть применены для измерения температур длительно до 1300 °С и кратковременно – до 1600 °С при использовании их в окислительной газовой среде. В этих условиях термопары зарекомендовали себя как очень надежные. В восстановительной атмосфере термоэлектроды ПП науглероживаются и быстро разрушаются. В вакууме при 1250 °С начинается довольно интенсивное распыление платины, вследствие чего допустимая температура их применения в вакуумных печах ниже, чем в печах с окислительной атмосферой.

При технических измерениях эти термопары обычно используются при температуре выше 1000 °С, так как при более низких температурах можно использовать более дешевые и удобные (с большей термо-ЭДС) термопары из других сплавов.

Хромель-алюминиевый (ХА) термоэлемент выполнен из специально разработанных сплавов хромеля и алюмеля и обладает сравнительно высокой термо-ЭДС и строго линейным характером ее изменения в функции от температуры. Он предназначен для длительного измерения температур до 1000 °С и кратковременного – до 1300 °С. В этих пределах он надежно работает в окислительной атмосфере; образующаяся на его поверхности пленка оксидов защищает внутренние слои от окисления. Это наиболее распространенный термоэлемент.

Термоэлемент ПР-30/6 имеет положительный электрод, состоящий из платинородиевого сплава с содержанием родия 30 %, и отрицательный – из такого же сплава, но с содержанием родия 6 %. Он может работать при температуре до 1800 °С, причем до 200 °С его термо-ЭДС практически равна нулю, вследствие чего не требуется компенсации температуры свободного конца.

Для измерения самых высоких температур применяются вольфрамо-рениевые термоэлементы (до 2100–2200 °С) или термоэлементы, один из электродов которых состоит из чистого графита, а второй – из борида циркония (может работать до 2000 °С) или карбида титана (до 2500 °С).

Термоэлектроды промышленных термоэлектрических термометров выполняются из проволоки диаметром 2–3 мм. Они соединяются в рабочем конце сваркой и изолируются один от другого фарфоровыми бусами или соломкой. Оба термоэлектрода помещаются в фарфоровую защитную трубку с заваренным дном и в жароупорную металлическую арматуру, на конце которой надета штампованная или литая головка. В головке термоэлектроды соединяются с проводами, ведущими к измерительному прибору. Для термометров, работающих при температурах выше 1000–1200 °С, применение металлической арматуры невозможно, вследствие чего термоэлектроды защищаются лишь фарфоровыми трубками и снабжаются арматурой только у свободного конца – в зоне низкой температуры.

Огнеупорный фарфор может работать до 1500 °С; при более высоких температурах применяются трубки и бусы из спеченной окиси алюминия или окиси бериллия.

Термопары с графитовым электродом изготавливаются без защитных трубок, так как их роль играет сам графитовый электрод, выполняемый трубчатым. Второй электрод расположен по его оси.

Сопротивление термоэлектродов стандартных термопар из благородных металлов составляет 0,13–0,18 Ом на 1 м длины, для платинородий-платиновых (диаметром 0,5 мм) – 1,5–1,6 Ом на 1 м.

Тепловая инерция стандартных термопар очень велика, причем она определяется в основном фарфоровой защитной трубкой. В тех случаях, когда такая инерция датчика крайне нежелательна (например, при двухпозиционном регулировании), применяются термопары без защитной огнеупорной трубки с вваренными в дно защитной арматуры термоэлектродами или с очень тонкой фарфоровой трубкой.

Как уже отмечалось, температура свободного конца термопары может весьма сильно отличаться от градуировочной и достигать 100 °С, особенно если головка термопары находится около кожуха печи. Для того чтобы снизить температуру свободного конца и для ее изменения во времени, надо довести конец до помещения, где температура сравнительно стабильна (например, до зажимов измерительного прибора, расположенного на щите управления). Однако вести термоэлектроды по помещению до указанного

места неудобно, так как они выполнены из жесткой проволоки без изоляции, а некоторые чересчур дороги (например, платина и ее сплавы). Поэтому головку термопары соединяют с измерительным прибором не самими термоэлектродами, а компенсационными проводами – многожильными, гибкими, в изоляции, которыми удобно вести монтаж. Эти провода состоят также из двух материалов (прямой и обратный провод), которые подбирают таким образом, чтобы в паре друг с другом они давали в пределах 0–100 °С такую же термо-ЭДС, как и основные термоэлектроды при таких же температурных условиях. Для каждого типа термоэлемента имеются свои компенсационные провода, отличающиеся, чтобы их не спутать, своей маркировкой оплетки. Для того чтобы исключить погрешность от колебаний температуры в измерительном приборе, к которому подведен свободный конец (с помощью компенсационных проводов), последовательно с термопарой в приборе включается мост компенсации температуры свободного конца (рис. 2.4). Он состоит из резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 , а его диагональ ab питается постоянным током от выпрямителя B . Из этих резисторов три выполняются из манганина, и их сопротивления не зависят от окружающей температуры, а резистор R_1 – из меди или никеля и размещается около места присоединения компенсационных проводов с тем, чтобы их температуры были одинаковы. Сопротивление R_1 рассчитывается таким образом, чтобы при 0 °С мост был уравновешен и напряжение на его выходной диагонали cd равнялось нулю. Если же температура резистора R_1 (а следовательно, и свободных концов компенсационных проводов) повысится, то на выходной диагонали моста появится напряжение, которое компенсирует уменьшение термо-ЭДС термоэлемента, вызванное нагревом его свободного конца.

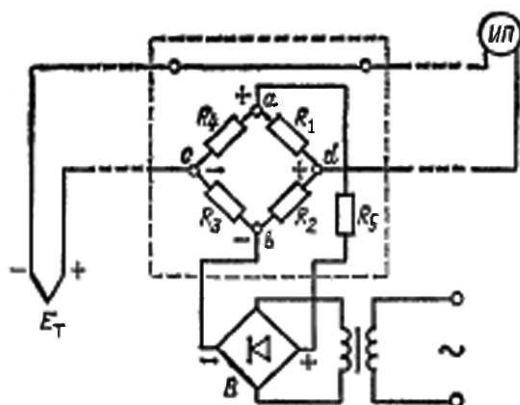


Рис. 2.4. Принципиальная схема моста компенсации температуры свободного конца термопары

Современные автоматические потенциометры содержат такой мост компенсации температуры свободного конца термоэлемента.

Класс точности современных автоматических потенциометров равен 0,5 и даже 0,25; для обслуживания электропечей прецизионного нагрева применяются узкопределные потенциометры со шкалой ± 125 , ± 250 и ± 500 мкВ, на которые подается лишь небольшая часть развиваемой термоэлементом термо-ЭДС, в то время как основная ее часть уравнивается «подавителем нуля» – добавочным прецизионным источником напряжения. Это позволяет регистрировать не полное значение температуры, а лишь ее колебания в узких пределах (точность регистрации может достигать 0,1 °С).

Автоматические потенциометры используются не только для записи, но и для регулирования температурного режима печей.

В тех случаях, когда измерение температуры объекта путем непосредственного контакта датчика с ним невозможно из-за слишком высокой температуры, агрессивного характера среды или быстрого перемещения объекта, применяют пирометры излучения, основанные на связи между температурой тела и количеством излучаемой им энергии. При этом можно использовать для измерения температуры излучающего тела всю излучаемую им энергию – в этом случае придется иметь дело с пирометрами полного излучения, или радиационными. Можно использовать лишь часть спектра излучения, выделив с помощью светофильтра узкий участок монохроматического излучения (пирометры частичного излучения, или оптические). Наконец, можно выделить два монохроматических участка излучения в разных частях спектра и судить о температуре объекта, сравнивая их интенсивность, – на этом основаны цветовые пирометры.

В радиационных пирометрах полное излучение тела направляется с помощью оптической системы на рабочий конец термоэлемента и нагревает последний. Чем выше температура излучающего тела, тем больше его излучение и тем больше, следовательно, температура рабочего конца термоэлемента и его термо-ЭДС. Поэтому такой прибор можно градуировать непосредственно на температуру измеряемых тел.

Но так как излучение тела зависит не только от его температуры, но и от его коэффициента теплового излучения, разные тела при одной и той же температуре будут посылать на рабочий конец термоэлемента пирометра разное количество энергии. Поэтому градуировку этих пирометров производят по специальной эталонной лампе, имеющей свойства абсолютно

черного тела. При измерении температуры реальных физических тел пирометр будет показывать меньшую против действительной яркостную температуру интегрального излучения. Для большинства нагреваемых в электрических печах изделий и материалов, поверхность которых окислена, коэффициент теплового излучения ε будет равен 0,9–0,7, и для них погрешность измерения составит 2,5–9,0 %. В случае нагрева в защитной атмосфере или в вакууме, когда поверхность тел блестящая и ε достигает 0,4–0,3, погрешность равна 25–35 %. Поэтому с помощью радиационного пирометра нельзя вести точное измерение температуры, пользоваться им можно лишь в случаях, когда поверхность объекта излучения близка по своим свойствам к абсолютно черному телу или точно известен коэффициент теплового излучения тела, температуру которого надо измерить.

Значительно более точными по сравнению с радиационными являются оптические пирометры (пирометры частичного излучения). Они работают на принципе сравнения яркости свечения измеряемого тела с яркостью свечения нити электрической лампочки, температура которой однозначно связана с проходящим через нее током. Сравнение осуществляется наблюдателем, причем человеческий глаз способен весьма точно уловить момент равенства яркостного свечения обоих объектов, когда температуры и нити, и измеряемого тела будут равны и могут быть определены по показанию включенного в цепь лампы прибора, заранее проградуированного непосредственно в градусах.

При работе с оптическим пирометром используют не всю энергию излучения нити и измеряемого тела, а лишь часть ее в зоне красного излучения с максимумом интенсивности при длине волны λ около 0,65 мкм. Для этой цели перед глазом наблюдателя установлен красный фильтр, задерживающий все волны с длиной менее 0,62 мкм. С другой стороны зона ограничена чувствительностью человеческого глаза, которая спадает до нуля для лучей с λ , равной 0,7 мкм.

Использование монохроматического излучения в области видимой части спектра вызвано тем, что интенсивность этого излучения растет с увеличением температуры намного быстрее по сравнению с интегральным излучением, и поэтому малые изменения температуры дают при этом большие отклонения яркости, что намного повышает точность измерения. Выбор красного светофильтра, обеспечивающего работу прибора с монохроматическим излучением при λ , равной 0,65 мкм, обусловлен желанием про-

изводить измерения сравнительно низких температур (700–1000 °С), так как в этом диапазоне интенсивность красного излучения наибольшая.

Оптические пирометры, как и радиационные, градуируют по излучению абсолютно черного тела. Поэтому при измерении температур реальных тел они показывают более низкую по сравнению с действительной – так называемую яркостную монохроматическую температуру, т. е. температуру абсолютно черного тела, при которой интенсивность монохроматического излучения последнего равна интенсивности монохроматического излучения реального тела. Однако погрешность от неполноты излучения у оптического пирометра меньше, чем у радиационного. Так, при коэффициенте теплового излучения 0,9–0,7 погрешность в измерении равна 7–25 °С при измерении температуры около 1000 °С и 15–50 °С при измерении температуры 1500 °С, т. е. достигает 0,7–3,0 %. Тем не менее, для неокисленных тел (в вакууме, защитной атмосфере) с ε , равной 0,3–0,4, эта погрешность может достигать 100 °С.

Схема оптического пирометра показана на рис. 2.5. Он представляет собой телескоп, в котором изображение нагретого тела проецируется объективом 3 на плоскость вольфрамовой нити специальной лампы накаливания 1. Это изображение и нить можно рассматривать через окуляр 4, причем наблюдатель видит на фоне тела либо более темное, либо более светлое изображение нити. Регулируя реостатом 2 ток в лампе, можно добиться полного исчезновения средней части нити на фоне нагретого тела, что соответствует равенству их температур. Включенный в цепь нити накала лампы миллиамперметр заранее градуируется в градусах и, следовательно, показывает температуру нити, поэтому по нему можно прямо прочесть измеряемую яркостную температуру.

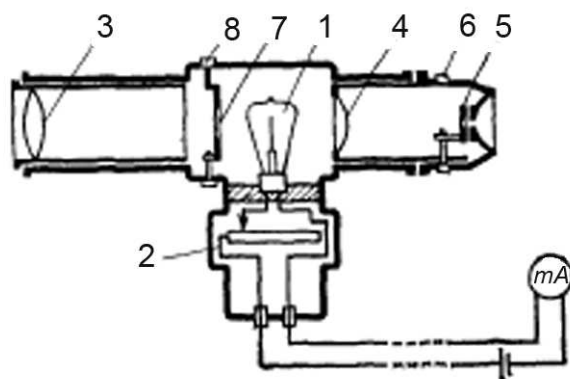


Рис. 2.5. Оптический пирометр с исчезающей нитью

В окуляре имеется красный светофильтр 5 с механизмом установки 6, обеспечивающий сравнение яркости нити и нагретого тела в лучах с длиной волны 0,65 мкм. Для того чтобы иметь возможность измерять более высокие температуры, используется нейтральный (дымчатый) светофильтр 7, который может быть установлен при помощи механизма 8 между объективом и лампой. Этот светофильтр задерживает часть лучей, идущих от измеряемого тела, и яркость нити сравнивается с пониженной яркостью объекта.

Применяя несколько таких фильтров с разной степенью поглощения, можно получить несколько температурных диапазонов применения пирометра. Нижняя граница измеряемых температур равна 700 °С, наивысшая может быть доведена до 4000 °С.

Оптические пирометры, в отличие от радиационных, требуют наблюдателя и поэтому не могут быть использованы для регистрации или автоматического регулирования. В последних случаях необходимо заменить наблюдателя чувствительным к интенсивности излучения датчиком, например фотоэлементом, при этом подбирают такие фотоэлементы, чтобы они вместе с соответствующими светофильтрами обеспечивали измерение в нужном узком диапазоне волн.

Фотопирометры используются как для измерения, так и для регистрации и регулирования температур.

2.1.4. Классификация электротермических установок

Электротермическая установка состоит из самого электротермического оборудования, источника его электрического питания и устройств для автоматического управления.

Электротермическое оборудование – электрические печи, электронагревательные устройства и приборы – широко распространено в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и быту. При таком широком распространении электрические печи должны быть очень разнообразными по конструкции и размерам.

Многообразие электрических печей вызывает необходимость в их классификации, которую нельзя провести по технологическому назначению, так как для одного и того же процесса можно использовать несколько различных типов электротермического оборудования. По этому признаку пришлось бы ограничиться делением электропечей на плавильные и тер-

мические. На рис. 2.6 представлена классификация электрических печей по принципиальному признаку – по способу превращения электрической энергии в тепловую.

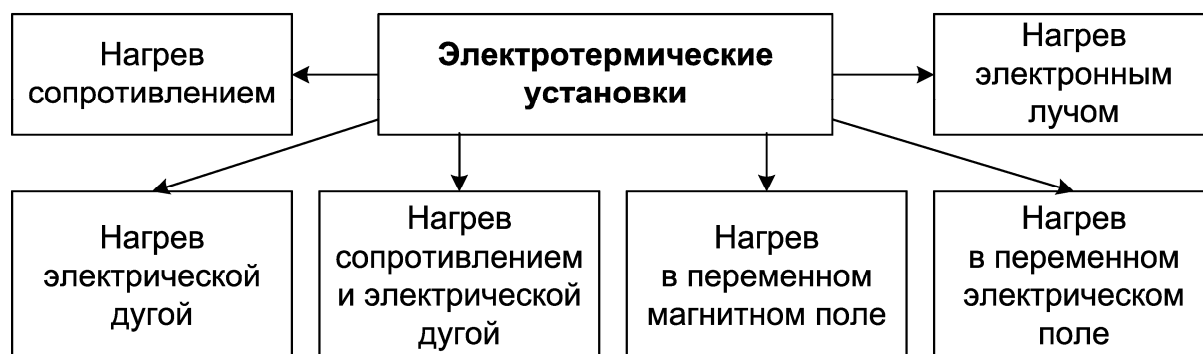


Рис. 2.6. Классификация электротермических установок по способу превращения электрической энергии в тепловую

Приведенная классификация наиболее удобна для восприятия.

2.2. Электрические печи сопротивления

2.2.1. Физическая сущность нагрева сопротивлением

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 накалимым катодом, в 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 как проводящая среда второго рода имеет смешанную проводимость [2].

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

Число свободных электронов в металле очень велико. Так, для меди оно составляет приблизительно 10^{29} в одном кубическом метре.

Согласно электронной теории в идеальной кристаллической решетке не происходит ни рассеяния, ни отражения, ни торможения движущихся

электронов, т. е. нет никаких препятствий прохождению 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 их структуре. Дефекты структуры обусловлены геометрическими искажениями решетки и наличием примесей.

С увеличением температуры металла его атомы в узлах кристаллических решеток колеблются с большими амплитудами. Это увеличивает вероятность столкновения с ними свободных электронов. Соответственно с повышением температуры увеличивается и сопротивление прохождения 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 аннулирует 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, при этом тепловая эффективность их прямо пропорциональна электронной составляющей протекающего тока.

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.

Соотношение 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/см²;

n_e, n_i – плотность носителей заряда электронов и ионов соответственно, 1/см³;

μ_e, μ_i – подвижность электронов и ионов, численно равная скорости дрейфа заряженных частиц в направлении электрического поля при его напряженности E , равной 1 В/см;

e_0 – заряд электрона;

E – напряженность.

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

$$j = n_e e_0 \mu_e E.$$

Принимая

$$\sigma = n_e e_0 \mu_e,$$

где σ – электропроводность вещества, зависящая от концентрации носителей зарядов n_e , а также от вида вещества и его состояния μ_e , можно записать уравнение (2.1) в виде

$$j = \sigma E.$$

Величину, обратную проводимости $1/\sigma = \rho$, называют удельным электрическим сопротивлением. Оно зависит от тех факторов, что и проводимость, и для всех металлов увеличивается с ростом температуры. Удельное сопротивление проводника ρ_t при заданной температуре t составляет

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

где ρ_{20} – удельное сопротивление проводника при температуре 293 К;

α – температурный коэффициент электрического сопротивления, Ом/К.

При температуре, близкой 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.

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 Q при прохождении по нему электрического тока зависит от сопротивления проводника, электрического тока в цепи, времени его прохождения и определяется законом Джоуля – Ленца:

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

где I – ток, А;

R – сопротивление, Ом;

τ – время, с.

Если выразить R через удельное сопротивление проводника, учесть его геометрические размеры (длину и площадь сечения), то выделяющаяся в проводнике мощность будет равна

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

где S – площадь сечения, м²;

l – длина проводника, м.

Мощность, выделяемая в проводнике, определяет электрические потери в нем.

2.2.2. Нагревательные элементы

Нагревательные элементы имеют самую высокую температуру в печи и, как правило, определяют работоспособность установки в целом.

К материалам нагревательных элементов предъявляются следующие требования:

- достаточная жаростойкость (окалиностойкость);
- достаточная жаропрочность – механическая прочность при высоких температурах, необходимая для того, чтобы нагреватели могли поддерживать сами себя;
- большое удельное электрическое сопротивление, что обуславливается необходимым сроком службы нагревательного элемента и габаритами печи. Чем больше удельное электрическое сопротивление, тем меньше длина нагревателя. Длинный нагреватель не всегда возможно разместить в печи. Для увеличения срока службы сечение нагревателя должно быть достаточно большим;
- малый температурный коэффициент сопротивления. Данное требование должно выполняться для того, чтобы мощность, выделяемая нагре-

вателями в горячем и холодном состояниях, была одинаковой или отличалась незначительно. Если температурный коэффициент сопротивления велик, то для включения печи в холодном состоянии приходится использовать трансформаторы, дающие в начальный момент пониженное напряжение;

- постоянство электрических свойств. Некоторые материалы, например карборунд, с течением времени стареют, т. е. увеличивают электрическое сопротивление, что усложняет условия их эксплуатации. Требуются трансформаторы с большим количеством ступеней и диапазоном напряжений;

- обрабатываемость. Металлические материалы должны обладать пластичностью и свариваемостью, чтобы из них можно было изготовить проволоку, ленту, а из последних – сложные по конфигурации нагревательные элементы. Неметаллические нагреватели прессуются или формуются, с тем чтобы нагреватель представлял собой готовое изделие.

Основными материалами для нагревательных элементов являются сплавы на основе железа, никеля, хрома и алюминия.

Это, в первую очередь, – хромоникелевые, а также железо-хром-алюминиевые сплавы.

Двойные сплавы состоят из никеля и хрома (хромоникелевые сплавы), тройные – из никеля, хрома и железа (железо-хром-никелевые сплавы). Тройные сплавы – дальнейшее развитие хромоникелевых сталей.

Двойные сплавы (например, X20H80-N) образуют на поверхности защитную пленку из окиси хрома. Температура плавления этой пленки выше, чем самого сплава; пленка не растрескивается при нагреве и охлаждении. Эти сплавы имеют хорошие механические свойства как при низких, так и при высоких температурах, они пластичны, хорошо обрабатываются, свариваются.

Хромоникелевые сплавы имеют удовлетворительные электротехнические свойства, не стареют, немагнитны. Основной их недостаток – высокая стоимость и дефицитность материалов, в первую очередь никеля. Поэтому были созданы железо-хром-алюминиевые (тройные) сплавы, содержащие железо, хром и до 5 % алюминия. Эти сплавы могут быть более жаростойкими, чем хромоникелевые, т. е. могут работать при температуре до 1400 °С (например, сплав X23Ю5Т). Однако эти сплавы достаточно хрупки и непрочны, особенно после пребывания при температуре, большей 1000 °С. Поэтому нагреватель после работы в печи нельзя вынуть и отремонтировать. Данные сплавы магнитны, могут ржаветь во влажной атмосфере при нормальной температуре. Они имеют низкое сопротивление ползучести,

что должно быть учтено при конструировании из них нагревателей. Недостатком этих сплавов также является их взаимодействие с шамотной футеровкой и оксидами железа. В местах соприкосновения этих сплавов с футеровкой при температуре эксплуатации выше 1000 °С футеровка должна быть выполнена из высокоглиноземистого кирпича или покрыта специальной высокоглиноземистой обмазкой. Во время эксплуатации эти нагреватели существенно удлиняются, что также должно быть учтено при конструировании, т. е. необходимо предусматривать возможность их удлинения.

Представителями этих сплавов являются X15Ю5 (температура применения около 800 °С); X23Ю5 (1200 °С); X27Ю5Т (1300 °С) и X23Ю5Т (1400 °С).

В последнее время разработаны сплавы типа X15Н60ЮЗ и X27Н70ЮЗ, т. е. с добавлением 3 % алюминия, что значительно улучшило жаростойкость сплава, а наличие никеля практически исключило имеющиеся у железо-хромо-алюминиевых сплавов недостатки.

Сплавы X15Н60ЮЗ и X27Н60ЮЗ не взаимодействуют с шамотом и оксидами железа, достаточно хорошо обрабатываются, механически прочны, не хрупки.

В высокотемпературных печах используются неметаллические нагреватели: карборундовые и из дисилицида молибдена.

Для печей с защитной атмосферой и вакуумных печей используются угольные и графитовые нагреватели. Нагреватели в этом случае выполняются в виде стержней, труб и пластин.

В высокотемпературных вакуумных печах и печах с защитной атмосферой применяются нагреватели из молибдена и вольфрама. Нагреватели из молибдена в вакууме могут работать при температуре до 1700 °С, а в защитной атмосфере – до 2200 °С. Температура применения в вакууме ниже, что объясняется испарением молибдена. Нагреватели из вольфрама могут работать при температуре до 3000 °С.

В отдельных случаях применяются нагреватели из ниобия и тантала.

Нагревательные элементы большинства промышленных печей выполняются либо из ленты, либо из проволоки (рис. 2.7).

Обычно для изготовления нагревателей промышленных печей применяется проволока диаметром от 3 до 7 мм.

Соотношения между шагом спирали и ее диаметром и диаметром проволоки выбирают таким образом, чтобы облегчить размещение нагревателей в печи, обеспечить достаточную их жесткость, и, в то же время, не затруднить теплоотдачу от них к изделиям. Чем больше диаметр спирали и чем гуще ее

шаг, тем легче разместить в печи нагреватели, но с увеличением диаметра уменьшается прочность спирали, увеличивается склонность ее витков лечь друг на друга. С другой стороны, с увеличением густоты намотки увеличивается экранирующее действие обращенной к изделиям части ее витков на остальные и, следовательно, ухудшается использование ее поверхности.

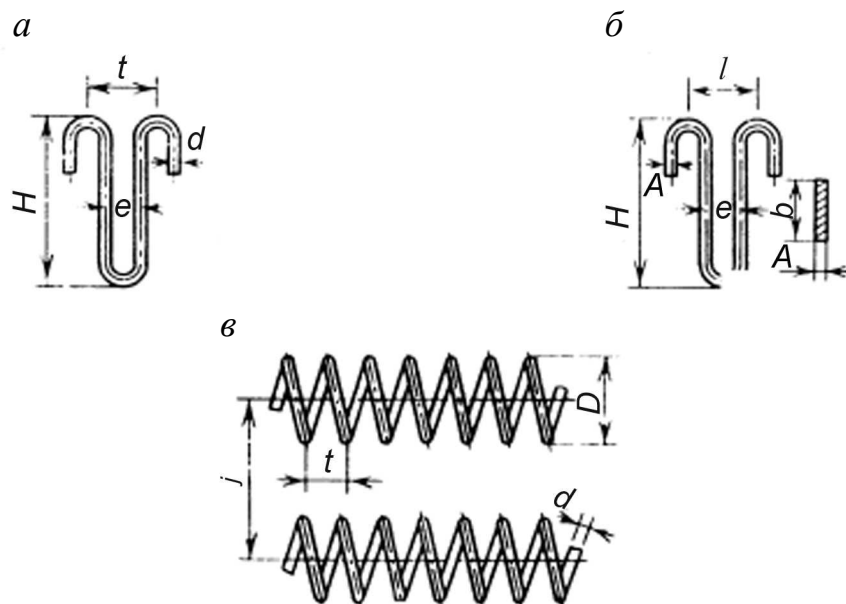


Рис. 2.7. Эскизы проволочных и ленточных нагревателей с обозначением основных геометрических размеров:

a – проволочный зигзагообразный; $б$ – ленточный; $в$ – спиральный;
 A – толщина ленты; b – ширина ленты; l – шаг зигзага ленты; H – высота зигзага;
 e – расстояние между зигзагами; j – расстояние между осями спиралей;
 D – диаметр спирали; d – диаметр проволоки; t – шаг спирали

Практикой установлены вполне определенные, рекомендуемые соотношения между диаметром проволоки, шагом и диаметром спирали для проволоки диаметром от 3 до 7 мм. Эти соотношения для нихрома следующие:

$$t \geq 2d, D = (6-8) d.$$

Для менее прочных железохромоалюминиевых сплавов соотношение будет следующим:

$$D = (4-6) d,$$

где t – шаг спирали;
 D – диаметр спирали;
 d – диаметр проволоки.

Для более тонких проволок отношение диаметров спирали и проволоки, а также шаг спирали обычно берутся больше.

Следует отметить, что распространены спиральные нагреватели на керамических трубках. Такие нагреватели с точки зрения излучения и размещения мощности на стенках печи почти эквивалентны свободно излучающим спиральям и, наоборот, они существенно эффективнее, чем спирали в пазах и полочках.

Конструкция проволочных спиральных нагревателей на керамических трубках является универсальной и с точки зрения применения материалов, и по расположению нагревателей в камере печи. Отношение внутреннего диаметра спирали к наружному диаметру трубки у таких нагревателей может быть принято равным примерно 1,1–1,2, расстояние между осями трубок должно составлять 1,5–2 диаметра спирали.

Ленточные нагреватели выполняются в виде зигзагов различных размеров и крепятся на металлических (из жароупорной стали или нихрома) или керамических крючках. Чем гуще ленточные зигзагообразные нагреватели, тем более длинный нагреватель можно разместить в печи, но тем больше взаимозэкранирование витков, тем хуже используется поверхность ленты. Поэтому установились принятые размеры ленточных зигзагообразных нагревателей, обеспечивающие достаточную их прочность и малое взаимозэкранирование. Наиболее употребительное отношение ширины ленты к ее толщине равно 10.

Для температур на нагревателе до 1000 °С в промышленных печах применяют ленту размером не менее 1 × 10 мм, при более высоких температурах – не менее 2 × 20 мм.

В электрических печах сопротивления (ЭПС) с номинальной температурой 1350 °С применяются карборундовые нагреватели (карбид кремния (SiC)), а в ЭПС с номинальной температурой 1700 °С – нагреватели, изготовленные из дисилицида молибдена (MoSi₂) и хромита лантана (LaCrO₃).

2.2.3. Основные типы печей сопротивления

Печь сопротивления представляет собой футерованную камеру, где тепло выделяется в нагревателе.

Электрические печи сопротивления по способу превращения электрической энергии в тепловую разделяются на печи косвенного действия и установки прямого нагрева (рис. 2.8).

Печи сопротивления косвенного нагрева (рис. 2.9) разделяются по температурному режиму на низко-, средне- и высокотемпературные.

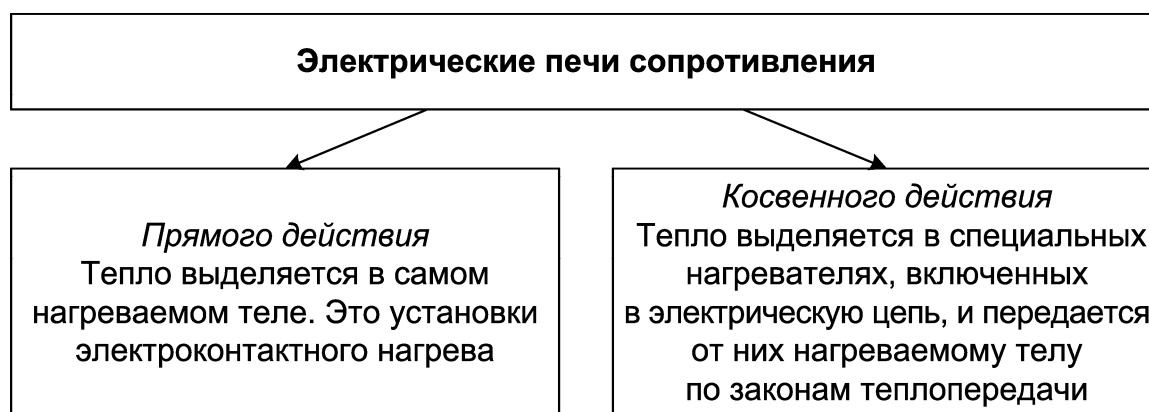


Рис. 2.8. Классификация электрических печей сопротивления по способу превращения электрической энергии в тепловую

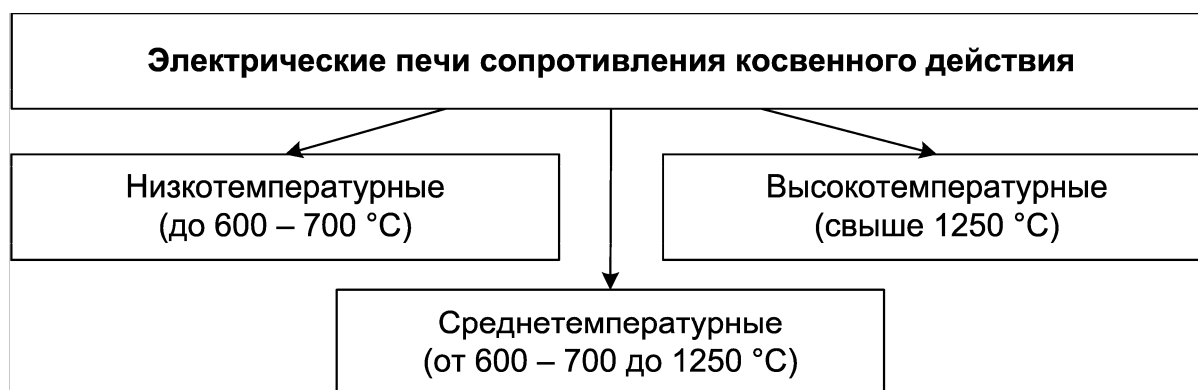


Рис. 2.9. Классификация ЭПС по температурному режиму

У низкотемпературных ЭПС верхняя температурная граница лежит в пределах 600–650 °С и процессы теплообмена идут со значительной или даже преобладающей ролью конвекции. Низкотемпературные печи часто называют конвекционными печами.

В средне- и высокотемпературных печах теплообмен внутри печи осуществляется в основном излучением, а доля конвективного теплообмена незначительна. Печи с преобладающим лучистым теплообменом иногда называют радиационными.

Среднетемпературные печи имеют верхнюю температурную границу 1200–1250 °С, определяемую возможностью применения для нагревательных элементов специальных сплавов.

Технологическое применение этих печей весьма обширно: процессы закалки, нормализации, отжига, термохимическая обработка черных металлов, нагрев под обработку давлением черных и цветных металлов и т. п.

Названные группы печей отличаются как конструктивно, так и механизмом передачи тепла от нагревателя к изделию. Таким образом, в низкотемпературных печах основным механизмом передачи тепла является конвекция, т. е. в таких печах тепло передается потоком циркулирующего воздуха. Для интенсификации процесса теплопередачи низкотемпературные печи обычно снабжают вентилятором, и нагреватель иногда размещается в отдельной камере. Эта камера связана с основной камерой каналами для циркуляции воздуха. В средне- и высокотемпературных печах основное тепло от нагревателя к изделию передается излучением. Следовательно, в данных печах установка вентилятора не нужна, но необходимо наличие оптической связи между нагревателем и изделием, т. е. они должны быть размещены в общей камере.

Другие конструктивные отличия средне- и высокотемпературных печей от низкотемпературных связаны с устройством футеровки и материалом нагревательных элементов. В низкотемпературных печах футеровка содержит только теплоизоляционный слой, а жесткость футеровки обеспечивается двумя связанными между собой внешним и внутренним каркасами.

В среднетемпературных печах в футеровке появляется огнеупорный слой, выполненный из легковеса. Этот слой имеет механическую связь с внешним каркасом печи, в связи с чем надобность во внутреннем каркасе отпадает.

В высокотемпературных печах огнеупорный слой выполнен из шамота. Между огнеупорным слоем и слоем теплоизоляции вводится дополнительный слой легковеса для снижения температуры теплоизоляции до допустимой.

В низко- и среднетемпературных печах используются металлические нагреватели из фехраля и константана при температурах в печах до 800 °С и нихрома – до 1000 °С.

В высокотемпературных печах обычно используют неметаллические нагреватели (карборундовые, графитовые, угольные). Такие нагреватели могут значительно изменять свое сопротивление при нагреве и в процессе эксплуатации. Кроме того, для надежной работы такие нагреватели должны разогреваться постепенно при малой мощности (иначе они растрескаются).

Учет этих специфических особенностей приводит к необходимости применять в высокотемпературных печах те или иные средства регулирования подводимого напряжения (автотрансформатор, регулируемый трансформатор).

Для многих технологических процессов требуются вакуум или инертные газы в рабочем пространстве печи, поэтому в ряде случаев печи сопротивления выполняют вакуумными, газонаполненными или вакуумно-компрессионными.

По технологическому назначению печи сопротивления косвенного нагрева можно разделить на три группы (рис. 2.10).



Рис. 2.10. Классификация ЭПС по технологическому назначению

Термические печи предназначены для различных видов термической и термохимической обработки черных и цветных металлов, стекла, керамики, металлокерамики, пластмасс и других материалов.

Плавильные печи используются для плавки легкоплавких цветных металлов и химически активных тугоплавких металлов и сплавов.

Сушильные печи – для сушки лакокрасочных покрытий, литейных форм, обмазок сварочных электродов, металлокерамических изделий и т. п.

По способу обработки изделий ЭПС разделяют на печи периодического действия (садочные печи) и печи непрерывного действия (методические).

По первому способу изделие помещают в камеру печи и изменяют температуру внутри камеры в соответствии с графиком обработки. Потом изделие выпускают, загружают новое, цикл повторяется.

Для печи периодического действия (садочной) характерно неизменное положение нагреваемого тела (садки) в течение всего времени пребывания в печи. Печь может работать круглосуточно (тогда циклы непрерывно следуют друг за другом) или с перерывами – в одну или две смены.

По второму способу в печи создают несколько температурных зон в соответствии с требуемым графиком обработки изделия. Обрабатываемое изделие перемещается с заданной скоростью от загрузочного окна к разгрузочному. При такой организации процесса возможно движение изделий непрерывным потоком. Такие печи используют в условиях серийного производства. Автоматизация технологического процесса в таких печах предполагает обеспечение автоматического перемещения изделия с заданной скоростью внутри печи, автоматическую подачу необработанных изделий

и уборку обработанных, а также автоматическую стабилизацию температуры в температурных зонах печи.

Печи непрерывного действия особенно удобны для работы в поточных технологических линиях с металлообрабатывающими станками и другими агрегатами и устройствами.

Печи сопротивления периодического действия. Электropечи сопротивления периодического действия разнообразны по конструкции, их применяют в индивидуальном или мелкосерийном производстве [3].

Из ЭПС периодического действия наиболее широко распространены колпаковые, элеваторные, камерные и шахтные печи.

Камерная электропечь – печь периодического действия с камерой нагрева, загрузка и разгрузка садки которой производятся в горизонтальном направлении. Камерная печь состоит из прямоугольной камеры с огнеупорной футеровкой и теплоизоляцией, перекрытой сводом и помещенной в металлический кожух (рис. 2.11).

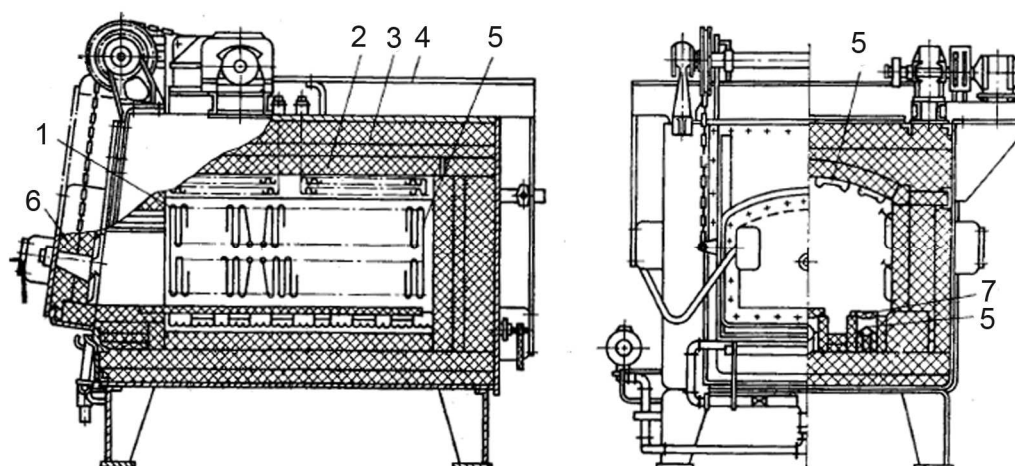


Рис. 2.11. Камерная электропечь:

- 1 – рабочая камера; 2 – огнеупорный слой футеровки; 3 – теплоизоляционный слой футеровки; 4 – кожух; 5 – нагревательные элементы; 6 – футерованная дверца;
7 – подовая плита

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

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

Шахтная печь (рис. 2.12, 2.13) представляет собой круглую, квадратную или прямоугольную шахту. Корпус печи заглублен в землю и перекрывается сверху крышкой с затвором и электроприводом. Нагревательные элементы в ней установлены обычно по боковым стенкам.

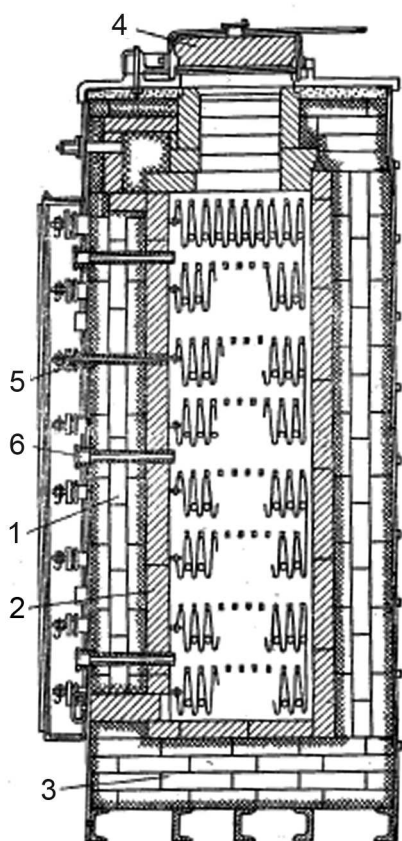


Рис. 2.12. Шахтная печь:

1 – нагреватели; 2 – огнеупорная кладка;
3 – теплоизоляция; 4 – крышка печи;
5 – вывод нагревателя; 6 – термопара

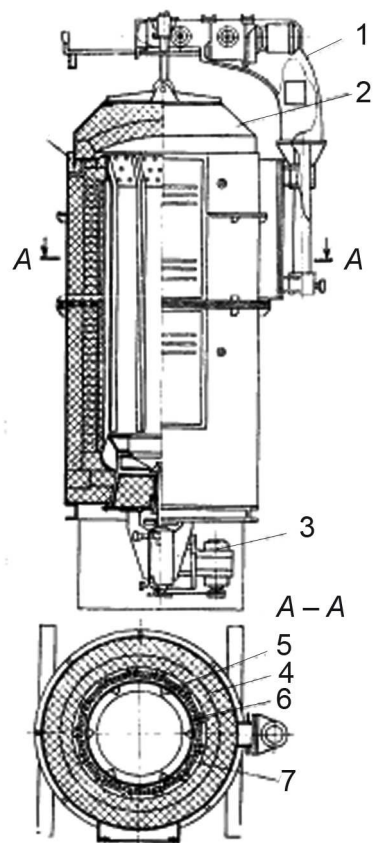


Рис. 2.13. Шахтная электропечь:

1 – механизм подъема и поворота
крышки; 2 – крышка; 3 – вентилятор;
4 – футеровка; 5 – направляющие; 6 – экран;
7 – нагреватели

Колпаковая печь – печь периодического действия с открытым снизу подъемным нагревательным колпаком и неподвижным стендом (рис. 2.14). Нагреваемые детали (садка) с помощью подъемно-транспортных устройств помещаются на стенд. Поверх них сначала устанавливается жаропрочный колпак – муфель, а затем основной колпак камеры печи, выполненной из металлического каркаса с огнеупорной футеровкой. Нагревательные элементы расположены по боковым стенкам колпака и в кладке стенда. Питание нагревательных элементов осуществляется с помощью гибких кабелей и штепсельных разъемов.

По окончании нагрева электропитание колпака отключается и он переносится на соседний стенд, где уже установлена очередная загрузка для нагрева. Остывание садки происходит на стенде под жароупорным муфелем, что обеспечивает необходимую скорость остывания.

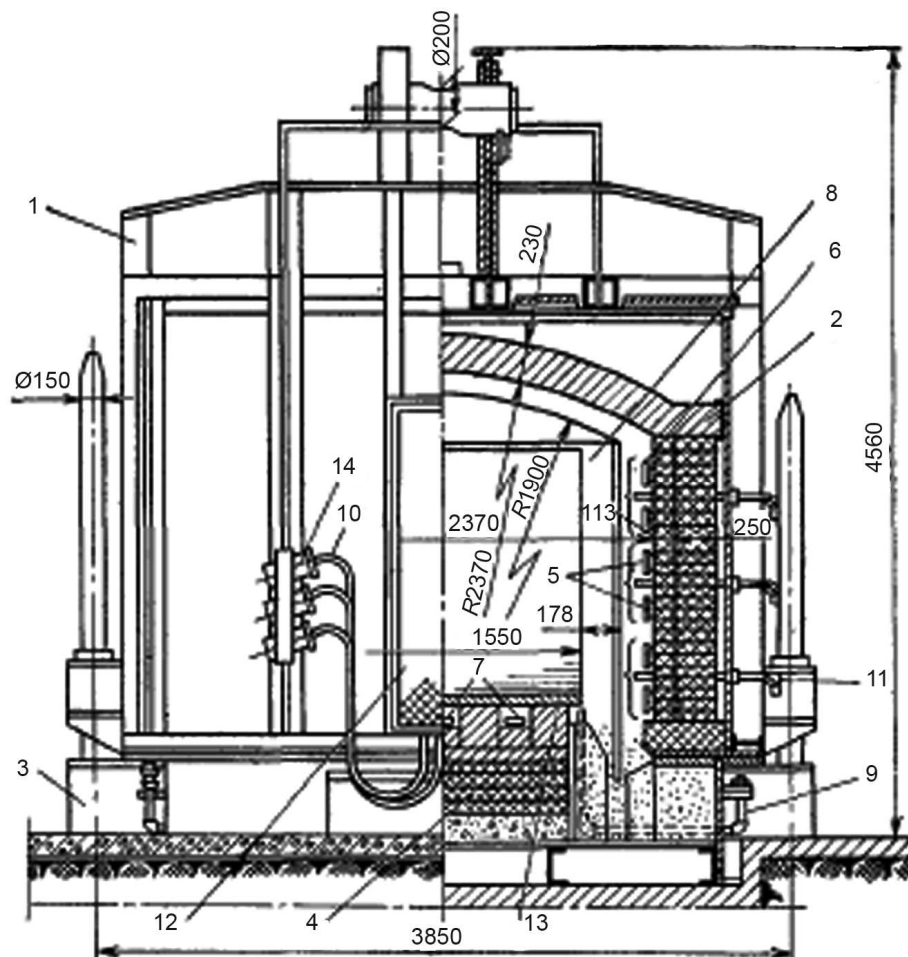


Рис. 2.14. Колпаковая электропечь:

- 1 – каркас колпака; 2 – футеровка колпака; 3 – каркас стенда; 4 – футеровка стенда;
 5, 6 – нагреватели колпака; 7 – нагреватели стенда; 8 – муфель; 9 – газопровод;
 10 – гибкий токопровод; 11 – терморпара; 12 – коробка выводов; 13 – подовая плита;
 14 – электрический разъемный контакт

В колпаковых печах при каждом цикле теряется 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 и с опускающимся подом (рис. 2.15).

Данный вид ЭПС периодического действия представляет собой цилиндрическую или прямоугольную камеру, установленную на колоннах на высоте 3–4 м над уровнем пола цеха.

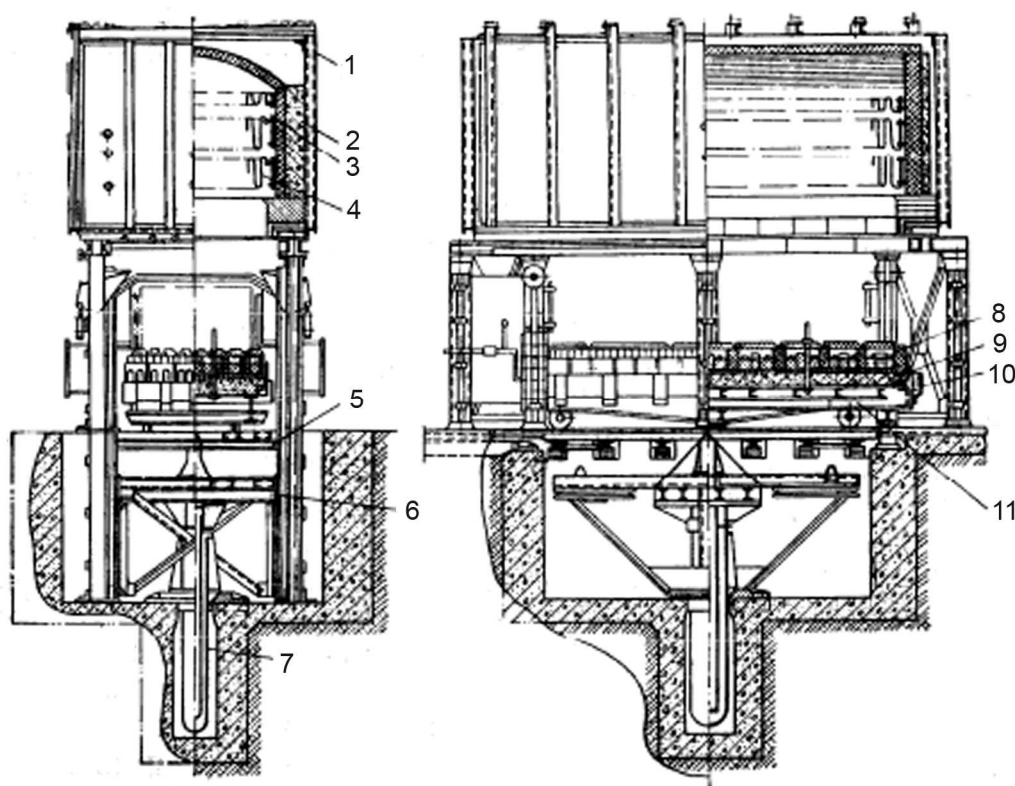


Рис. 2.15. Элеваторная электропечь:

- 1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – боковые нагреватели; 4 – торцовые нагреватели;
 5 – платформа с рельсовым путем; 6 – платформа плунжера; 7 – плунжер;
 8 – подовые нагреватели; 9 – футеровка тележки; 10 – песочный затвор; 11 – тележка

Под печи поднимается и опускается гидравлическим или электромеханическим подъемником, который установлен под камерой нагрева. Нагреваемые изделия – садку нагружают на тележку, затем с помощью лебедки продвигают под печь и поднимают подъемником, вдвигая в камеру. По окончании технологического процесса под опускается и изделие снимается (см. рис. 2.15).

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

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

Печи комплектуются многоступенчатыми трансформаторами.

Электрические печи-ванны применяются для термической обработки ответственных длинномерных и тонкостенных металлических изделий в ин-

дивидуальном и мелкосерийном производстве. Нагрев в них осуществляется жидкими теплоносителями (маслом, щелочами, расплавами солей).

Электрическая печь-ванна имеет вид шахтной печи со встроенной в рабочее пространство ванной или тиглем. Электродпечи-ванны бывают с внешним обогревом, в которых нагреватели расположены на внутренней поверхности огнеупорной кладки; с внутренним обогревом трубчатыми погруженными в теплоноситель электронагревателями; с внутренним обогревом электродными группами (однофазными и трехфазными) – в этом случае ток протекает в теплоносителе между электродами.

Особенно широко распространены электродные соляные ванны. В них одновременно обеспечивается быстрый, равномерный и безокислительный нагрев изделий. Подбором состава солей можно также проводить и термохимическую обработку (цементацию, азотирование, борирование и т. п.). На рис. 2.16 изображена серийная электродная ванна на рабочую температуру до 1300 °С.

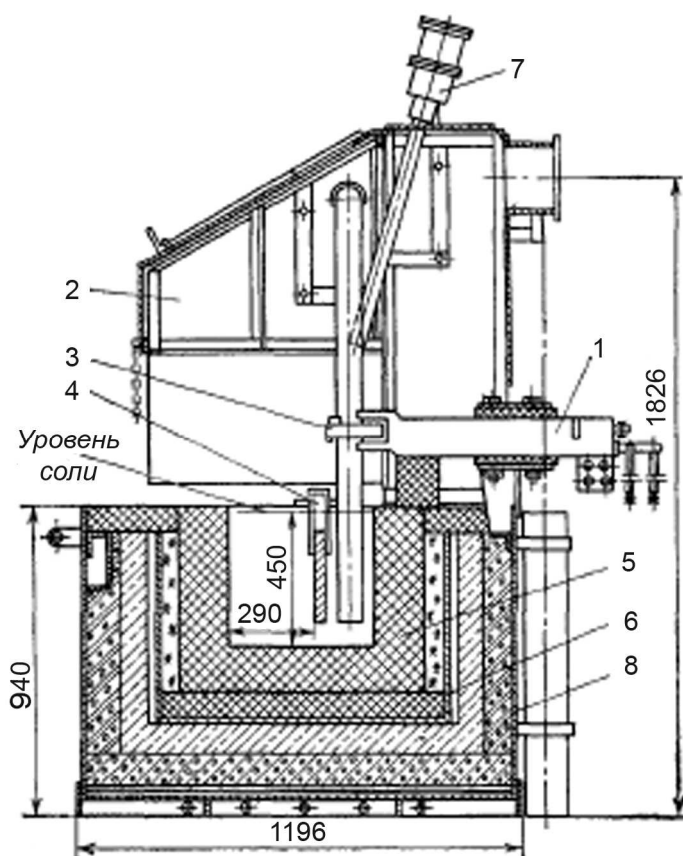


Рис. 2.16. Электродная соляная ванна:

- 1 – токопровод; 2 – зонд; 3 – электродная группа; 4 – перегородка; 5 – футеровка;
6 – внутренний кожух; 7 – пирометр; 8 – наружный кожух

Ванна прямоугольной формы выложена огнеупорным шамотным кирпичом в промежуточном металлическом кожухе-тигле, вместе с которым она может легко извлекаться из печи и заменяться новой. Промежуточный кожух служит также для предохранения тепловой изоляции от проникновения расплавленных солей.

В ванне вдоль одной из сторон помещены три цилиндрических стальных электрода, к которым через электрододержатели и шинопровод подведено напряжение от вторичных обмоток понижающего трансформатора, устанавливаемого непосредственно около печи. Трансформаторы ванн имеют переключатели ступеней напряжения, позволяющие регулировать подводимое к электродам напряжение в пределах от 6 до 18 В.

Электродные соляные ванны предназначены для безокислительного нагрева изделий до температуры, не превышающей 1300 °С, и применяются главным образом для термообработки режущего и ударного инструмента.

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

Конструкции печей непрерывного действия различаются в основном механизмами перемещения нагреваемых изделий в рабочем пространстве печи (рис. 2.17) [3].

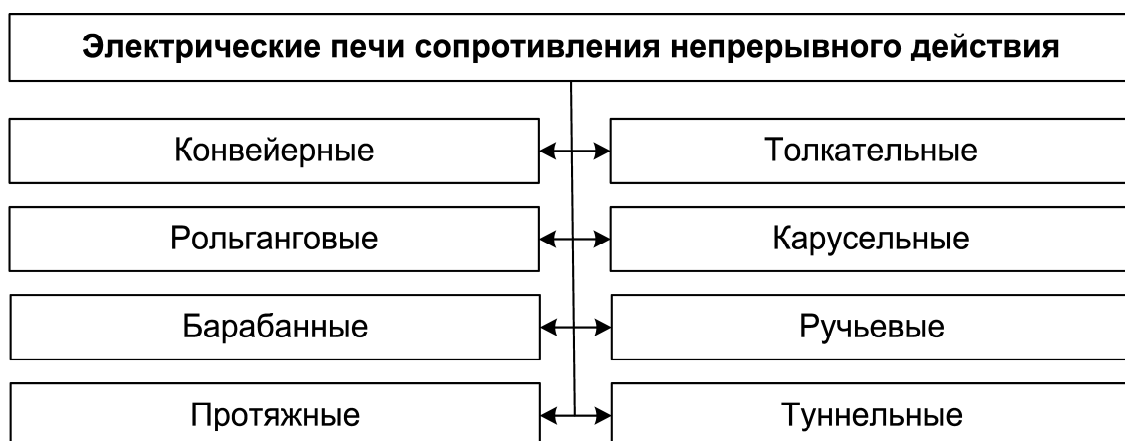


Рис. 2.17. Основные виды печей сопротивления непрерывного действия

Опишем наиболее широко распространенные печи. В ЭПС непрерывного действия изделия загружаются в печь и, непрерывно или периодически перемещаясь по длине электропечи, нагреваются и выходят с другого конца печи нагретыми до определенной температуры. Температуры различных точек рабочего пространства в ЭПС непрерывного действия могут быть различными или одинаковыми, однако они не изменяются во времени.

Электропечи сопротивления непрерывного действия целесообразно применять в тех случаях, когда имеется установившийся технологический процесс термообработки и требуется провести термообработку большого количества идентичных изделий, т. е. в массовых и крупносерийных производствах. Эти печи должны быть снабжены тем или иным приспособлением для перемещения деталей. Они сложнее печей периодического действия, но зато имеют значительно большую производительность при тех же габаритах и обеспечивают идентичность режима термообработки.

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.

В таком агрегате изделие вначале нагревается в закалочной ЭПС, затем поступает в закалочный бак, откуда попадает в моечную машину, где смывается закалочная жидкость (масло), высушивается в сушильной ЭПС и попадает в отпускную ЭПС.

Входящие в агрегат установки должны иметь одинаковую производительность, так как производительность агрегата в целом определяется той входящей в его состав установкой, которая имеет самую малую производительность.

Такие автоматизированные агрегаты могут входить в состав поточных и автоматических линий.

Электропечь непрерывного действия, как правило, имеет несколько тепловых зон с самостоятельным регулированием температуры, что дает возможность создавать различные температурные режимы. Длина зоны обычно равна 1,5–2 м, а в тех случаях, когда не требуется обеспечивать заданный график нагрева, длина зоны может быть увеличена до 2,5–3 м, и, наоборот, когда необходимо точно выдержать заданную кривую нагрева изделий, длину зоны следует уменьшить до 0,8–1,2 м.

В случае необходимости ЭПС непрерывного действия могут комплектоваться камерами охлаждения. Эти печи могут работать с контролируемыми атмосферами. При этом с загрузочной и разгрузочной сторон устанавливаются так называемые шлюзовые камеры или со стороны разгрузки устанавливается специальный разгрузочный лоток, входящий в рабочую среду закалочного бака, тем самым образуя гидравлический затвор.

Электropечь непрерывного действия с рабочей температурой до 700 °С часто оборудуют вентиляторами. Нагреватели в электropечах устанавливают на своде, поду и боковых (реже торцевых) стенках.

Конвейерные электropечи (рис. 2.18) являются наиболее распространенным типом ЭПС непрерывного действия. Они применяются в основном для термообработки мелких и средних по габаритам и массе изделий крупносерийного и массового производства, например колец подшипников.

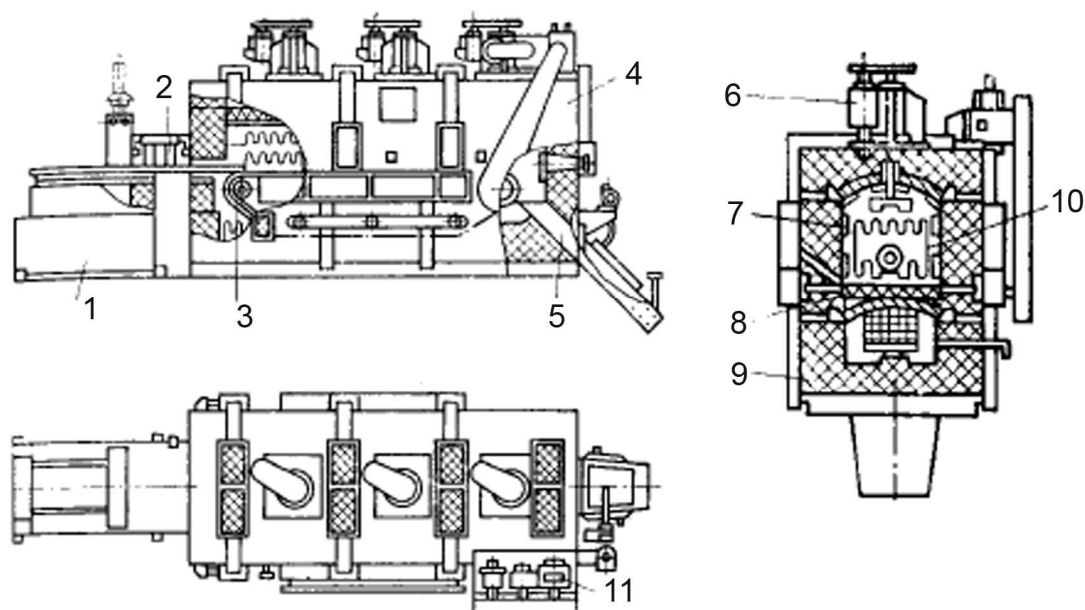


Рис. 2.18. Горизонтальная конвейерная электropечь с рабочей температурой 700 °С:

- 1 – загрузочное приспособление; 2 – форкамера со шторами; 3 – конвейерная лента;
4 – кожух; 5 – лоток; 6 – вентилятор; 7 – боковые нагреватели; 8 – подовые
нагреватели; 9 – футеровка; 10 – торцевые нагреватели; 11 – привод конвейера

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 вы-

полнена плетеной из нихромовой сетки, штампованных пластин и соединяющих их прутков, а также (для тяжелых нагреваемых изделий) из штампованных или литых цепных звеньев.

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 подду 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 нагрева и мелких, и крупных изделий до температуры 1150 °С могут быть использованы *толкательные электропечи* (рис. 2.19). На подду этих ЭПС установлены жароупорные направляющие в виде труб, рельсов или роликового пода, вдоль которых перемещаются поддоны с нагреваемыми изделиями. Находящийся на загрузочном торце печи толкатель вдвигает в электропечь с загрузочного стола очередной поддон с изделиями, и так как поддоны расположены вплотную друг к другу, то в движение приходят все ранее загруженные в печь поддоны.

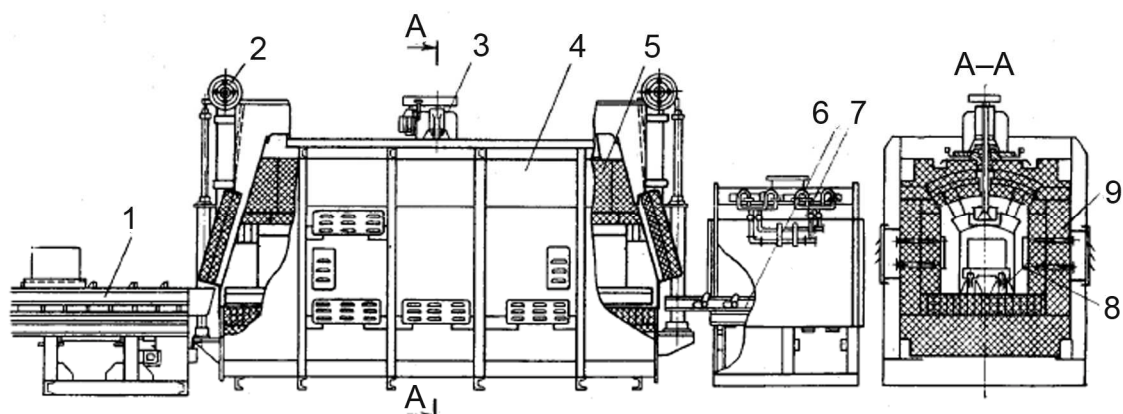


Рис. 2.19. Толкательная электропечь с камерой охлаждения:

1 – толкатель; 2 – дверца с механизмом подъема; 3 – вентилятор; 4 – кожух; 5 – футеровка;
6 – таскатель; 7 – камера охлаждения; 8 – нагреватели; 9 – рельсовый путь

После подхода к разгрузочному концу печи поддон либо сам скатывается по наклонному рольгангу, либо захватывается таскателем и направляется им на разгрузочный стол.

Основными преимуществами толкательных ЭПС являются достаточно хорошая герметичность, относительная простота, отсутствие транспортирующих механизмов в зоне высоких температур.

Недостаток данных ЭПС – это наличие массивных поддонов, что ограничивает длину электропечей до 10–12 м из-за невозможности перемещения поезда поддонов большей длины. Кроме того, на нагрев поддонов затрачивается до 25 % полезной теплоты. Определенная трудность имеется также в возврате поддонов от разгрузочного конца ЭПС к загрузочному. Стойкость поддонов также невелика – она исчисляется несколькими месяцами, и стоимость поддонов существенно удорожает себестоимость термообработки. В ряде случаев при нагреве крупных изделий правильной формы удастся укладывать изделия вплотную, непосредственно на направляющие и тем самым обойтись без поддонов, что исключает недостатки, имеющиеся в ЭПС с использованием поддонов.

В большинстве современных толкательных ЭПС загрузку и выгрузку поддонов, а также открывание дверей производят с помощью гидравлических приводов, хотя возможно и применение электромеханического привода.

Герметизацию загрузочного торца ЭПС обеспечивает специальная загрузочная камера, оборудованная подъемным колпаком, в который поддоны подают снизу загрузочным столом, а также боковой заслонкой с эксцентриковыми зажимами или специальным загрузочным механизмом и пламенной завесой, включаемой в момент загрузки.

В связи с тем, что толкательные ЭПС легко могут быть загерметизированы, они широко применяются для цементации стальных изделий.

Используются также муфельные и безмуфельные толкательные ЭПС. Безмуфельные ЭПС бывают с закрытыми и открытыми нагревателями. Наличие муфеля и связанный с этим повышенный расход дорогостоящих дефицитных никельсодержащих жароупорных сталей являются недостатками муфельных толкательных печей, кроме того, эти ЭПС не могут иметь температуру выше 950 °С. Эти же недостатки имеют безмуфельные ЭПС с закрытыми нагревателями.

Однако и те и другие печи обладают достоинствами, заключающимися в большей надежности нагревателей, а также в возможности быстрой замены нагревателей без охлаждения ЭПС.

Безмуфельные ЭПС с открытыми нагревателями могут иметь температуру до 1050 °С, что может значительно повысить их производительность. Однако осаждение сажи на футеровке и нагревателях резко сокращает срок службы нагревателей, в связи с чем подобные ЭПС не получили широкого применения.

На основе толкательных ЭПС могут быть созданы агрегаты, в которых можно проводить ряд последовательных термических и химико-термических процессов. Толкатели этих ЭПС приспособлены для передачи поддонов с изделиями на толкатель последующей ЭПС.

В России и странах СНГ созданы серии толкательных электропечей для работы в «воздушной атмосфере» на температуры 350, 750, 900 и 1000 °С, а также серия толкательных ЭПС для цементации при температуре 950 °С.

Рольганговые электропечи, передвижение изделий в которых осуществляется рольганговым подом (рис. 2.20), являются наиболее универсальными среди ЭПС непрерывного действия. В рольганговых печах могут быть обработаны разнообразные по форме и массе изделия. Увеличение длины электропечи не сказывается на надежности ее работы.

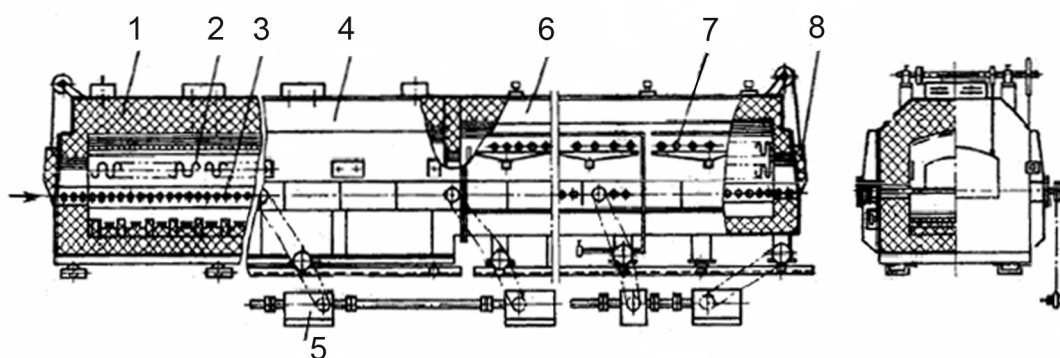


Рис. 2.20. Рольганговая электропечь:

1 – футеровка; 2 – нагреватель; 3 – рольганг; 4 – кожух; 5 – привод рольганга;
6, 7 – камера охлаждения; 8 – дверца

Для перемещения по электропечи изделия загружаются непосредственно на рольганг или в специальные жароупорные поддоны, которые помещаются на рольганг. Рольганговые ЭПС могут комплектоваться загрузочным столом или загрузочным механизмом, камерой загрузки, камерой охлаждения, закалочным баком, разгрузочным столом или разгрузочным механизмом, разгрузочной камерой, кантователем, транспортером возврата.

Для проведения ремонта эти печи имеют съемные своды. При использовании рольганговых ЭПС для работы с контролируемыми атмосферами ролики должны быть герметичными, в случае необходимости они охлаждаются водой. Движение роликов, как правило, осуществляется общим наружным приводом.

В *карусельных электропечах* транспортирующим узлом служит под, выполненный в виде кольца. Под вращается, перемещая изделия в печном пространстве.

Карусельные ЭПС используются для низкотемпературного отпуска стальных изделий (до 250 °С), для закалки мелких стальных изделий (до 850 °С), для нагрева под закалку перед штамповкой (до 1150 °С) и для нагрева под прокатку в металлургии (до 1250 °С). Эти ЭПС возможно применять на температуры до 1300 °С при значительных массах загрузки благодаря тому, что механизмы перемещения находятся вне зоны высоких температур. Подина так же, как и рабочая камера, может быть керамической и практически не иметь металлических деталей, ограничивающих температуру применения.

В карусельных ЭПС можно нагревать изделия сложной конфигурации без поддонов, что не всегда возможно в других печах непрерывного действия.

Карусельные ЭПС сравнительно легко могут быть приспособлены для работы с защитной атмосферой. В этом случае оконные проемы печи оборудуются пламенными завесами и шторами.

Недостатком этого вида ЭПС являются определенные трудности, связанные с механизацией загрузки и выгрузки обрабатываемых изделий, так как загрузочный и разгрузочный проемы находятся рядом. По этой же причине эти ЭПС неудобно использовать в поточных линиях.

Карусельные ЭПС для сравнительно низких температур имеют под, выполненный в виде металлоконструкции, расположенной внутри печного пространства. Для легких загрузок под имеет одну опору, вал которой выводится из печного пространства и приводится во вращение приводом, как правило, с применением системы зубчатых передач.

В карусельных ЭПС для закалки мелких изделий вращающийся под выполняется с ковшами. Одна сторона ковша прикрепляется на шарнире к вращающейся конструкции пода, другая скользит по кольцеобразной неподвижной направляющей. Против разгрузочного лотка ЭПС неподвижная направляющая обрывается, и ковш опрокидывается, а изделия, находящиеся в нем, высыпаются в закалочный бак. При более высоких температурах и тяжелых нагрузках внутри печного пространства располагается огнеупорная часть пода, а его металлоконструкция выносится из зоны высоких температур; опорой пода служат ролики. Обрабатываемые изделия помещаются непосредственно на огнеупорную часть пода.

Для загрузки и выгрузки изделий карусельные ЭПС могут иметь один проем, если охлаждение нагретых обрабатываемых изделий при их разгрузке не сказывается на их качестве (например, при отпуске и отжиге), а также могут иметь два проема с огнеупорной перегородкой между ними, если ЭПС предназначены, например, для закалки или нагрева под штамповку, прессование или

прокатку. Вращение пода может быть непрерывным или прерывистым. Если на вращающемся поду расположены нагревательные элементы, то электропитание к ним подводится через скользящие контакты. На рис. 2.21 представлена карусельная электропечь с защитной атмосферой. Она предназначена для нагрева под штамповку заготовок из титановых жаропрочных сплавов и конструкционных сталей в защитной атмосфере. Данная печь состоит из цилиндрического кожуха, футерованного огнеупорными и теплоизоляционными материалами. В футерованном кожухе выполнены загрузочный и разгрузочный проемы, которые перекрываются заслонками механизма подъема. На кожухе устанавливается футерованная крышка, которая крепится к кожуху болтами. Заготовки через загрузочный проем подаются автоматически с помощью роботизированно-технологического комплекса (РТК) на позиции футерованного пода, вращающегося на опорных роликах, установленных на раме. Вращение пода осуществляется электромеханическим приводом. Нагрев заготовок производится с помощью зигзагообразных проволочных нагревателей. При подъеме заслонок включается подача природного газа через газопровод и загорается пламенная завеса. При опускании заслонки подача природного газа прекращается.

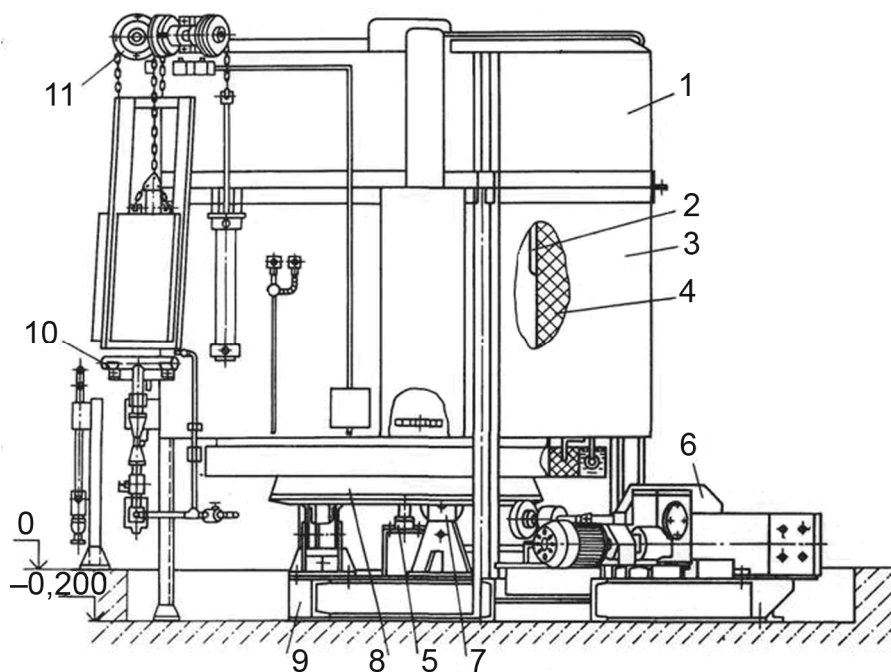


Рис. 2.21. Карусельная электропечь с защитной атмосферой:

- 1 – футерованная крышка; 2 – зигзагообразные проволочные нагреватели;
- 3 – цилиндрический кожух; 4 – футерованные огнеупорные и теплоизоляционные материалы; 5 – газопровод; 6 – электромеханический привод; 7 – опорные ролики;
- 8 – футерованный под; 9 – рама; 10 – газопровод; 11 – механизм подъема

Барабанные электропечи предназначены в основном для обработки изделий с максимальным размером до 80 мм, а также для нагрева порошкообразных материалов.

Перемещение нагреваемых изделий или порошка через электропечь осуществляется во вращающемся барабане-муфеле. Внутри муфеля находятся непрерывные ребра, расположенные по винтовой линии с определенным шагом по всей длине. В этом случае при каждом обороте муфеля обрабатываемые изделия перемещаются на один виток. Возможен барабан и без ребер для передвижения изделий. В этом случае необходимо расположить барабан наклонно под углом 1–5° в сторону разгрузки.

Преимущества барабанных ЭПС в сравнении с другими ЭПС непрерывного действия состоят в том, что они имеют сравнительно высокие технико-экономические показатели из-за отсутствия затрат теплоты на нагрев вспомогательных транспортных средств, легко встраиваются в автоматические и поточные линии, не требуют каких-либо дополнительных транспортных приспособлений, легко герметизируются и тем самым приспособлены для использования их с контролируемыми атмосферами. В этих ЭПС обеспечивается высокое качество термообработки, так как благодаря непрерывному перемешиванию все детали находятся в одинаковых температурных условиях.

Недостатками этих ЭПС являются сравнительно низкая производительность, обусловленная невозможностью обеспечения полного заполнения барабана, а также ограниченная длина барабана. Кроме того, в этих ЭПС имеется повышенный расход дорогих дефицитных жароупорных сталей.

Нагреваемые в барабанных ЭПС изделия не должны быть тонкостенными и сложной формы, так как при транспортировке изделий через печь на них могут появиться забоины и вмятины. Эти печи наиболее целесообразно применять в условиях массового и крупносерийного производства (например, при термообработке шариков, роликов, гаек, колец, осей и т. д.).

Максимальная рабочая температура барабанных печей составляет 1000 °С, она ограничена работоспособностью металлического муфеля. Барабанные ЭПС, как правило, имеют съемные своды. При использовании этих ЭПС с контролируемыми атмосферами применяются герметичные загрузочные и разгрузочные устройства. В этом случае муфели имеют центральную трубу, к которой примыкают витки ребер, что обеспечивает проход газа через все витки муфеля. Имеются ЭПС, в печном пространстве которых распо-

жены два муфеля. Барабанные ЭПС используются в поточных линиях для комплексной обработки изделий. Так, широкое применение нашли закально-отпускные и цементационно-закально-отпускные агрегаты.

В России и странах СНГ производятся барабанные ЭПС для термической и химико-термической обработки деталей, а также для нагрева сыпучих материалов на температуры от 200 до 1000 °С, мощностью от 10 до 500 кВт, диаметром рабочего пространства от 400 до 1600 мм и длиной муфеля от 1,2 до 10 м.

Протяжные электропечи (рис. 2.22) предназначены для нагрева проволоки, ленты, тонкого листа, труб большой протяженности. В процессе обработки нагреваемый металл непрерывно протягивается через печь с помощью размоточно-намоточных механизмов.

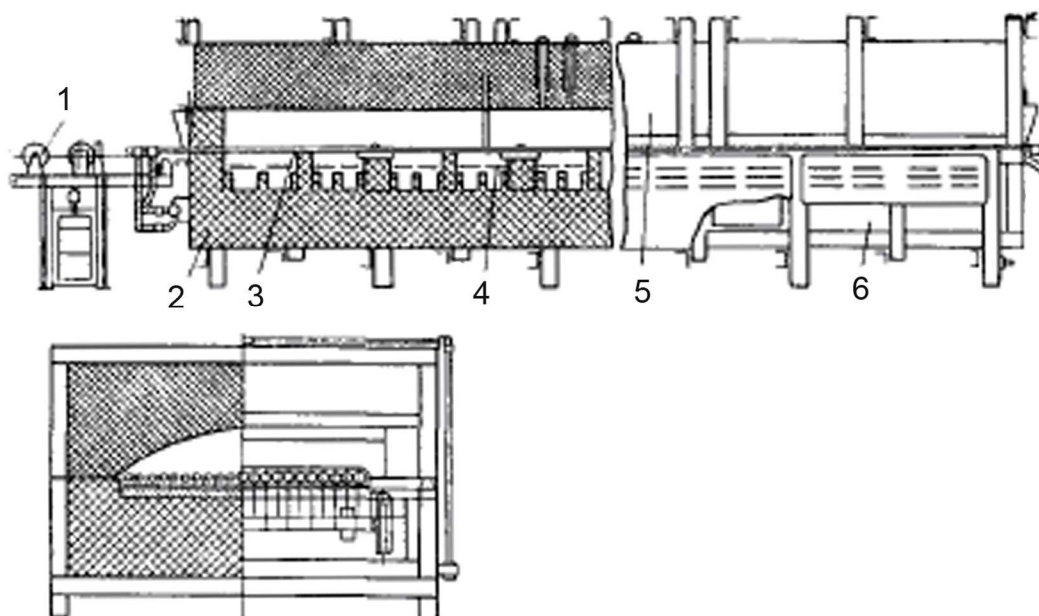


Рис. 2.22. Протяжная электропечь для термообработки проволоки:

1 – ролики; 2 – футеровка; 3 – муфель; 4 – нагреватели; 5 – крышка;
6 – кожух электропечи

Преимуществом протяжных ЭПС является высокая равномерность нагрева и, как следствие этого, высокое качество обработки в сравнении с нагревом в бухтах или рулонах. Недостатком этих ЭПС является их сравнительно большая длина.

Протяжные ЭПС бывают горизонтальными и вертикальными. В целях получения более высокой производительности электропечей и сокращения их длины ЭПС делаются многорядными, т. е. через одну печную

камеру протягивается одновременно несколько рядов проволоки, ленты или труб. Для увеличения рядности ЭПС выполняются многоэтажными – с печными камерами, расположенными одна над другой. Кроме того, используется также многократное прохождение (многоходность) проволоки или ленты через одну или несколько рядом стоящих ЭПС.

Кроме термообработки проволоки, ленты и других изделий из черных и цветных металлов протяжные ЭПС широко применяются для сушки и полимеризации лаков или пластмасс. Особым видом протяжных ЭПС являются башенные печи, которые применяются для термообработки при большей производительности сравнительно с горизонтальными печами. Скорость движения ленты в таких ЭПС достигает 10 м/с при ширине ленты до 1 м. Для исключения остаточных деформаций в ленте диаметр ролика, который огибает лента, должен быть в 800–1000 раз больше толщины ленты в холодном состоянии и в 600–700 раз – в горячем. Тем самым ограничивается толщина обрабатываемой ленты (она не превышает в реальных печах 2 мм).

Для обеспечения нормального прохождения проволоки, ленты или труб через горизонтальную протяжную печь на практике часто используют направляющие трубы (в случае обработки проволоки или труб) или муфели (в случае обработки ленты). Направляющие трубы или муфели расположены в печном пространстве, и через них протягиваются обрабатываемые изделия.

Наличие направляющих труб и муфелей облегчает использование протяжных ЭПС с контролируруемыми атмосферами.

В России и странах СНГ серийно выпускается ряд протяжных электропечей: для термообработки проволоки – горизонтальные печи на температуры 950, 1150 и 1300 °С мощностью от 100 до 500 кВт и длиной до 20 м, в которых обрабатывается проволока диаметром от 0,2 до 6 мм (одновременно нагревается до 24 проволок); для термообработки ленты – горизонтальные ЭПС на 650, 950, 1150 и 1300 °С мощностью до 400 кВт и длиной до 25 м, в которых обрабатывается лента толщиной от 0,1 до 5 мм; для эмалирования медной и алюминиевой проволок и лент – вертикальные ЭПС на температуру до 600 °С мощностью до 130 кВт, в которых эмалируются проволока диаметром от 0,02 до 3,5 мм и ленты сечением до 500 мм² (одновременно нагревается до 28 проволок, каждая проволока проходит через печь до 10 раз).

Туннельные электропечи. Главным преимуществом туннельных ЭПС (рис. 2.23) является то, что их металлоконструкции (ходовая часть тележек

и рельсы) отделены футеровкой тележки от рабочей камеры печи (зоны наибольших температур). Кроме того, эти ЭПС могут иметь достаточно большую производительность.

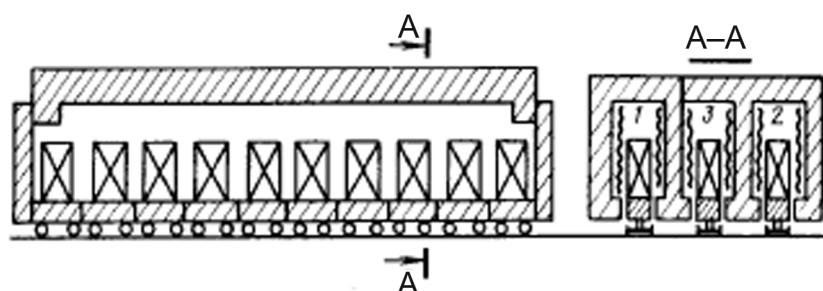


Рис. 2.23. Схема туннельной электропечи

Недостатком этих ЭПС является наличие футерованных тележек, которые обладают большой массой и, следовательно, требуют больших затрат на их нагрев; к тому же для возврата тележек требуются специальные механизмы и площади. Кроме того, частые нагревы и охлаждения тележек приводят к растрескиванию их футеровки и преждевременному выходу из строя.

Туннельные ЭПС бывают однорядными и многорядными. Применяются они в основном в огнеупорной промышленности для обжига керамики при температуре до 1300 °С, хотя в отдельных случаях используются для сушки сварочных электродов при температуре до 300 °С. Для улучшения технико-экономических показателей этих печей используется рекуперация теплоты. Так, в трехрядных ЭПС в крайних рядах загрузки перемещаются в направлении, противоположном движению в центральном ряду. Начальная стадия нагрева загрузки происходит в крайних рядах, конечная – в центральном. В этом случае часть теплоты от изделий, находящихся в центральном ряду, передается изделиям, находящимся в крайних рядах. При этом одновременно упрощается передача тележек от выхода их из электропечи ко входу. Темп перемещения тележек в крайних рядах в два раза меньше, чем в центральном.

Высокотемпературные электропечи. В последние десятилетия в связи с развитием новых областей техники и созданием для их нужд новых материалов с определенными заданными свойствами резко возросло применение следующих высокотемпературных печей сопротивления: вакуумных и с нейтральными (инертными) газовыми средами [3].

В высокотемпературных печах сопротивления в основном применяются следующие технологические процессы:

- спекание изделий из тугоплавких и химически активных материалов;
- термическая обработка тугоплавких металлов и сплавов;

- получение монокристаллов и их термическая обработка;
- плавка и рафинирование тугоплавких металлов и сплавов.

Основные отличия конструкций высокотемпературных печей от обычных следующие:

- герметичное исполнение кожуха печи, рассчитанного на атмосферное давление (для вакуумных печей) и часто на давление, значительно превышающее атмосферное (1–5 МПа), для печей вакуумно-компрессорных, работающих с нейтральными газами;

- конструкция нагревателей основывается на применении тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама, тантала) и графита; питание нагревателей осуществляется пониженным напряжением (из-за опасности пробоя) от специальных понижающих трансформаторов с регулированием вторичного напряжения;

- кладка печи для облегчения откачки из нее газов выполняется из легко дегазируемых материалов или же роль тепловой изоляции выполняют системы металлических экранов;

- наличие вместо обычных проемов и уплотнений вакуумных затворов и вакуумных уплотнений.

Наличие откачной системы, состоящей из вакуумных насосов, трубопроводов, вентилях, затворов.

Вакуумные печи периодического действия изготавливаются серийно и индивидуально; по типу конструкций они разделяются на камерные, шахтные, колпаковые и элеваторные.

На рис. 2.24 изображена вакуумная шахтная печь сопротивления на рабочую температуру до 1800 °С с нагревателем из молибденового листа и экранной тепловой изоляцией.

Вакуумные высокотемпературные печи непрерывного действия выполняются в виде таких конструктивных типов, которые позволяют осуществлять перемещение изделий механизмами, расположенными вне рабочего пространства печи.

В наибольшей степени подходят для работы в условиях вакуума и высоких температур толкательные печи (рис. 2.25) и печи с выдвижным подом. Применяются также туннельные печи (с перемещающимися вдоль печной камеры футерованными тележками) и протяжные – для термообработки проволоки и ленты, снабженные динамическими уплотнениями.

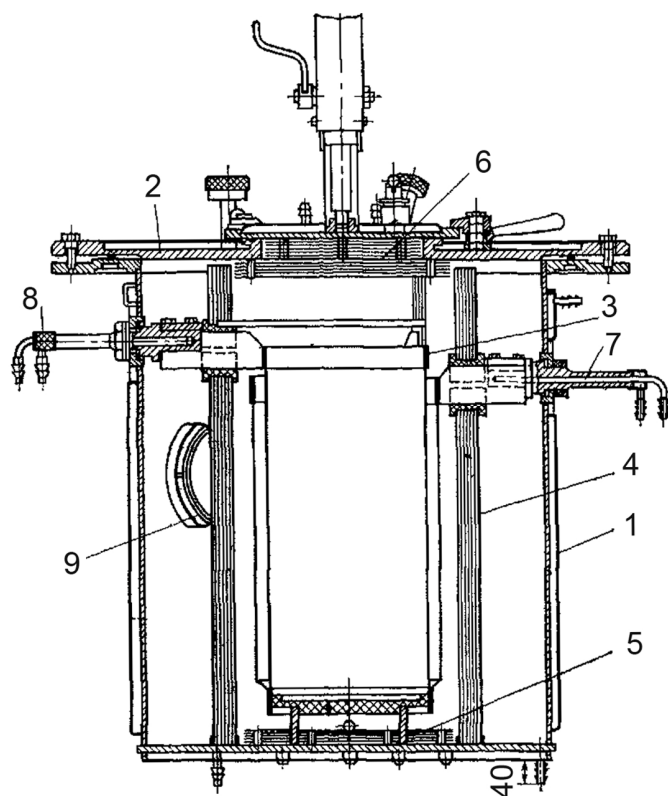


Рис. 2.24. Высокотемпературная электропечь с экранной теплоизоляцией:

1 – водоохлаждаемый кожух печи; 2 – крышка; 3 – нагреватель; 4, 5, 6 – экраны;
7, 8 – выводы нагревателя; 9 – патрубок откачки

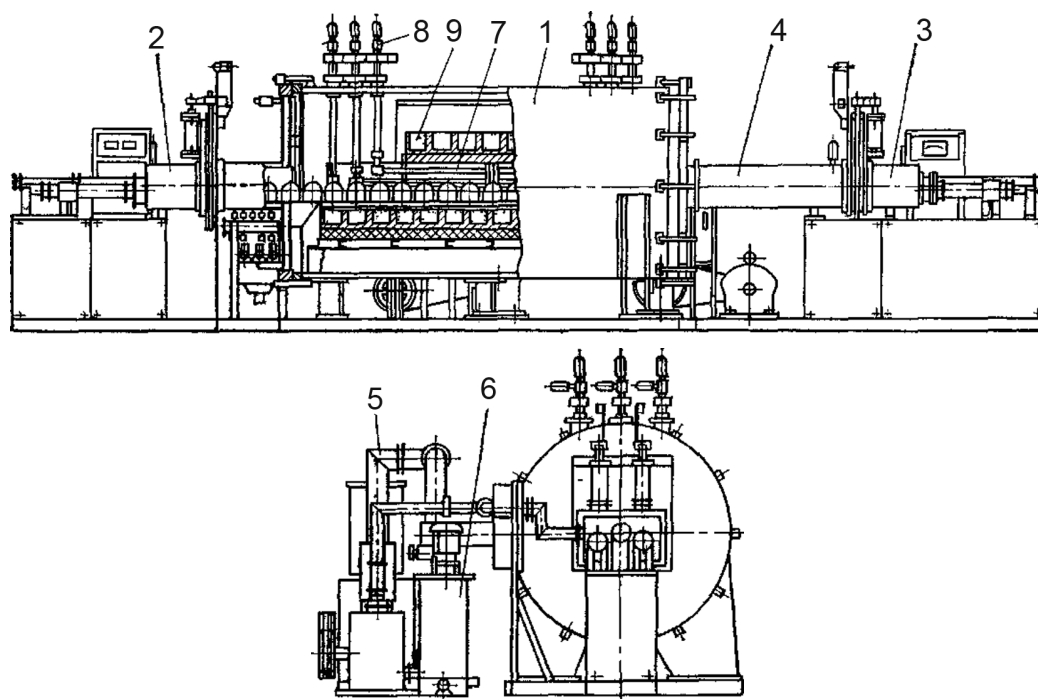


Рис. 2.25. Вакуумная толкательная электропечь:

1 – нагревательная камера; 2 – камера загрузки; 3 – камера выгрузки; 4 – камера охлаждения;
5 – вакуумная лонапорная установка гидропривода; 6 – маслонапорная установка гидропривода;
7 – графитовые нагреватели; 8 – выводы нагревателей; 9 – футеровка

2.2.4. Электрический расчет печи сопротивления

Печи сопротивления косвенного действия могут получать питание непосредственно от цеховой сети с напряжением 220, 380 и 660 В или от понижающих электропечных трансформаторов однофазного и трехфазного исполнений (серий ТПО и ТПТ) с широким диапазоном регулирования вторичного напряжения и от автотрансформаторов (серии АПТ). Эти серии разработаны с учетом требований (по значениям вторичного напряжения и диапазону регулирования) питания печей с нагревателями из сплавов сопротивления, из чистых тугоплавких металлов и из неметаллических материалов.

Электропечные трансформаторы для уменьшения потерь в токопроводах устанавливаются в непосредственной близости к печи. Подвод питания от трансформатора к нагревателям может быть осуществлен кабелем или шинами (в зависимости от конкретной компоновки). Коммутационная аппаратура, аппаратура управления и автоматического регулирования температуры монтируется в щитах управления.

Для управления электрическими печами выпускается серия однозонных щитов управления. Каждый щит предназначается для дистанционного управления включением и выключением нагревателей, контроля и регулирования температуры одной тепловой зоны печи.

Для электрического расчета необходимы следующие исходные данные [3]:

- мощность печи (или зоны для многозонных печей);
- мощность тепловых потерь через кладку печи или зоны;
- конечная температура нагрева изделий;
- характеристика нагреваемых изделий (габаритные размеры, материал);
- напряжение питающей сети;
- особые условия нагрева (наличие защитной атмосферы, вакуума, требования к материалу нагревателей и т. п.).

Для многозонной печи, если мощности зон различны, электрический расчет проводится отдельно для каждой зоны. Нагревательные элементы могут получать питание непосредственно от цеховой сети напряжением 220, 380 или 660 В или от понижающих электропечных трансформаторов, специально разработанных для электрических печей сопротивления.

Если представить себе электрическую печь, в которой тепловые потери через кладку равны нулю ($P_{\text{пот}} = 0$), а нагреватель выполнен в виде

тонкого сплошного листа, охватывающего загрузку (рис. 2.26), то, принимая равными поверхности изделия и нагревателя, можно записать уравнение лучистого теплообмена между таким идеальным нагревателем и поверхностью нагреваемого изделия в виде:

$$P_n = c_{12} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right] F_n,$$

где P_n – мощность печи, Вт;

c_{12} – приведенная излучательная способность;

$T_n, T_{изд}$ – температура нагревателя и изделия, К;

F_n – площадь поверхности нагревателя, м².

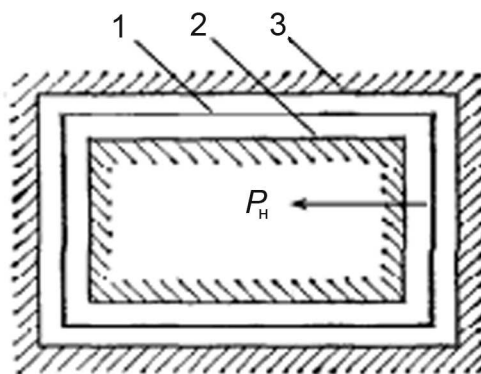


Рис. 2.26. Идеальный нагреватель:

1 – нагреватель; 2 – изделие; 3 – футеровка

Приведенная излучательная способность c_{12} составляет

$$c_{12} = \frac{c_s}{\frac{1}{\epsilon_n} + \frac{1}{\epsilon_{изд}} - 1},$$

где $c_s = 5,7 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – излучательная способность абсолютно черного тела;

$\epsilon_n, \epsilon_{изд}$ – коэффициенты теплового излучения нагревателя и изделия.

В этом уравнении температура нагревателя T_n равна

$$T_n = 100 \sqrt[4]{\frac{P_n}{c_{12} F_n} + \left(\frac{T_{изд}}{100} \right)^4},$$

а удельная поверхностная мощность w идеального нагревателя равна

$$w = \frac{P_n}{F_n} = c_{12} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.2)$$

где P_n – мощность печи, Вт;

F_n – площадь поверхности нагревателя, m^2 ;

$T_n, T_{изд}$ – температуры нагревателя и изделия, К;

Из уравнения (2.2) видно, что удельная поверхностная мощность идеального нагревателя зависит от температур нагревателя и нагреваемого изделия, а также от коэффициентов теплового излучения материалов нагревателя и изделия $\epsilon_n = c_n / c_s$, $\epsilon_{изд} = c_{изд} / c_s$. Идеальный абсолютно черный нагреватель ($\epsilon_n = 1$), излучающий на абсолютно черное изделие ($\epsilon_{изд} = 1$), имеет следующую удельную поверхностную мощность $w_{ид.с}$:

$$w_{ид.с} = 5,7 \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right].$$

Таким образом, цель электрического расчета заключается в определении размеров (сечения и длины) нагревателей (по фазам) в соответствии с требуемым для выделения необходимой мощности сопротивлением, а также в зависимости от условий теплообмена между нагревателями и нагреваемыми изделиями.

2.2.5. Автоматическое регулирование температурного режима

В печах сопротивления в подавляющем большинстве случаев применяется простейший вид регулирования температуры – двухпозиционное регулирование, при котором исполнительный элемент системы регулирования – контактор имеет лишь два крайних положения: «включено» и «выключено» [3].

Во включенном состоянии температура печи растет, так как ее мощность всегда выбирается с запасом, и соответствующая ей установившаяся температура значительно превосходит ее рабочую температуру. В выключенном состоянии температура печи снижается по экспоненциальной кривой. Для идеализированного случая, когда в системе «регулятор – печь»

отсутствует динамическое запаздывание, работа двухпозиционного регулятора показана на рис. 2.27, на котором в верхней части дана зависимость температуры печи t от времени τ , а в нижней — соответствующее изменение ее мощности P .

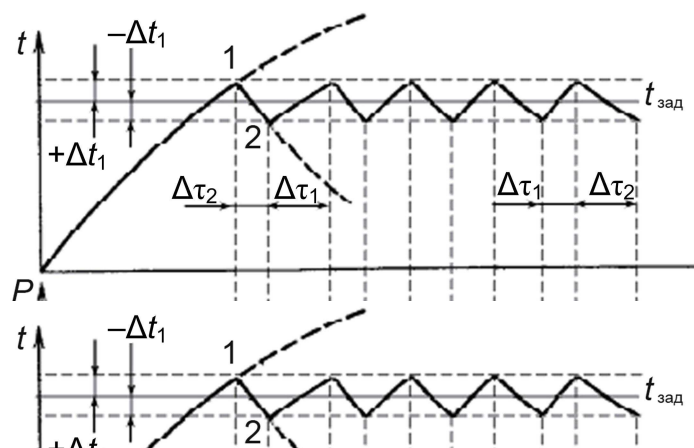


Рис. 2.27. Идеализированная схема работы двухпозиционного регулятора температуры

В «идеальном случае» при разогреве печи вначале ее мощность будет постоянной и равной номинальной, поэтому ее температура будет расти до точки 1, когда она достигнет значения $t_{\text{зад}} + \Delta t_1$, где $|\Delta t_1| - |\Delta t_2|$ — зона нечувствительности регулятора (см. рис. 2.27). В этот момент регулятор сработает, контактор отключит печь и ее мощность упадет до нуля. Вследствие этого температура печи начнет уменьшаться по кривой 1–2 до тех пор, пока не будет достигнута нижняя граница зоны нечувствительности $t_{\text{зад}} - \Delta t_1$. В этот момент произойдет новое включение печи, и ее температура вновь начнет увеличиваться.

Таким образом, процесс регулирования температуры печи по двухпозиционному принципу заключается в ее изменении по пилообразной кривой около заданного значения в пределах интервалов $+\Delta t_1$, $-\Delta t_1$, определяемых зоной нечувствительности регулятора. Средняя мощность печи зависит от соотношения интервалов времени ее включенного состояния $\Delta \tau_1$ и выключенного состояния $\Delta \tau_2$. По мере прогрева печи и загрузки кривая нагрева печи будет идти круче, а кривая остывания печи — положе, поэтому отношение периодов цикла $\Delta \tau_1$ и $\Delta \tau_2$ будет уменьшаться, а следовательно, будет падать и средняя мощность $P_{\text{ср}}$ (см. рис. 2.27). При двухпозиционном регулировании средняя мощность печи все время приводится в соответствие с мощностью, необходимой для поддержания постоянной температуры.

Зона нечувствительности современных терморегуляторов может быть сделана весьма малой и доведена до 0,1–0,2 °С. Однако действительные колебания температуры печи могут быть во много раз большими из-за динамического запаздывания в системе «регулятор – печь». Основным источником этого запаздывания является инерция датчика – термопары, особенно если она снабжена двумя защитными чехлами: керамическим и металлическим. Чем больше это запаздывание, тем больше колебания температуры нагревателя превышают зону нечувствительности регулятора.

2.3. Индукционный нагрев

2.3.1. Физические 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 [2]. 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.

Переменный магнитный поток Φ , создаваемый первичной обмоткой – индуктором, пропорционален его магнитодвижущей силе (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 и выделение соответствующей мощности P :

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

где r – активное сопротивление нагреваемого тела, Ом;

z – полное сопротивление нагреваемого тела, Ом.

Таким образом, индукционный нагрев является прямым нагревом сопротивлением, а включение нагреваемого тела в цепь тока производится за счет магнитной связи.

Индукционный нагрев обладает достоинствами прямого нагрева сопротивлением: высокая скорость нагрева, пропорциональная вводимой мощности, неограниченный уровень достигаемых температур, достаточных для

нагрева металлов, плавления металлов и неметаллов, перегрева, расплава, испарения материалов и получения плазмы.

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 изготавливаются 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 него. 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 пере-

менного тока напряженность магнитного поля в полости индуктора одинакова во всех его точках. Поток энергии $P_{q1,0}$ (квар) внутрь полости через его поверхность на единицу длины составляет

$$P_{q1,0} = 7,9 \cdot 10^{-9} (Iw_{1,0})^2 f E \frac{\pi D_B^2}{4},$$

где $(Iw_{1,0})^2$ – квадрат ампер-витков индуктора;

f – частота тока;

$\frac{\pi D_B^2}{4}$ – площадь поперечного сечения полости индуктора.

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

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

Электрический коэффициент полезного действия (КПД) η_p системы «индуктор – металлический цилиндр» определяется из соотношения полезной активной мощности $P_{1,0}$, выделяющейся в металле, и активных потерь в индукторе $P_{и1,0}$:

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

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.

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

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(P_{q1,0} + P_{эq1,0} + P_{иq1,0})^2}{P_{1,0} + P_{и1,0}}}}.$$

где $P_{q1,0}$ – реактивная мощность, выделяющаяся в металлическом цилиндре на 1 м его длины;

$P_{\text{э}q1,0}$, $P_{\text{и}q1,0}$ – потери реактивной мощности, соответственно в зазоре и индукторе при нахождении нагреваемого металлического цилиндра в полости индуктора.

Чем больше зазор между индуктором и нагреваемым цилиндром, тем больше реактивная мощность $P_{\text{э}q1,0}$ 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 Δ_z меньше потока на поверхности в e^2 раз и составляет $0,136P_0$, где P_0 – поток энергии на поверхности

В слое металла толщиной, равной глубине проникновения Δ_z , поглощается 86,4 % энергии, прошедшей через поверхность тела. Используя соотношения $\mu_a = \mu \mu_0$ и $\omega = 2\pi f$, где μ – относительная магнитная проницаемость нагреваемого металла; μ_0 – магнитная постоянная, равная $0,4 \pi \cdot 10^{-6}$ Гн/м, глубина проникновения будет составлять

$$\Delta_z = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление металла, Ом · м.

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 ρ , а при достижении точки Кюри значение μ 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, вызванных наведенными токами, приводит к возникновению механической силы, действующей на каждый элемент нагреваемого тела, называемой *электродинамической силой*.

Сжимающее усилие $P_{\text{сж}}$ определяется следующим образом:

$$P_{\text{сж}} = 6,28 \cdot 10^{-7} (I_{w_{1,0}})^2 \mu (1 - e^{-2z/\Delta_z}),$$

где z – координата.

Для немагнитного или любого расплавленного металла, когда $\mu = 1$, сжимающее усилие будет равно

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

Сжимающее усилие при прочих условиях обратно пропорционально глубине проникновения Δ_3 и прямо пропорционально магнитной проницаемости μ . Максимальное значение сжимающих усилий находится в точках, наиболее удаленных от индуктора, с уменьшением частоты сжимающее усилие возрастает.

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

Кроме этого, в индукционных нагревательных установках имеют место следующие эффекты: *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.

2.3.2. Классификация индукционных установок

На рис. 2.28 представлена классификация индукционных установок по назначению.

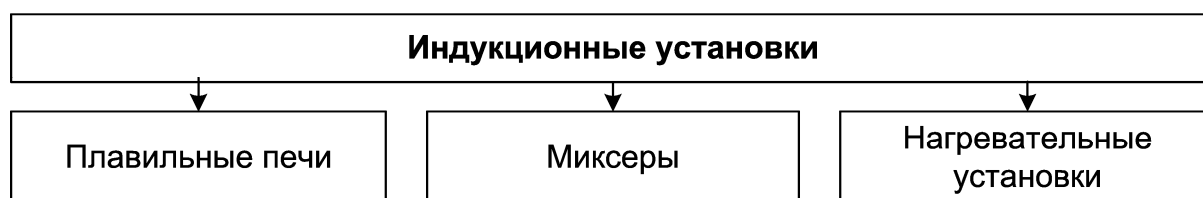


Рис. 2.28. Классификация индукционных установок по назначению

Под индукционными электропечами подразумевают индукционные установки, предназначенные для нагрева металлов и сплавов выше температуры их расплавления и перегрева металла до температуры разливки. В эту группу входят электропечи для плавки черных металлов, цветных металлов и сплавов. Миксеры служат как для подогрева жидкого металла до температуры разливки, так и для выравнивания его состава и поддержания его температуры. Индукционный нагрев применяют для поверхностной закалки стальных изделий, сквозного нагрева под пластическую деформацию (ковку, штамповку, прессование и т. д.), термической обработки

(отжиг, отпуск, нормализация), сварки, наплавки, пайки металлов. Косвенный индукционный нагрев применяют для обогрева технологического оборудования (трубопроводы, емкости и т. д.), нагрева жидких сред, сушки покрытий, материалов (например, древесины).

Важнейший параметр установок индукционного нагрева – частота. Для каждого процесса (поверхностная закалка, сквозной нагрев) существует оптимальный диапазон частот, обеспечивающий наилучшие технологические и экономические показатели. Классификация индукционных установок по частоте тока источника питания представлена на рис. 2.29.

Индукционные установки можно классифицировать по конструктивному исполнению (рис. 2.30), по режиму работы (рис. 2.31) и по принципу действия (рис. 2.32).

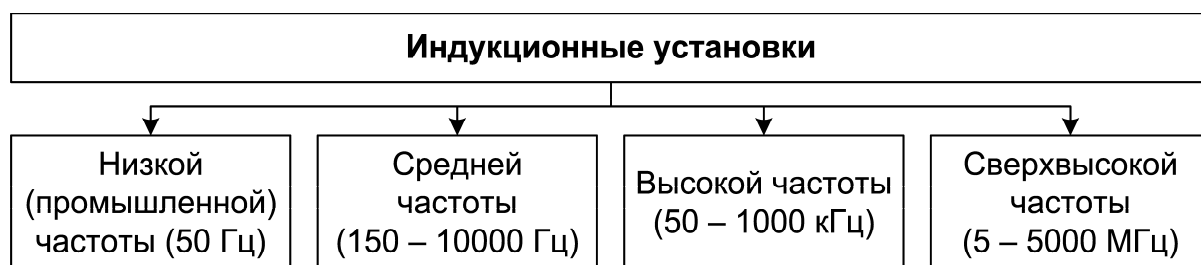


Рис. 2.29. Классификация индукционных установок по частоте тока источника питания

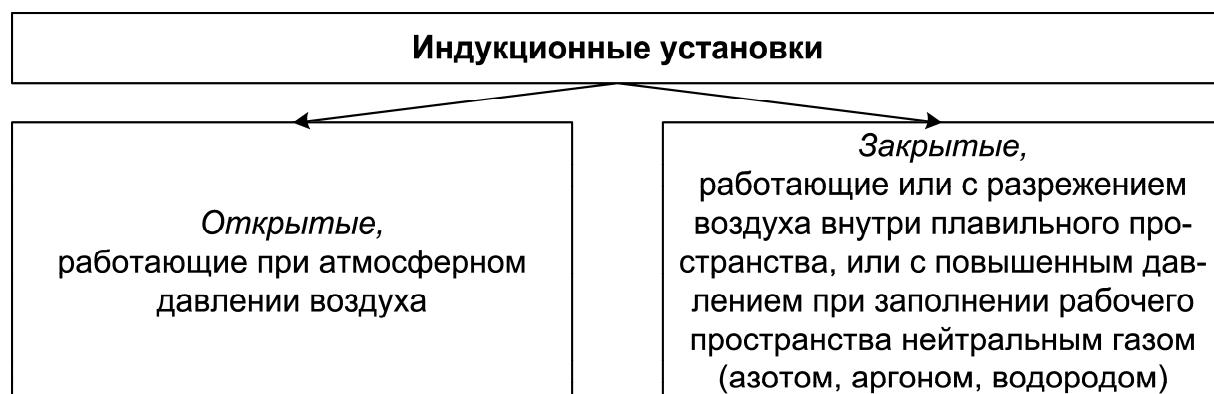


Рис. 2.30. Классификация индукционных установок по конструкции



Рис. 2.31. Классификация индукционных установок по режиму работы

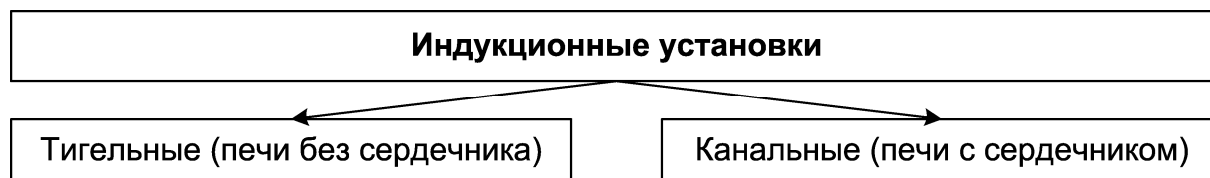


Рис. 2.32. Классификация индукционных установок по принципу действия

Преимущества индукционного нагрева:

- передача электрической энергии непосредственно в нагреваемое тело позволяет осуществить прямой нагрев проводниковых материалов. При этом повышается скорость нагрева по сравнению с установками косвенного действия, в которых изделие нагревается только с поверхности;
- передача электрической энергии непосредственно в нагреваемое тело не требует контактных устройств. Это удобно в условиях автоматизированного поточного производства, при использовании вакуумных и защитных средств;
- благодаря явлению поверхностного эффекта максимальная мощность выделяется в поверхностном слое нагреваемого изделия. Поэтому индукционный нагрев при закалке обеспечивает быстрый нагрев поверхностного слоя изделия. Это позволяет получить высокую твердость поверхности детали при относительно вязкой середине. Процесс поверхностной индукционной закалки быстрее и экономичнее других методов поверхностного упрочнения изделия;
- индукционный нагрев в большинстве случаев позволяет повысить производительность и улучшить условия труда.

2.3.3. Индукционные канальные электропечи

Работа индукционной канальной печи основана на использовании явления электромагнитной индукции. По устройству канальная печь напоминает конструкцию силового трансформатора: она имеет стальной расслоенный магнитопровод, первичную обмотку – индуктор с числом витков w_1 и вторичную обмотку в виде замкнутого канала, заполненного жидким металлом, число витков вторичной обмотки $w_2 = 1$ (рис. 2.33).

В индукционной канальной печи переменный магнитный поток создается первичной обмоткой, в которой течет ток I_1 и которую подключают к сети переменного тока напряжением U_1 промышленной частоты 50 Гц. Магнитный поток Φ пронизывает замкнутый контур, представляющий собой кольцо из жидкого металла, и индуцирует в этом кольце ЭДС. Электрический ток I_2 проходит по жидкому металлу, разогревая его. Для усиления

ния магнитного потока, создаваемого катушкой, применяют замкнутый магнитопровод из трансформаторной стали.

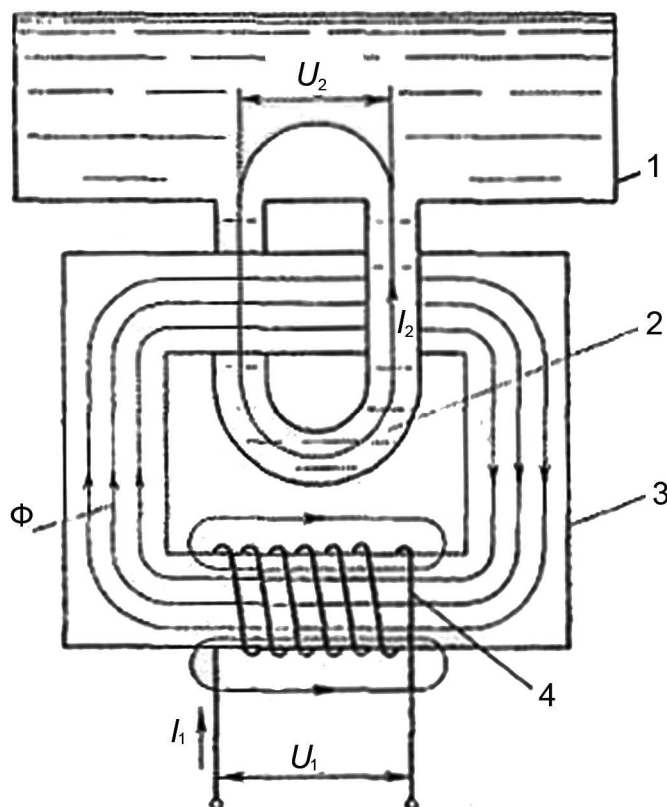


Рис. 2.33. Принципиальная схема индукционной каналной печи:

1 – ванна печи; 2 – канал; 3 – магнитопровод; 4 – первичная обмотка

Кольцо жидкого металла окружено со всех сторон огнеупорным материалом, заключенным в стальной корпус. Пространство в огнеупорном материале, которое заполняется жидким металлом, имеет форму изогнутого канала. Наличие такого канала является характерной особенностью печей этого типа. Рабочее пространство печи соединено с каналом двумя отверстиями с напряжением U_2 , поэтому при его заполнении жидким металлом образуется замкнутый контур. Если в печи нет металла или его недостаточно для образования замкнутого контура, то она работать не может. Это объясняется тем, что при подаче напряжения на первичную катушку в канале, являющемся вторичной обмоткой, создаются вихревое электрическое поле и соответствующая ЭДС. Однако из-за того, что в канале нет металла, его электрическое сопротивление велико и ток в нем не протекает.

Температура металла в канале на 100–150 °С больше температуры металла в ванне печи, поэтому горячий металл из канала поднимается в ванну, а из нее в канал поступает более холодный металл. Жидкий металл в печи

движется и вследствие воздействия магнитного поля. Электродинамические силы стремятся сжать и вытолкнуть металл из канала. Чем больше индуцированный ток, тем бóльшая электродинамическая сила воздействует на металл. В канальных печах всегда должно находиться определенное количество жидкого металла. Это количество определяют исходя из того, чтобы масса столба жидкого металла над каналом превышала электродинамическую силу.

Количество тепловой энергии, разогревающей металл, определяется по закону Джоуля – Ленца. Индукционная канальная печь отличается от трансформатора следующими характерными чертами:

- совмещением вторичной обмотки с нагрузкой;
- наличием во вторичной обмотке только одного витка (канала);
- высотой канала, небольшой по сравнению с высотой индуктора;
- влиянием поверхностного эффекта, так как глубина проникновения тока соизмерима с толщиной канала;

• низким коэффициентом мощности печи $\cos \varphi_n$ из-за наличия большого потока рассеяния Φ_s , вызванного необходимостью футеровки печи. Практически Φ_s составляет приблизительно 20–25 % основного потока Φ_{12} .

На рис. 2.34 представлены схема замещения и векторная диаграмма индукционной канальной печи [3]. Векторная диаграмма индукционной канальной печи подобна векторной диаграмме приведенного трансформатора, находящегося в режиме короткого замыкания, когда вторичная обмотка является нагрузкой.

Реактивная мощность канальной печи в несколько раз больше ее активной мощности из-за большого зазора между индуктором и каналом печи. Естественный коэффициент мощности канальной печи составляет 0,3–0,7.

Для улучшения $\cos \varphi$ параллельно индуктору печи присоединяют конденсаторную батарею, реактивная мощность которой должна быть равна реактивной мощности печи. Компенсация естественного коэффициента мощности печи необходима для того, чтобы не нагружать сеть (или понижающий силовой трансформатор) реактивным током, значения которого в несколько раз превосходят активный ток.

Главными достоинствами канальных печей перед другими печами, предназначенными для этих же целей, являются:

- высокий КПД η , в результате этого в канальных печах плавка металлов происходит с низким расходом электроэнергии;
- малый угар металла, так как здесь нет большого перегрева металла на поверхности ванны печи и сильного окисления металла;

- наличие электродинамического перемешивания металла в каналах печи, что позволяет получать однородный по химическому составу металл без применения каких-либо механических перемешивателей.

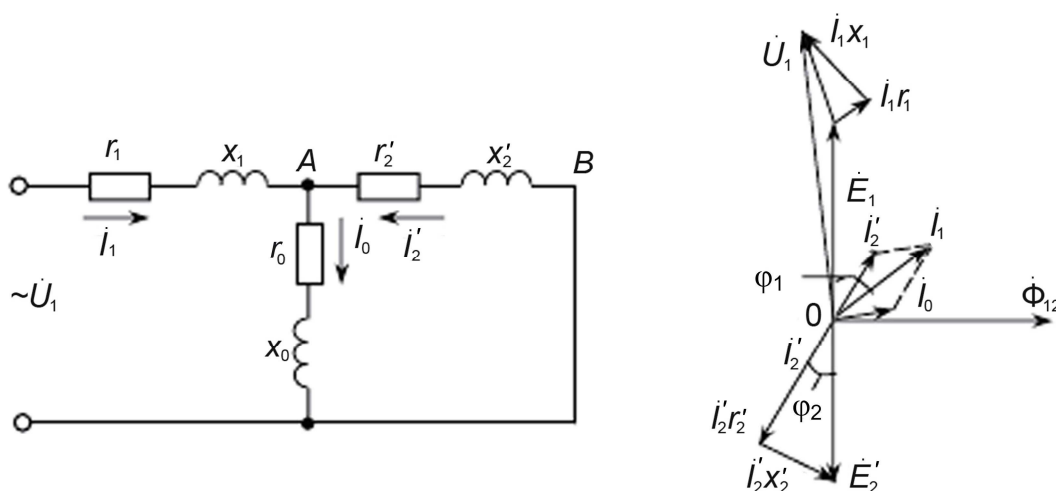


Рис. 2.34. Схема замещения и векторная диаграмма индукционной канальной печи:

r_1, x_1 – активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора;
 r_2', x_2' – активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора;
 r_0, x_0 – активное и индуктивное сопротивление магнитопровода; I_1, I_2' – токи первичной и вторичной обмоток; I_0 – результирующий ток (ток холостого хода); E_1, E_2' – ЭДС, наводимые в первичной и вторичной обмотках; Φ_{12} – результирующий магнитный поток

Но при выборе типа печи необходимо считаться и с недостатками канальных печей, главные из которых:

- необходимость непрерывного, круглосуточного режима работы. Иногда печь оставляют во включенном состоянии для поддержания температуры расплавленного металла в несливаемом остатке в ванне и канале печи во избежание «замораживания» печи;

- необходимость выплавки металлов и сплавов с однородным составом. В противном случае пришлось бы производить промывные плавки, что связано с излишними затратами электроэнергии и времени;

- малая стойкость огнеупорной футеровки канальной части для плавки высокотемпературных металлов и сплавов, так как температура металла в канале печи может превышать температуру в ванне печи на 50–200 °С.

Параметры и конструкции индукционных канальных печей зависят от рода переплавляемых металлов и их назначения. Получили распространение три основные конструктивные разновидности канальных печей: шахтная, барабанная и двухкамерная (рис. 2.35).

В печах *шахтного* типа плавильная камера имеет форму вертикального цилиндра, в донной части которого присоединена плавильная единица (рис. 2.35, *а*). При разливке металла печь наклоняют с помощью гидравлического устройства. Достоинством конструкции печей такого типа является простота выполнения, ремонта и замены футеровки ванны печи.

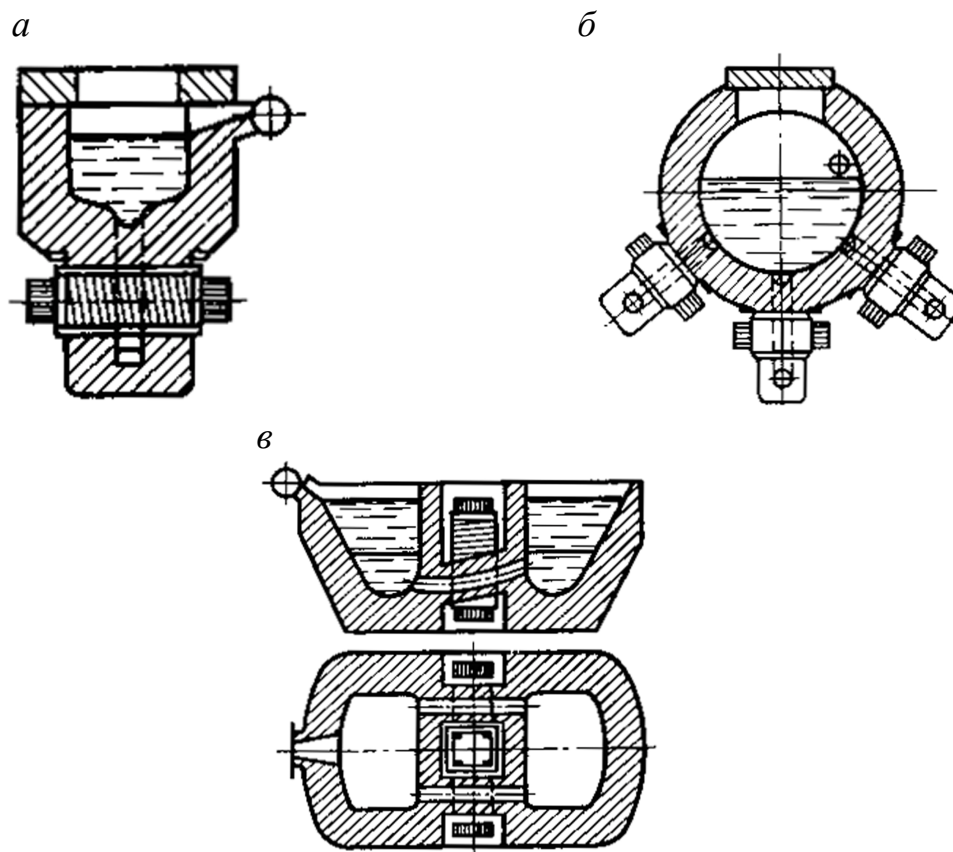


Рис. 2.35. Основные типы конструкций индукционных канальных печей:
а – шахтная; *б* – барабанная; *в* – двухкамерная

В печах *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. 2.35, *б*).

Двухкамерные канальные печи выполнены с наклонными или горизонтально расположенными каналами, соединяющими между собой две ванны. При этом одна из ванн используется как плавильная, а другая – как раздаточная (рис. 2.35, *в*).

На рис. 2.36 представлена двухфазная индукционная канальная печь шахтного типа с наклонными каналами для плавки чугуна. Индукционные канальные печи имеют следующие основные узлы: кожух, футеровку ванны печи,

индукционные единицы (магнитопровод, индуктор, канал), токоподводы, механизм наклона печи или механизм слива металла из печи, систему охлаждения.

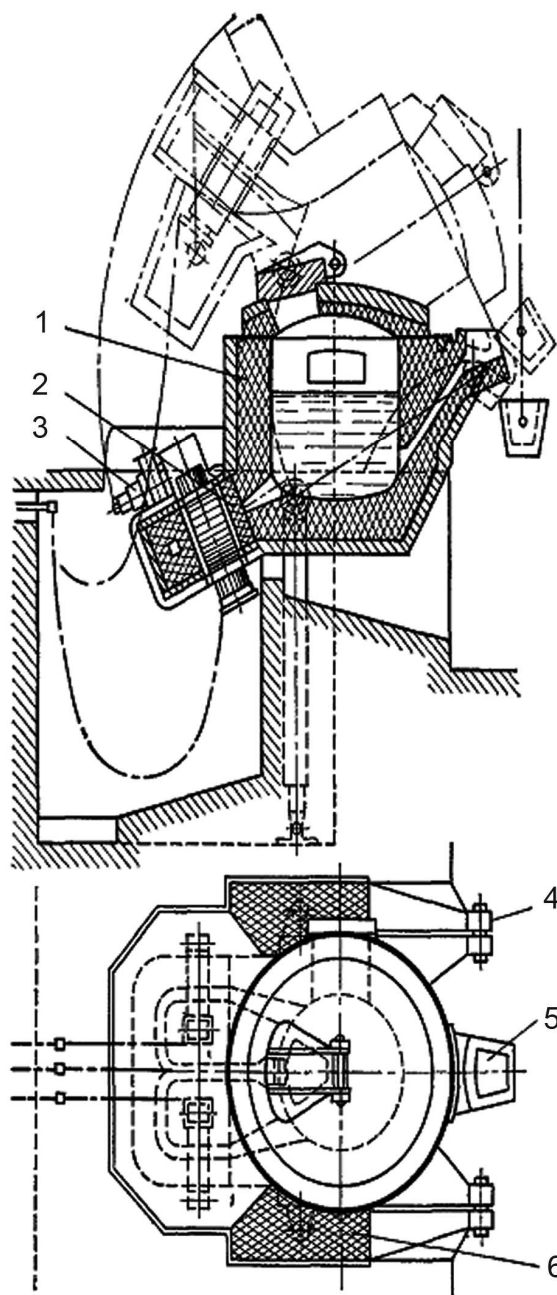


Рис. 2.36. Двухфазная индукционная канальная печь шахтного типа с наклонными каналами для плавки чугуна:

1 – ванна; 2 – индукционная единица; 3 – вентилятор; 4 – ось наклона;
5 – сливной носок; 6 – рабочая площадка

В зависимости от назначения печи кожух бывает различной формы: цилиндрической (с горизонтальной или вертикальной осью), прямоугольной и овальной (в зависимости от емкости металла, мощности, количества индукционных единиц, технологических особенностей выплавки металла или сплава).

Футеровка ванны печи выкладывается из огнеупорных кирпичей (магнезита, шамота) или набивается из специально приготовленного порошка соответствующего химического и гранулентного состава в зависимости от расплавляемого металла или сплава, предназначенного для плавки в печи.

В последнее время почти все конструкции индукционных канальных печей выполняются с отъемными индукционными единицами мощностью от 200 до 1000 кВ · А, присоединяемыми к кожуху ванны печи с помощью болтов и шпилек. Индукционная единица представляет собой электропечной трансформатор с футерованным каналом для размещения расплавленного металла. Отъемная индукционная единица состоит из следующих элементов: кожуха, магнитопровода, футеровки, индуктора (рис. 2.37).

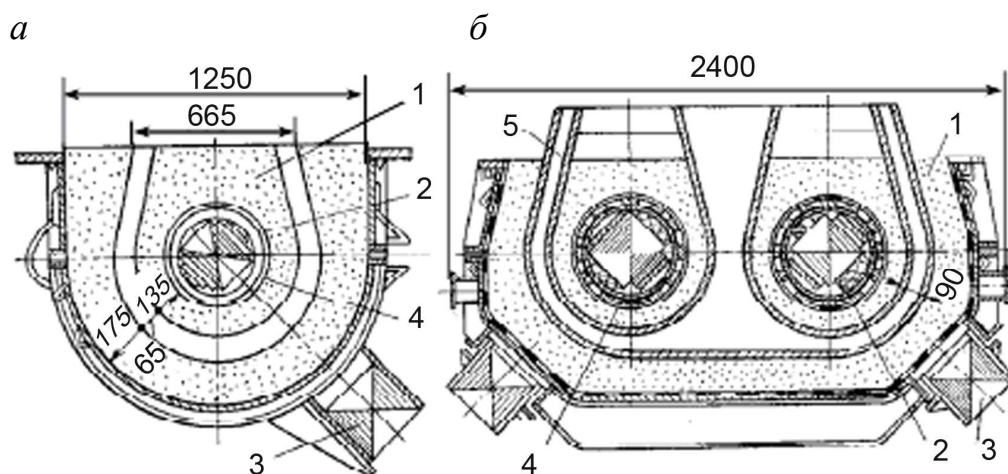


Рис. 2.37. Конструкции индукционных единиц печей для плавки чугуна: *а* – мощностью 560 кВт; *б* – мощностью 1000 кВт; 1 – футеровка; 2 – водоохлаждаемый кессон; 3 – магнитопровод; 4 – индуктор; 5 – шаблон канала

Для изготовления индуктора применяют либо обмоточные провода прямоугольного сечения (как для силовых трансформаторов), либо медные равностенные трубки для обеспечения водяного охлаждения круглого или прямоугольного сечения, либо же трубки специального профиля с утолщенной стороной, обращенной к каналу с металлом.

Индукционные единицы мощностью до 300 кВ · А можно питать от индивидуальных однофазных электропечных автотрансформаторов, подключаемых к заводской подстанции на напряжение 380 В с ручной или автоматической регулировкой вторичного напряжения от 0 до 500 В в зависимости от требуемой производительности печи. Регулирование может быть осуществлено для поддержания температуры и параметров электрического режима на определенном уровне.

Индукционные единицы мощностью свыше $300 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ питаются от высоковольтных электропечных трансформаторов с регулированием вторичного напряжения под нагрузкой путем переключения витков вторичной или первичной обмотки без выключения печи. Мощность таких трансформаторов лежит в пределах от 400 до 1600 $\text{кВ} \cdot \text{А}$. Первичная обмотка трансформаторов подключается к сети высокого напряжения (6 или 10 кВ).

Для подключения электропечных трансформаторов к высоковольтным сетям служат комплектные распределительные устройства (КРУ).

Индукционная единица подключается ко вторичной стороне (стороне низкого напряжения (НН)) электропечного трансформатора с помощью контакторов, имеющих дугогасящие устройства. Иногда включаются два контактора с параллельно работающими силовыми контактами в главной цепи.

Для компенсации реактивной мощности печи служат конденсаторы, подключаемые параллельно к индуктору.

Для наклона печей периодического действия при сливе металла применяют механизмы наклона. Печи малого объема и небольшой мощности обслуживаются тельферами с системой блоков или лебедками с ручным приводом. Печи с большим объемом металла имеют механизмы с гидравлическим или электромеханическим приводом.

Схема питания однофазной индукционной единицы приведена на рис. 2.38.

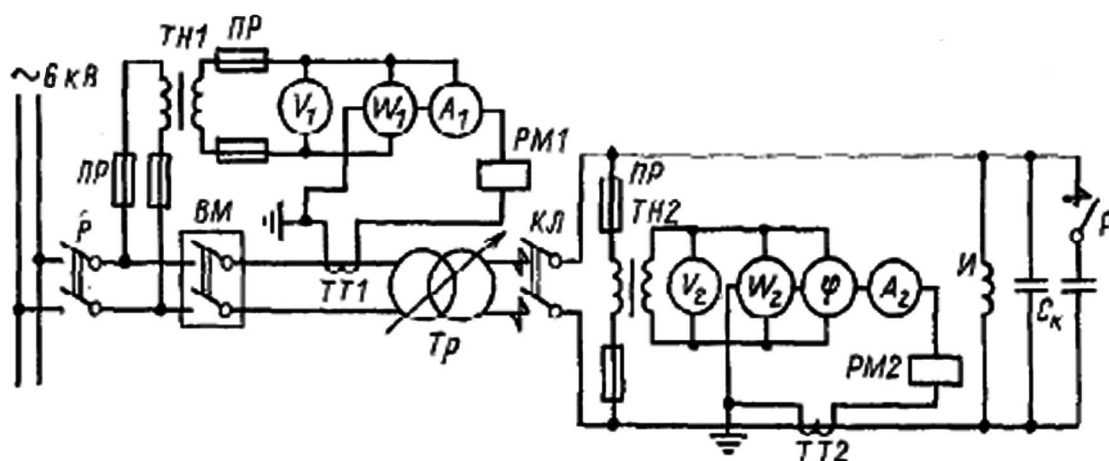


Рис. 2.38. Принципиальная схема питания индукционной единицы канальной печи:

ВМ – выключатель мощности; КЛ – контактор; Тр – трансформатор;
 Ск – конденсаторная батарея; И – индуктор; ТН1, ТН2 – трансформаторы напряжения;
 ТТ1, ТТ2 – трансформаторы тока; Р – разъединитель; ПР – предохранители;
 РМ1, РМ2 – реле максимального тока

Реле максимального тока РМ1 и РМ2 (см. рис. 2.38) служат для контроля и отключения печи при перегрузках и коротких замыканиях.

2.3.4. Индукционные тигельные печи

Индукционные тигельные печи получили распространение в основном для выплавки высококачественных сталей и чугунов специальных марок, т. е. сплавов на основе железа, так как при плавке черных металлов тигельные печи имеют более высокий КПД, чем при плавке цветных металлов. По частоте источника питания тигельные печи подразделяются на три вида: печи низкой (промышленной) частоты (50–60 Гц), печи средней (повышенной) частоты (150–10000 Гц) и печи высокой частоты (50–500 кГц).

По конструкции печи выполняются открытыми (для плавки металлов и сплавов в воздушной атмосфере) и герметически закрытыми (для плавки в вакууме или в среде нейтральных газов (вакуумно-компрессионные печи)).

Индукционные тигельные печи обладают следующими преимуществами:

- легкое достижение высоких температур, так как энергия выделяется непосредственно в нагреваемом металле;
- отсутствие соприкосновения с топливом или электродами, что позволяет получать металл и сплавы, чистые по химическому составу;
- наличие интенсивного перемешивания расплавленного металла под воздействием электродинамических сил, что способствует получению однородного химического состава без применения механических перемешивающих устройств;
- малая окисляемость и небольшой угар компонентов состава из-за наличия более холодного шлака на поверхности зеркала расплавленного металла;
- возможность проведения плавки в вакууме и нейтральной среде для получения сплавов высокого качества;
- отсутствие перегрева футеровки печи, что повышает срок ее службы;
- возможность работы в периодическом режиме, что уменьшает простой печи на холостом ходу и дает возможность смены химического состава выплавляемых сплавов без проведения промывных плавов и без оставления несливаемого остатка металла;
- более простая по сравнению с канальными печами конструкция огнеупорного тигля.

Недостатками индукционных тигельных печей являются:

- относительно низкая температура шлаков;
- вспучивание поверхности расплавленного металла (мениск) из-за больших электродинамических сил, возникающих в расплаве;
- необходимость для печей малой и средней емкости источников питания высокой и средней частоты.

На рис. 2.39 представлена индукционная тигельная печь с наружным магнитопроводом. Она состоит из следующих основных элементов: индуктора 1, подключаемого к источнику переменного тока; нагреваемого металла 2, огнеупорного тигля 3 для размещения расплавляемого металла; внешнего магнитопровода 4, применяемого в некоторых печах средней частоты и в печах большой емкости промышленной частоты для экранировки кожуха печи (для уменьшения потерь энергии), устройства для слива металла, токоподводов.

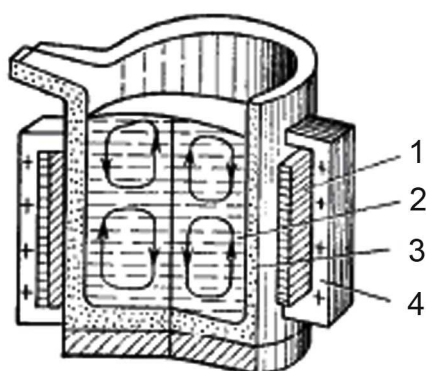


Рис. 2.39. Индукционная тигельная печь с наружным магнитопроводом

Принцип работы печи основан на поглощении электромагнитной энергии материалом загрузки, размещенной в тигле печи [3].

При прохождении тока в кусках шихты происходит разогрев их до оплавления и образования жидкой ванны. При получении жидкой ванны наибольшая плотность тока имеет место на периферии металлической загрузки в слое, прилегающем к стенкам тигля, а наименьшая – в центральной части загрузки. Почти вся поглощаемая энергия выделяется в слое металла, толщина которого равна глубине проникновения тока $\Delta_{э,гор}$. Выделение энергии зависит от частоты тока, геометрических соотношений диаметра тигля и диаметра индуктора, размеров и электрофизических свойств шихтового материала.

Ориентировочно минимальную частоту тока определяют в зависимости от диаметра тигля, с учетом удельного электрического сопротивления горячего металла, доведенного до расплавления:

$$f_{\min} = 25 \cdot 10^6 \rho_{гор} / d_0^2,$$

где $f_{\min}$ – минимальная частота тока, Гц;

$\rho_{гор}$ – удельное электрическое сопротивление горячего металла, Ом · м;

d_0 – диаметр тигля, м.

При больших размерах тигля (это печи емкостью более 2–3 т, предназначенные для плавки черных металлов) требуется низкая частота тока (50 Гц). Средняя и высокая частоты используются в печах средней и малой емкости для выплавки стали, чугуна, меди, алюминия.

Тигли могут быть электропроводящими (из электропроводящих материалов – стали, графита) или неэлектропроводящими (из керамических материалов). Электропроводящие тигли применяют для улучшения КПД печи при нагреве металлов и сплавов с малым удельным электрическим сопротивлением. Толщина тиглей из стали лежит в пределах 20–40 мм, графитовых – 30–70 мм. Графитовые тигли применяют для плавки меди и алюминия, стальные – для плавки магния. Электропроводящий тигель закрепляется с помощью уголков и полос, приваренных к тиглю и кожуху печи в нескольких местах по окружности тигля и соединяемых между собой болтами с изолирующими втулками и шайбами. Между тиглем и индуктором предусматривают огнеупорный и теплоизоляционный слои из шамотной и диатомитовой крупки и асбестового картона.

Магнитопроводы применяют для экранировки магнитных полей с целью уменьшения электрических потерь в кожухе или каркасе печи. Магнитопроводы представляют собой пакеты прямоугольной формы, набранные из листов электротехнической стали с толщиной листов 0,5 или 0,35 мм и скрепленных между собой болтами с изоляционными втулками.

Кожух (корпус) печи предназначен для крепления индуктора и тигля. Для небольших печей (емкостью 0,1–0,5 т) применяют кожух из неметаллических материалов (дерева, асбестоцементных плит, брусков текстолита и т. п.), а также из немагнитной стали и цветного металла (бронзы, латуни).

Индукционные тигельные печи емкостью более 2 т и мощностью свыше 1000 кВт питаются от трехфазных понижающих трансформаторов с регулированием вторичного напряжения под нагрузкой, подключаемых к высоковольтной сети промышленной частоты. Схема питания печи промышленной частоты приведена на рис. 2.40.

Печи выполняют однофазными, и для обеспечения равномерной нагрузки фаз сети в цепь вторичного напряжения подключают симметрирующее устройство, состоящее из реактора L с регулированием индуктивности методом изменения воздушного зазора в магнитной цепи и конденсаторной батареи C_c , подключаемых с индуктором по схеме треугольника. Сило-

вые трансформаторы мощностью 1000, 2500 и 6300 кВ · А имеют 9–23 ступени вторичного напряжения с автоматическим регулированием мощности на желаемом уровне.

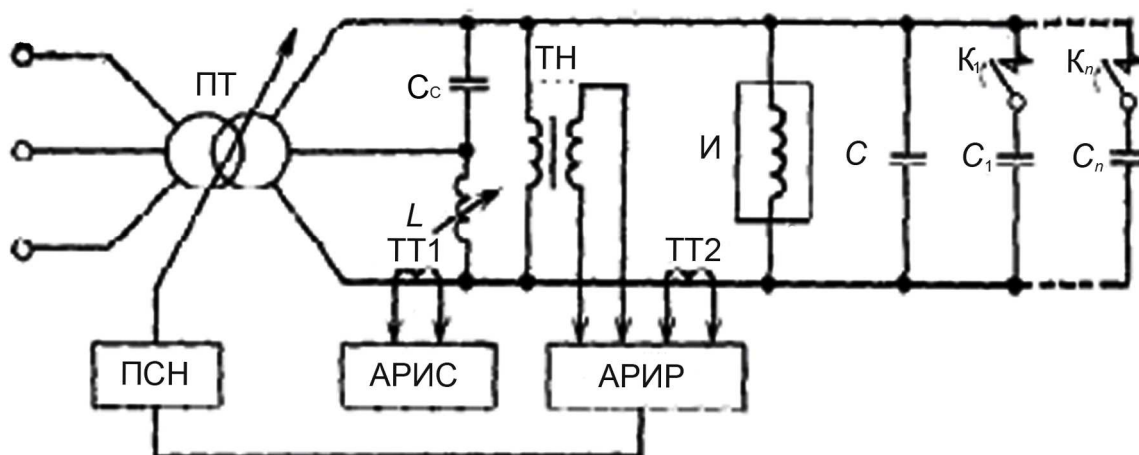


Рис. 2.40. Схема питания индукционной тигельной печи от силового трансформатора ПТ с симметрирующим устройством и регуляторами режима печи:

ПСН – переключатель ступеней напряжения; 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 емкостью батареи C_1 – C_n ; ТТ1, ТТ2 – трансформаторы тока

Печи меньшей емкости и мощности питаются от однофазных трансформаторов мощностью 400–2500 кВ · А; при потребляемой мощности свыше 1000 кВ · А также устанавливают симметрирующие устройства, но на стороне высокого напряжения (ВН) силового трансформатора.

При меньшей мощности печи и питании от высоковольтной сети 6 или 10 кВ можно отказаться от симметрирующего устройства, если колебания напряжения при включении и выключении печи будут находиться в допустимых пределах. Печи снабжаются регуляторами электрического режима АРИР, которые в заданных пределах обеспечивают поддержание напряжения, мощности P и $\cos \varphi$ путем изменения числа ступеней напряжения силового трансформатора и подключения дополнительных секций конденсаторной батареи. При этом регуляторы и измерительная аппаратура данных печей размещены в шкафах управления.

Печи малой и средней емкости питаются от тиристорных преобразователей частоты. Преобразователи представляют собой равномерную нагрузку трехфазной сети, так что симметрирующие устройства не требуются.

2.3.5. Индукционный нагрев под термообработку

Индукционные нагревательные установки применяют главным образом для нагрева мерных заготовок под горячую ковку в кузнечных цехах машиностроительных заводов. Они имеют следующие преимущества:

- большая скорость нагрева, а значит, и производительность;
- возможность обеспечения поточного характера производства;
- возможность автоматизации и механизации процесса и регулирования электрического режима установки;
- малый угар металла и меньший брак из-за заштамповки окалины;
- малая производственная площадь, занимаемая непосредственно нагревателем;
- высокая культура производства (малое загрязнение воздушной среды, малое выделение теплоты, облегчение труда рабочих, чистота рабочего места);
- высокое качество термообработки и повышение стойкости штампов из-за меньшего количества окалины.

Индукционный сквозной нагрев применяется для различных технологических операций горячей деформации (ковки, штамповки, прокатки, гибки, прессовки и т. п.), а также с целью сварки (поперечной и продольной сварки труб).

Для индукционных установок сквозного нагрева используют ток частотой от 50 до 10000 Гц от промышленных сетей и преобразователей частоты. Источник питания выбирают в зависимости от размеров заготовок, металла и требуемой производительности установки.

Путем подбора частоты для определенного диаметра детали можно добиться прогрева только поверхностного слоя требуемой глубины либо более глубокого – глубинного прогрева.

Для нагревательных индукционных установок выбор частоты должен производиться таким образом, чтобы обеспечить глубинный тип нагрева, так как при этом будет меньше перегрев поверхности заготовок и выше КПД.

Нагрев считают глубинным, если эквивалентная глубина проникновения $\Delta_{\text{э.гор}}$ составляет не менее 0,25–0,45 радиуса нагреваемой заготовки r_0 , т. е. относительный радиус r_0 равен $\sqrt{2} / \Delta_{\text{э.гор}}$ и должен быть более 3–5.

Необходимую частоту для сквозного нагрева цилиндрических стальных заготовок можно определить ориентировочно по выражению

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

где f – необходимая частота, Гц;

d_0 – диаметр нагреваемых заготовок, см.

Индукционной поверхностной закалке подвергают трущиеся поверхности стальных деталей для уменьшения их износа при эксплуатации. Поверхностную закалку проводят для увеличения твердости в поверхностном слое.

Индукционная поверхностная закалка заключается в интенсивном нагреве поверхностного слоя детали из стали или чугуна током высокой или средней частоты до температур выше точки магнитных превращений и в быстром охлаждении нагретого слоя в водяной, масляной или (для некоторых марок сталей) воздушной среде.

Преимуществом индукционной закалки является ускорение процесса термообработки в десятки раз по сравнению с печным сквозным нагревом (в газовых печах, печах сопротивления, соляных ваннах и др.) благодаря большой концентрации энергии именно в слое определенной глубины и длины, подлежащем упрочнению.

По конструкции закалочного устройства и способу подачи охлаждающей жидкости различают в основном два способа индукционной поверхностной закалки – одновременную и непрерывно-последовательную.

Одновременная закалка заключается в одновременном нагреве всей закаливаемой поверхности детали или отдельного ее участка до закалочной температуры и затем – одновременном охлаждении нагретой поверхности охлаждающей жидкостью. Обычно охлаждающую воду подают через отверстия в активном витке (рис. 2.41, *а, б*) индуктора после выдержки времени нагрева, в течение которой происходит разогрев поверхности детали. При использовании масла в качестве охлаждающей среды деталь после нагрева сбрасывают в масляный бак.

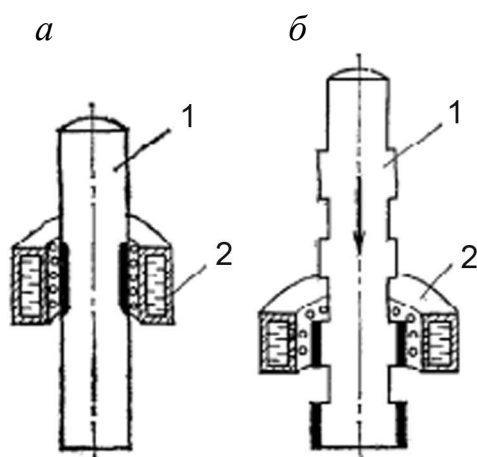


Рис. 2.41. Виды поверхностной закалки:

а – одновременная; *б* – поочередная; 1 – деталь; 2 – индуктор

Непрерывно-последовательная закалка заключается в последовательном нагреве и охлаждении поверхности детали при поступательном ее движении относительно индуктора (или индуктора относительно детали) при необходимости закалки поверхности большой площади и сравнительно небольшой мощности источника питания.

2.4. Установки для нагрева полупроводников и диэлектриков

2.4.1. 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 (быстрота, равномерность и высокая производительность) [2]. 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 заряженные – 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 относительно друг друга на расстояние l . Такой диэлектрик, имеющий ориентированные в одном направлении диполи, называют *поляризованным*. Произведение заряда частицы на смещение l именуют *электрическим моментом диполя* $m = ql$, который связан с напряженностью электрического поля E соотношением $m = \alpha E$, где α – 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. 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 (например, ионов натрия (Na^+) и хлора (Cl^-) в поваренной соли).

Период собственных колебаний решетки составляет 10^{-12} – 10^{-13} с. Время ионной упругой поляризации того же порядка, что и в электронной поляризации.

Ориентационная поляризация имеет место в диэлектриках с молекулами, представляющими собой жесткие диполи, независимо от наличия внешнего электрического поля. Данная поляризация проявляется в частичном повороте и упорядочении диполей под влиянием внешнего электрического поля. Это поляризация упругого смещения, возникающая в твердых или жидких диэлектриках, полярные молекулы которых связаны друг с другом так, что под действием электрического поля они 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. Следует отметить, что 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 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° . Если поляризация сопряжена с потерями и несколько запаздывает, ток опережает напряженность на угол, меньший 90° . Разница $\delta = 90 - \theta$ (рис. 2.42) характеризует потери в диэлектрике и называется *углом диэлектрических потерь*.

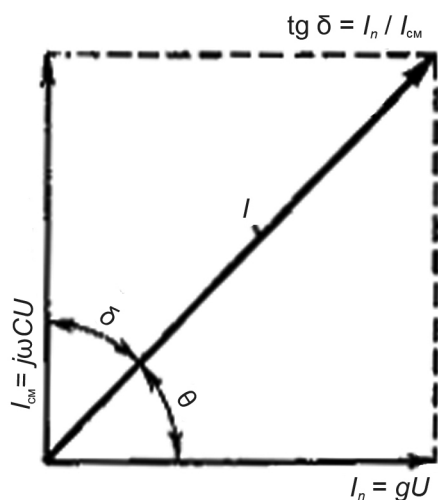


Рис. 2.42. Векторная диаграмма токов в диэлектрике в переменном электрическом поле

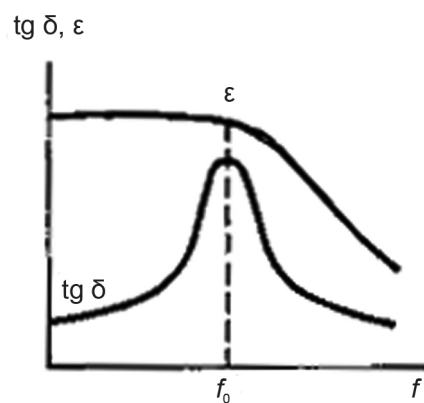


Рис. 2.43. Зависимость ϵ и $\text{tg} \delta$ от частоты изменения электрического поля

Происходящие в диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, процессы определяются диэлектрической проницаемостью $\epsilon = \epsilon' - g\epsilon''$. Вещественная часть комплекса ϵ' характеризует отношение емкостей конденсатора до и после введения в него диэлектрика — это относи-

тельная диэлектрическая проницаемость вещества. Мнимая часть $\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta$ характеризует поглощение энергии поля диэлектриком и называется коэффициентом потерь диэлектрика.

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

$$I = I_{\text{п}} + I_{\text{см}} = (g + j\omega C) \cdot U,$$

где ω – угловая скорость, рад/с;
 C – емкость конденсатора, Ф;
 U – приложенное напряжение, В;
 g – величина заряда, Кл.

Отношение тока проводимости к току смещения $I_{\text{п}} / I_{\text{см}} = \operatorname{tg} \delta$ также определяет коэффициент потерь в диэлектрике.

Показатели диэлектрической проницаемости ε и $\operatorname{tg} \delta$ зависят от рода и физического состояния вещества (влажности, температуры), а также от частоты поля f . Их зависимость от частоты поля показана на рис. 2.43. Величина $\operatorname{tg} \delta$ имеет максимум при так называемой релаксационной частоте f_0 , характерной для каждого материала.

Выделяющуюся в диэлектрике мощность P можно получить из векторной диаграммы

$$P = UI \cos \varphi \approx UI \operatorname{tg} \delta = \omega CU^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (2.3)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая скорость, рад/с;
 C – емкость плоского конденсатора, Ф.

Имея в виду, что объем диэлектрика равен Sd и напряженность электрического поля составляет $E = U / d$, мощность P_0 , выделяющаяся в единице объема диэлектрика, будет составлять

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

Емкость плоского конденсатора определяется по формуле

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S / d,$$

где S – площадь пластин конденсатора, м²;
 d – расстояние между ними, м;
 $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ · Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума.

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

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

где C_p – удельная теплоемкость материала, Дж/(г · К);

γ – плотность материала, г/см³;

$\Delta T / \Delta \tau$ – скорость нагрева материала, К/с;

η_t – термический КПД процесса, учитывающий потери теплоты в окружающую среду.

При затратах теплоты только на испарение удельная мощность $P_{\text{исп}}$ составляет

$$P_{\text{исп}} = (L / \eta_t) \cdot (\Delta M / \Delta \tau), \quad (2.4)$$

где L – скрытая теплота парообразования при данной температуре нагрева, Дж/г;

$\Delta M / \Delta \tau$ – скорость испарения, Г/(см³ · с).

Анализ уравнений (2.3) – (2.4) позволяет сделать вывод, что мощность, выделяющаяся в диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, определяется только его электрическими характеристиками ϵ и $\text{tg } \delta$ 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.

2.4.2. Установки диэлектрического нагрева

Установки диэлектрического нагрева подразделяют на два вида: собственно установки диэлектрического нагрева, работающие на высокой частоте (ВЧ-установки – частота от 66 кГц до 100 МГц), и установки сверхвысокочастотного нагрева (СВЧ-нагрев – частота 1000 МГц и выше). Последние применяются при нагреве диэлектриков со сравнительно малым коэффициентом потерь (например, нагреве пищевых продуктов) [2].

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 Δ , измеряемая в сантиметрах, определяет расстояние, на котором напряженность электрического поля ослабевает в ε раз относительно ее значения на поверхности:

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

Большинство материалов, нагреваемых в поле конденсаторов, неоднородно по своей структуре. Для материала слоистой структуры, в котором каждый слой отличается от другого значением диэлектрической проницаемости и толщиной, при направлении поля вдоль слоев среднее значение диэлектрической проницаемости будет составлять

$$\varepsilon_{\text{ср}} = (\varepsilon_1 d_1 + \varepsilon_2 d_2) / (d_1 + d_2), \quad (2.5)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – значения диэлектрической проницаемости;
 d_1, d_2 – толщина слоя.

При направлении поля поперек слоев среднее значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{ср}}$ будет следующим:

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 (d_1 + d_2) / (\varepsilon_1 d_1 + \varepsilon_2 d_2). \quad (2.6)$$

При увеличении числа слоев в числителе и знаменателе уравнений (2.5) и (2.6) 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 $U_{\text{м}}$, равно напряжению, подводимому к рабочему конденсатору $U_{\text{рк}}$. Напряженность электрического поля в материале для плоского конденсатора составляет $E_{\text{м}} = U_{\text{рк}} / d_{\text{м}}$. Материал в этом случае нагревается равномерно, поскольку удельная мощность выделяется по всему его объему одинаково.

Если однородный материал помещен в конденсатор коаксиального типа, то также $U_{\text{м}} = U_{\text{рк}}$, а напряженность электрического поля в данной точке материала $E_{\text{м}}$ составит

$$E_{\text{м}} = U_{\text{рк}} / \left[R \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right],$$

где R – расстояние от центра до данной точки;
 R_1, R_2 – расстояние от центра до внутренней и внешней пластин конденсатора.

Если материал занимает не весь объем конденсатора, то для плоского конденсатора напряженность электрического поля в данной точке материи будет

$$E_M = U / (d + \varepsilon d_B); E_B = \varepsilon E_M,$$

для коаксиального конденсатора она будет следующей:

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

где ε – диэлектрическая проницаемость данного слоя или ее среднее значение для ряда слоев нагреваемого материала;

E_B – напряженность электрического поля в воздушном зазоре.

Допустимая напряженность поля в воздушном зазоре определяется значением пробивной напряженности $E_{пр.в}$. При ее достижении происходит электрический пробой. Напряженность пробоя воздуха ниже, чем пробивная напряженность $E_{пр}$ 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 , определяют рабочую частоту тока при нагреве f_H и сушке f_c материала соответственно:

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

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

где γ – коэффициент, зависящий от рода и вида нагревательного материала;

C – емкость конденсатора;

L – индуктивность колебательного контура технологического узла;

ΔT – разность температур материала до и после нагрева, сушки;

η_t – коэффициент полезного действия технологического контура;

τ – время технологической термообработки.

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

Конструкция технологического узла определяется в основном родом и видом нагреваемого материала.

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

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

Средневолновые применяются для нагрева материалов с большим фактором потерь $\operatorname{ctg} \delta$, 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 (0,01–1,0 Вт/см³) 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 составляет 0,4–0,55. Мощность генератора составляет несколько десятков киловатт, объем одновременно нагреваемого материала небольшой. Удельная мощность p_0 составляет 1–100 Вт/см³. 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 $\operatorname{ctg} \delta$. Объем рабочей камеры невелик (0,1–3 кВт/см³), время нагрева – секунды, данные установки могут работать с воздушным зазором.

Особенностью установок *сверхвысокой частоты* является соизмеримость геометрических размеров колебательных систем с длиной волны используемых колебаний. В этих установках напряженность электрического поля меньше, чем в установках метрового диапазона, что снижает опасность электрического пробоя. В данных установках осуществляется нагрев материалов с низким значением фактора потерь, в частности продуктов, слоистых материалов, медицинских препаратов и др.

2.5. Электродуговые и руднотермические печи

2.5.1. Основы теории и свойства дугового разряда

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 [2].

Плазмой принято называть вещество, находящееся в четвертом состоянии (в дополнение к твердому, жидкому и газообразному), характеризующееся наличием нейтральных молекул и атомов и в большей степени заряженных частиц – электронов и ионов, проводящее электрический ток и подчиняющееся законам магнитной газодинамики. Превращение газа в плазму проходит в 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 затрат энергии извне на преодоление кулоновских сил притяжения между электроном и положительным ионом, называемой энергией (работой) ионизации $A_{\text{и}}$, которую определяют как произведение заряда электрона на потенциал ионизации $U_{\text{и}}$, отсюда $A_{\text{и}} = e_0 U_{\text{и}}$. Потенциал ионизации атома равен разности потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы приобрести кинетическую энергию, достаточную для ионизации атома при соударении с ними. Численно величины $A_{\text{и}}$ и $U_{\text{и}}$ равны, если $A_{\text{и}}$ выражать в электрон-вольтах.

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 лития 75,6 эВ (двукратная ионизация), а для трехкратной ионизации, например, для бериллия – 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 следующий вид:

$$e_0 E = m dv / d\tau = ma,$$

где E – напряженность электрического поля, В/м;

m – масса частицы, г;

v – скорость частицы, м/с;

a – ускорение, м/с².

При начальной скорости, равной нулю, скорость в момент времени τ составляет $v_\tau = (e_0/m) \cdot E\tau$. Пройденный путь l за время τ будет определяться формулой

$$l_\tau = 0,5v\tau = (0,5e_0 / m) E\tau. \quad (2.7)$$

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 (2.7) значение $E = U / l$, где U – разность потенциалов на пути l , получим скорость электрона v_e :

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

где m_e – масса электрона.

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

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

где M_a – атомная единица массы ($M_a = 1822m_e$).

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 только в том случае, если энергия фотона превышает работу ионизации. Расчет показывает, что для ионизации атома азота ($U_{\text{и}} = 12,4 \text{ В}$) максимальная длина волны (красная граница фотоэффекта) λ_{max} составляет 0,085 мкм, для ионизации цезия – 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 наложение высокочастотного напряжения должно приводить к ионизации пространства. Так это и происходит на самом деле. Приложение высокочастотного напряжения приводит к значительной ионизации – появлению высокочастотной короны даже при низких напряжениях.

Одновременно с процессом ионизации происходит *деионизация* – рекомбинация положительных и отрицательных частиц и диффузия их за пределы ионизированного объема газа. Совместное протекание этих процессов и определяет установившееся значение тока дуги.

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.

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.

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. 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.

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/см²), низким катодным падением потенциала (менее 20 В), высокой температу-

рой газовой среды в межэлектродном пространстве, достигающей в зависимости от условий существования дуги значений порядка $(3-5)10^3$ К и выше.

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.

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.

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

$$j_{тэ} = A_1 T^2 e^{-B_1/T},$$

где $j_{тэ}$ – плотность тока термоэлектронной эмиссии, А/см²;

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^{-7} А/см², а при 3500 К она возрастает более чем на девять порядков (примерно до 220 А/см²).

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

$$j_{аэ} = A_2 T^2 e^{-B_2/T},$$

где A_2, B_2 – постоянные для данного материала.

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 будет составлять

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

где E – напряженность электрического поля у поверхности электрода, В/см;
 $A = 120,4 \text{ А} / (\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$ 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 оксид тория (ThO_2), оксид лантана (LaO_2), а для углерода – цезий, литий, калий, натрий, кальций.

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. 2.44. 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 в пределах 2–20 В. Полное падение напряжения между электродами U_d будет составлять

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

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

Зависимость между напряжением дуги и ее током называют *вольт-амперной характеристикой* дуги. При малых токах вольтамперная характеристика имеет падающий характер, т. е. падение напряжения на дуге U_d с увеличением тока I_d уменьшается (сопротивление дуги уменьшается бы-

стрее, чем увеличивается ток). Такая характеристика может быть выражена уравнением Айртона [3]:

$$U_{\text{д}} = \alpha + \beta l + \frac{\gamma + \delta l}{I_{\text{д}}}, \quad (2.8)$$

где α , β , γ и δ – постоянные, зависящие от материала электродов, состава газа и условий охлаждения дуги;

l – длина дуги, мм;

β – градиент потенциала в столбе дуги;

βl – падение напряжения в столбе дуги, пропорциональное его длине, В.

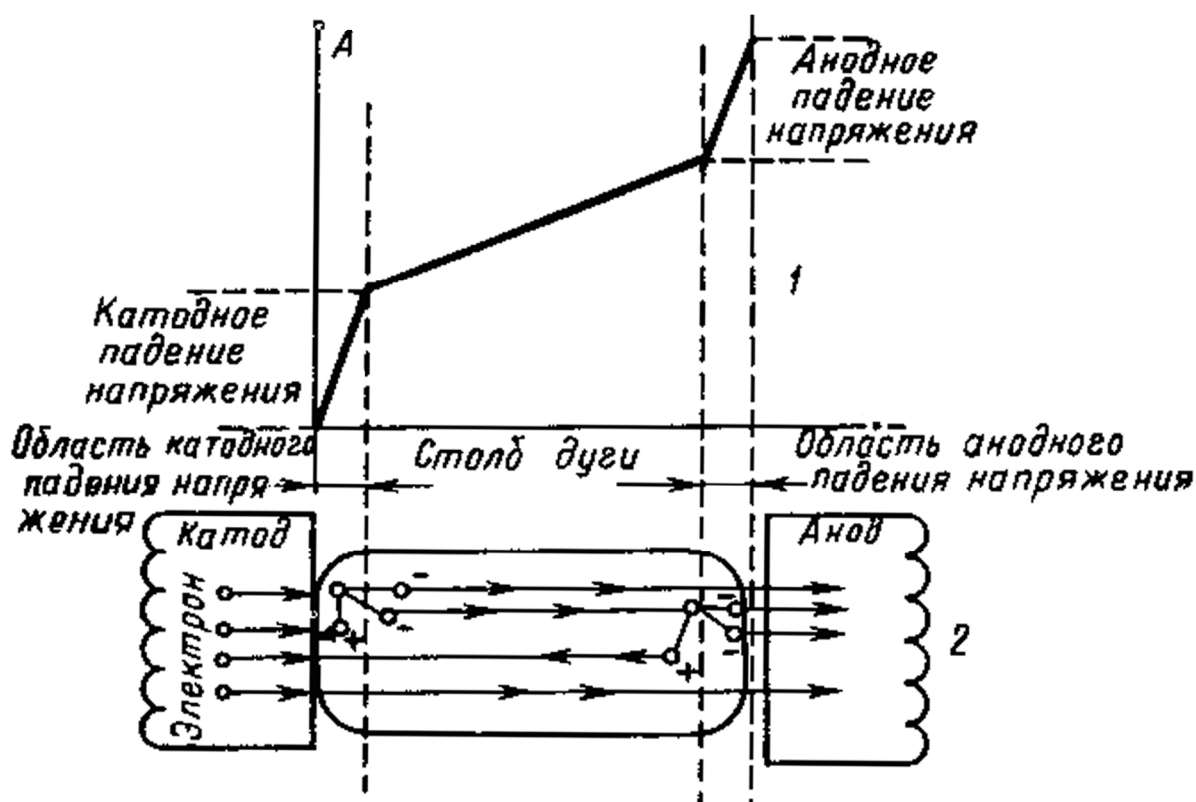


Рис. 2.44. Распределение потенциала

и носителей электричества вдоль канала столба дуги:

1 – распределение потенциала; 2 – распределение носителей электричества

При больших токах напряжение на дуге не зависит от тока и третий член выражения (2.8) становится исчезающе малым, т. е. выражение может быть заменено на

$$U = \alpha + \beta l. \quad (2.9)$$

Для интенсивно охлаждаемых дуг (плазменные дуги), а также для дуг, горящих при низких давлениях, вольт-амперная характеристика имеет слегка возрастающий характер.

Из (2.8) и (2.9) следует, что дуга может гореть устойчиво от источника постоянного напряжения, только если в цепь последовательно с ней включено некоторое добавочное сопротивление R (рис. 2.45, а).

Точка устойчивого горения дуги определяется в этом случае пересечением вольт-амперной характеристики AA с линией $U_{\text{ист, х}} - I_d R$ (точка A_1 на рис. 2.45, б). Из рис. 2.45 следует, что существуют три возможности регулирования режима дуги:

1) путем перехода на другую вольт-амперную характеристику дуги, например при увеличении длины дуги рабочая точка перейдет с характеристики AA на характеристику BB , при этом точка устойчивого горения перейдет из A_1 в B_1 , а ток уменьшится от I_{A1} до I_{B1} . При этом при укорочении дуги ее характеристика наоборот пойдет ниже, и ток дуги увеличится;

2) путем изменения напряжения источника питания, например при уменьшении напряжения $U_{\text{ист, х}}$ до $U'_{\text{ист, х}}$ точка A_1 перейдет в A_2 и ток уменьшится до I_{A2} ;

3) путем изменения сопротивления R ; в этом случае линия $U_{\text{ист, х}} - I_d R'$ начнет поворачиваться вокруг точки C , точка A_1 перейдет в A_3 , ток уменьшится до I_{A3} .

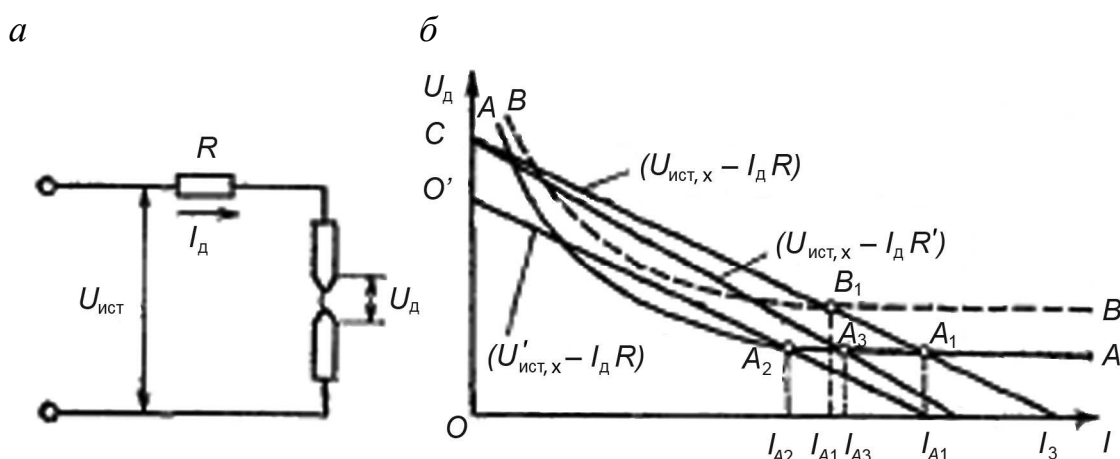


Рис. 2.45. Способы регулирования режима дуги:

а – схема цепи дуги с активным балластным сопротивлением; б – способы регулирования тока дуги путем изменения ее длины, напряжения источника питания и балластного сопротивления

Первые два способа широко используются для регулирования режима дуговых установок; третий способ практически не применяют ввиду его

неэкономичности. Нужно отметить, что до начала горения дуги промежуток между электродами не ионизирован и ток через него не протекает. Для первичной ионизации промежутка нужно подать на него напряжение пробоя, в десятки или даже сотни раз превышающее напряжение горения дуги. Вместо этого обычно для зажигания дуги производят сближение электродов до их контакта, а затем их разводят. При контакте электродов через них протекает ток короткого замыкания, который их разогревает, и поэтому при их разведении в ионизированном нагретыми электродами промежутке возникает дуга.

При питании дуги переменным током условия ее горения существенно меняются, так как дуга дважды в течение периода гаснет и вновь зажигается. Поэтому при переменном токе статическая характеристика дуги не имеет смысла, можно говорить лишь о связи действующих значений напряжения и тока для времени, намного превышающего длительность одного периода.

На форму кривых тока и напряжения дуги сильно влияют параметры ее электрического контура и, в частности, его индуктивность. При отсутствии индуктивности (чисто активное сопротивление контура), как уже отмечалось, ток дуги I_d дважды прерывается за полупериод (рис. 2.46, а), так как дуга может гореть лишь в тот отрезок времени, когда напряжение источника $U_{ист}$ больше напряжения, требуемого для поддержания горения дуги U_d . При наличии в цепи индуктивности между током и напряжением источника появляется сдвиг фаз, т. е. при переходе тока через нуль напряжение источника не будет равным нулю, и при достаточной индуктивности может произойти повторное зажигание дуги (рис. 2.46, б) за счет накопленной в индуктивности электромагнитной энергии, препятствующей резкому уменьшению тока.

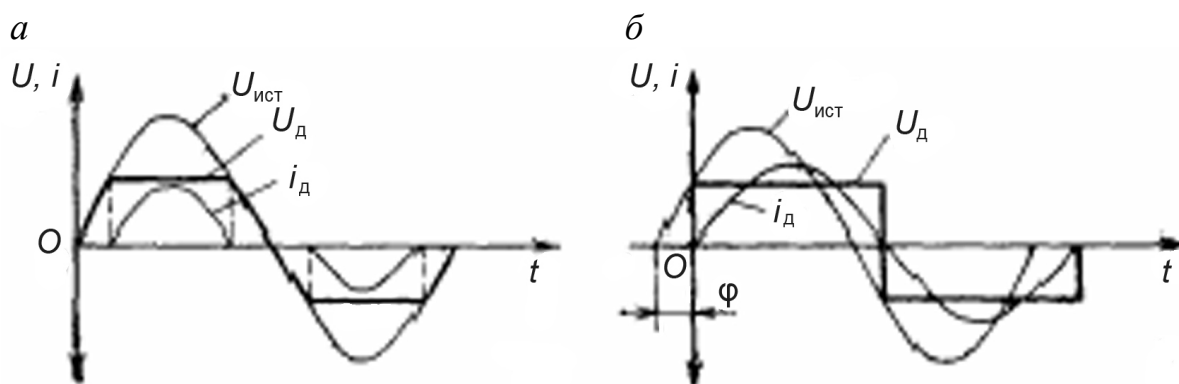


Рис. 2.46. Осциллограммы дуг переменного тока:
а – при отсутствии индуктивности; б – при наличии индуктивности

В результате имеет место непрерывное протекание тока дуги в течение всего полупериода. Такое непрерывное горение дуги более устойчиво; расчеты показывают, что оно имеет место при коэффициенте мощности установки, равном или меньшем 0,85.

Изучение протекающих в приэлектродных областях и на электродах процессов и их закономерностей применительно к электротехнологическим 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.

Если дуга горит при атмосферном давлении, то дуга имеет поперечный размер, ее столб резко отчерчен от окружающего пространства. На катоде и аноде имеются катодные и анодные пятна, на которые опирается дуга. Эти пятна имеют высокую температуру, плотность тока на катоде достигает нескольких тысяч A/cm^2 , а на аноде – нескольких сотен A/cm^2 .

Плотность тока в электродных пятнах зависит и от материала электрода. Например, на вольфрамовом и угольном электродах плотность тока в катодном пятне j_k равна $(3-5)10^3 \text{ A}/\text{cm}^2$, в анодных пятнах для тугоплавких электродов она равна $(1-6)10^2 \text{ A}/\text{cm}^2$. Для легкоплавких металлических катодов j_k составляет $10^4 - 10^7 \text{ A}/\text{cm}^2$, для легкоплавких металлических анодов – $10^3 - 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$.

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

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

вольфрама, молибдена, тантала и др.), используя их способность 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 называются *установками с расходуемым электродом*;

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

На рис. 2.47 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, исключаяющих присутствие кислорода.

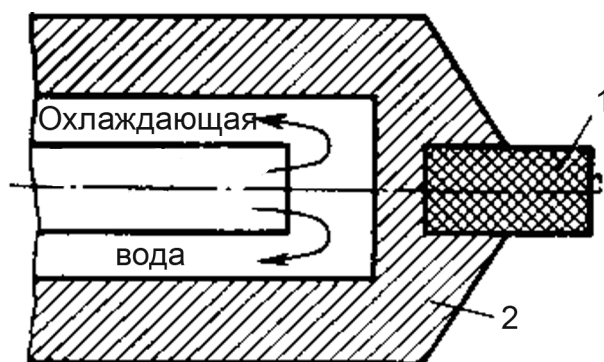


Рис. 2.47. Конструкция катодного узла плазмотрона

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

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. В этом случае применяется термохимический катод – 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.

Термохимический катод не может работать без взаимодействия с окружающей средой.

На рис. 2.48 показан термохимический катод дуговой установки для нагрева газов. В массивную водоохлаждаемую втулку 1 запрессовывается активная вставка из циркония или гафния 2, так как охлаждение ее возможно лишь методом контактного теплообмена.

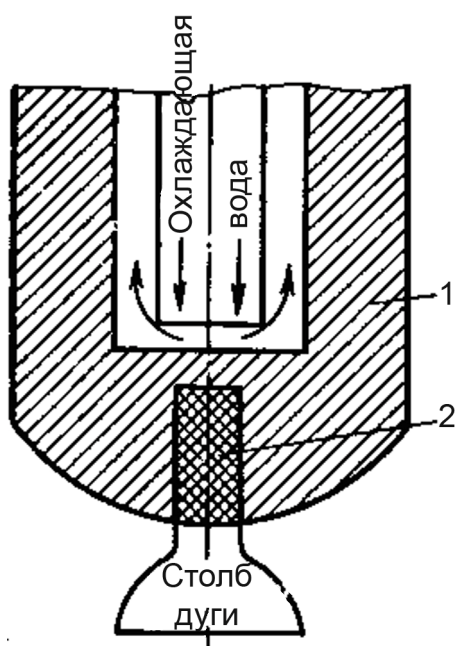


Рис. 2.48. Термохимический катод в разрезе

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. В таком случае, например, допустимая плотность тока на цирконии составляет 50–60 А/мм².

2.5.2. Электродуговые печи, их классификация

Электродуговые печи применяются в металлургической, химической, машиностроительной и ряде других отраслей промышленности. Они могут быть классифицированы следующим образом (рис. 2.49).



Рис. 2.49. Классификация электродуговых печей

Опишем более подробно некоторые из приведенных на рис. 2.49 электрических печей.

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. 2.50) 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 появления тока в цепи и затем разводятся, что приводит к возникновению электрической дуги 4. Вследствие поглощения выделяемой дугой энергии происходит нагрев и расплавление металла. После расплавления металла печь наклоняется механизмом наклона и из нее сливается расплав. Регулирование мощности печи производится с помощью источника питания за счет изменения тока дуги, а также ее длины при сближении и удалении электродов.

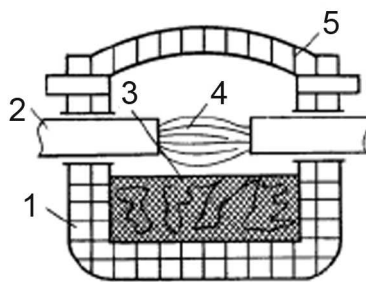


Рис. 2.50. Схема дуговой печи косвенного действия

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.

Дуговая сталеплавильная печь (ДСП) прямого действия. В печах прямого действия дуги горят между концами электродов и нагреваемым металлом (рис. 2.51). Основное назначение дуговой печи прямого действия – выплавка стали в слитки для последующего передела в прокатных цехах, а также для фасонного литья на машиностроительных заводах; получение металлургического сырья, химических продуктов.

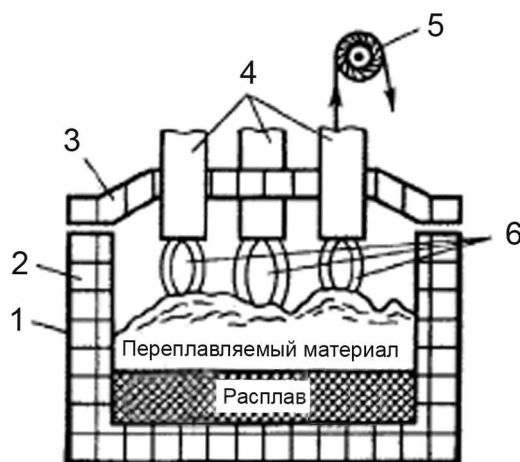


Рис. 2.51. Схема дуговой сталеплавильной печи

Дуговая сталеплавильная печь состоит из стального кожуха, имеющего цилиндрическую, расширяющуюся или ступенчатую форму 1 (см. рис. 2.51). 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 расплавляемого 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. Механизмы 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 на рис. 2.52 показана печь ДСП-200 емкостью 200 т.

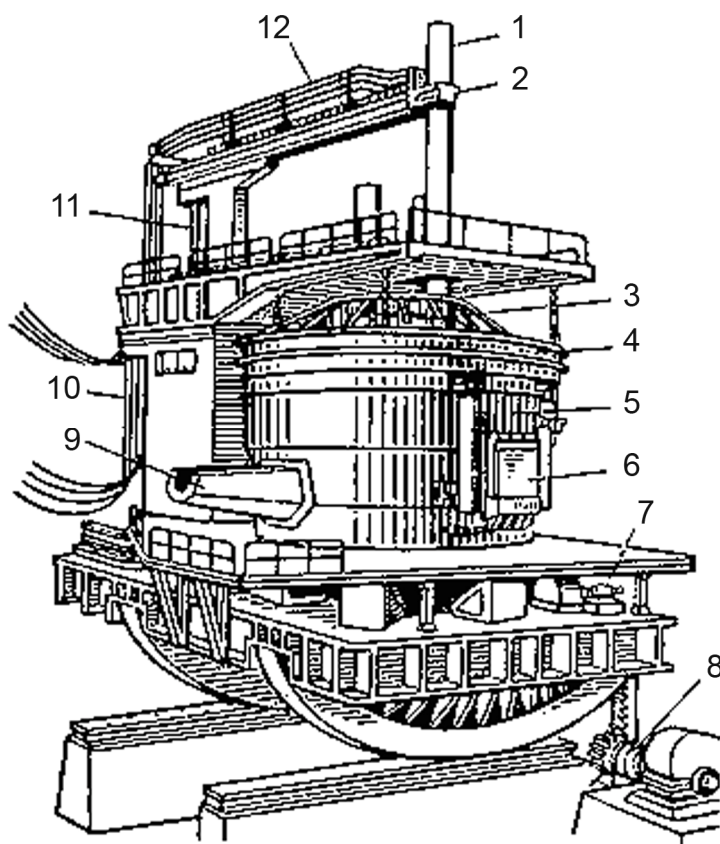


Рис. 2.52. Дуговая сталеплавильная печь ДСП-200:

- 1 – графитированный электрод диаметром 710 мм; 2 – электрододержатель; 3 – свод;
- 4 – водоохлаждаемое сводовое кольцо; 5 – цилиндрический кожух;
- 6 – водоохлаждаемая вспомогательная дверка; 7 – электромеханический механизм поворота печи вокруг вертикальной оси; 8 – электромеханический механизм наклона печи; 9 – сливной носок; 10 – подвижный токоподвод из водоохлаждаемых гибких кабелей; 11 – шток для вертикального перемещения системы «стойка – рукав – электродержатель – электрод»; 12 – токоподвод из охлаждаемых медных труб

На рис. 2.53 представлена футеровка печи. Процесс выплавки электростали в дуговой печи состоит из следующих 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.

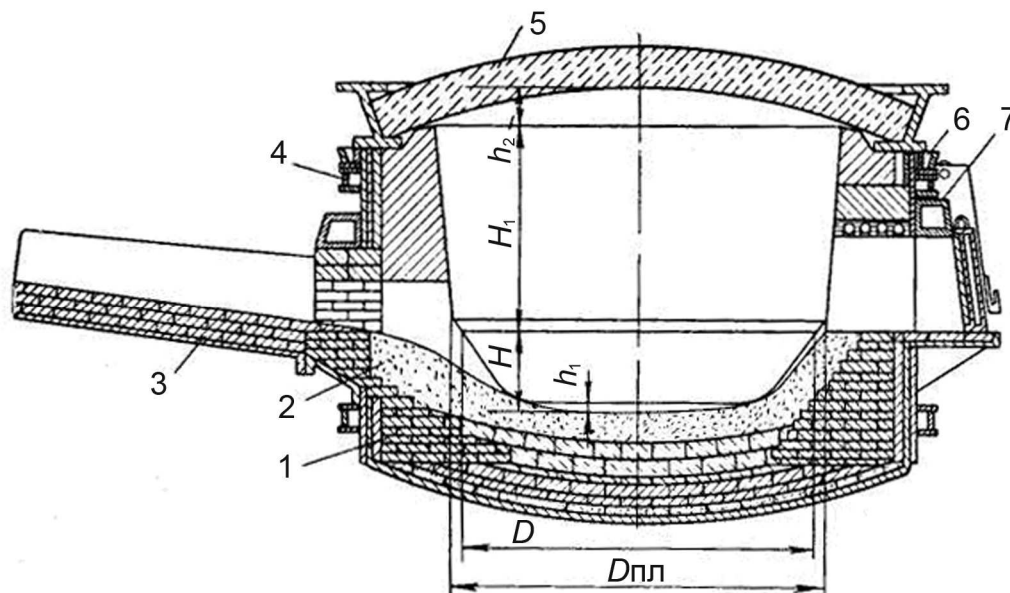


Рис. 2.53. Футеровка печи:

1 – магнезитовая кладка пода; 2 – магнезитовая набойка пода; 3 – шамотная футеровка желоба; 4 – магнезитовый блок; 5 – динасовый свод; 6 – песочный затвор; 7 – арка рабочего окна; D – диаметр ванны по уровню металла, мм; $D_{пл}$ – диаметр ванны по уровню откосов, мм; H – высота металла, мм; H_1 – высота стен, мм; h_1 – заправка металла, мм; h_2 – высота подъема свода над уровнем пят свода, мм

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, поэтому для предотвращения короткого замыкания электроды поднимаются. Характерной особенностью периода расплавления является беспокойный 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 со-

ставляет 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. 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 всплывает пузырьками – 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 которых 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:

- возможность гибкого управления мощностью, поскольку в начальный период необходима максимальная мощность, чтобы ускорить процесс расплавления. В другие периоды нужно иметь возможность изменять мощность для управления температурами металла и шлака;
- поддержание в печи восстановительной атмосферы;
- быстрая реакция электрооборудования печи на частые короткие замыкания и обрывы дуги в период расплавления, возможность ограничивать ток короткого замыкания до безопасных значений, ликвидировать все отступления от нормального электрического режима в кратчайшее время. Следует отметить, что 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, по оси которых имеются отверстия с резьбой. В отверстия до половины своей длины ввинчены ниппели, выполненные из материала электрода. 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 изготавливают длиной 1000–1800 мм. По мере обгорания в печи нижней части свечи электродов она опускается вниз с помощью механизмов перемещения. Когда электрододержатель подходит к своду печи, производится наращивание и перепуск электродов.

Графитизированные электроды изготавливают 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 изготавливают 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 России в эксплуатации находятся дуговые печи для выплавки стали емкостью до 200 т, питаемые от трансформаторов мощностью до 80 МВ · А. При повышении мощности печи значительно снижается расход энергии на выплавку 1 т металла, что определяет тенденцию укрупнения печных установок.

2.5.3. Электрооборудование дуговых печных установок

Электродуговая печь представляет собой мощный энергопотребитель, относящийся ко второй категории по надежности электроснабжения. Электрооборудование и схемы электроснабжения ДСП имеют ряд особенностей.

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

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. 2.54).

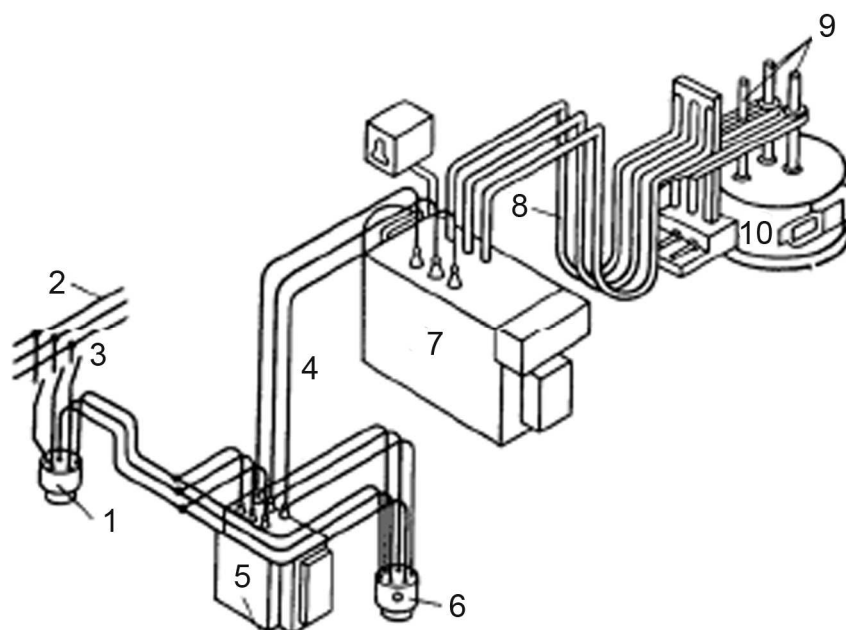


Рис. 2.54. Схема электропечной установки:

1, 6 – выключатели; 2 – высоковольтные шины; 3 – разъединитель; 4 – высоковольтная сеть; 5 – реактор; 7 – печной трансформатор; 8 – короткая сеть; 9 – электроды;
10 – электродуговая печь

Главная цепь тока включает в себя 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 (см. рис. 2.54) 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 жесткозакрепленных 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 – от 110 кВ. Присоединение измерительных и защитных приборов к проводам высокого напряжения производится через трансформаторы тока и напряжения.

Для поддержания оптимального режима работы печи устанавливаются автоматические регуляторы мощности печи. Такие регуляторы воздействуют на механизм передвижения электродов, изменяют длину дуги и поддерживают заданное значение мощности дуговой печи.

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

- высокое значение номинального тока на стороне низкого напряжения (до десятков и сотен кА);

- большой коэффициент трансформации (напряжение с 6, 10, 35, 110 кВ трансформируется до нескольких сотен вольт);
- число ступеней напряжения и диапазон его регулирования гораздо больше, чем у силовых трансформаторов (напряжение регулируется примерно на 50 % при числе ступеней до 40 и более);
- трансформаторы обладают высокой стойкостью против эксплуатационных коротких замыканий с кратностью тока $2,5-3 I_{ном}$ и 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 печах 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 являются одними 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 тока.

В печных дуговых установках необходимы защиты от токов перегрузки и аварийного короткого замыкания. Защиту от перегрузок обычно обеспечивают на стороне низкого напряжения с помощью максимальных реле с зависимой выдержкой времени. Защита от токов аварийного короткого замыкания осуществляется с помощью максимальных реле мгновенного действия на стороне высокого напряжения.

Установку мгновенных реле выбирают так, чтобы они не реагировали на токи эксплуатационных коротких замыканий в диапазоне от 2 до $2,5 I_n$, поэтому установку защиты выбирают равной $5 I_n$. Защита от перегрузки имеет выдержку времени 5–10 с, т. е. включает в себя значительное время работы автоматики, ликвидирующей аварийный режим.

2.5.4. Рабочие режимы и характеристики электродуговых печей

Дуговая сталеплавильная печь работает, как правило, круглосуточно с остановками на ремонт и профилактический осмотр. Цикличность работы определяется чередованием плавов с отключением печи для слива металла, его 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 до максимума.

В зависимости от силы тока в печи различают следующие режимы работы: режим холостого хода (дуги не горят, $I = 0$); нормальный режим ($I = I_n$); 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 (рис. 2.55).

Рабочими и электрическими характеристиками печи (см. рис. 2.55) принято считать зависимость от тока I полной активной мощности установки P ; мощности дуги P_d ; электрических потерь $P_э$; тепловых потерь P_T ;

электрического КПД $\eta_{\text{э}}$; коэффициента мощности $\cos \varphi$; удельного расхода электроэнергии на плавку N ; часовой производительности g ; продолжительности плавки t .

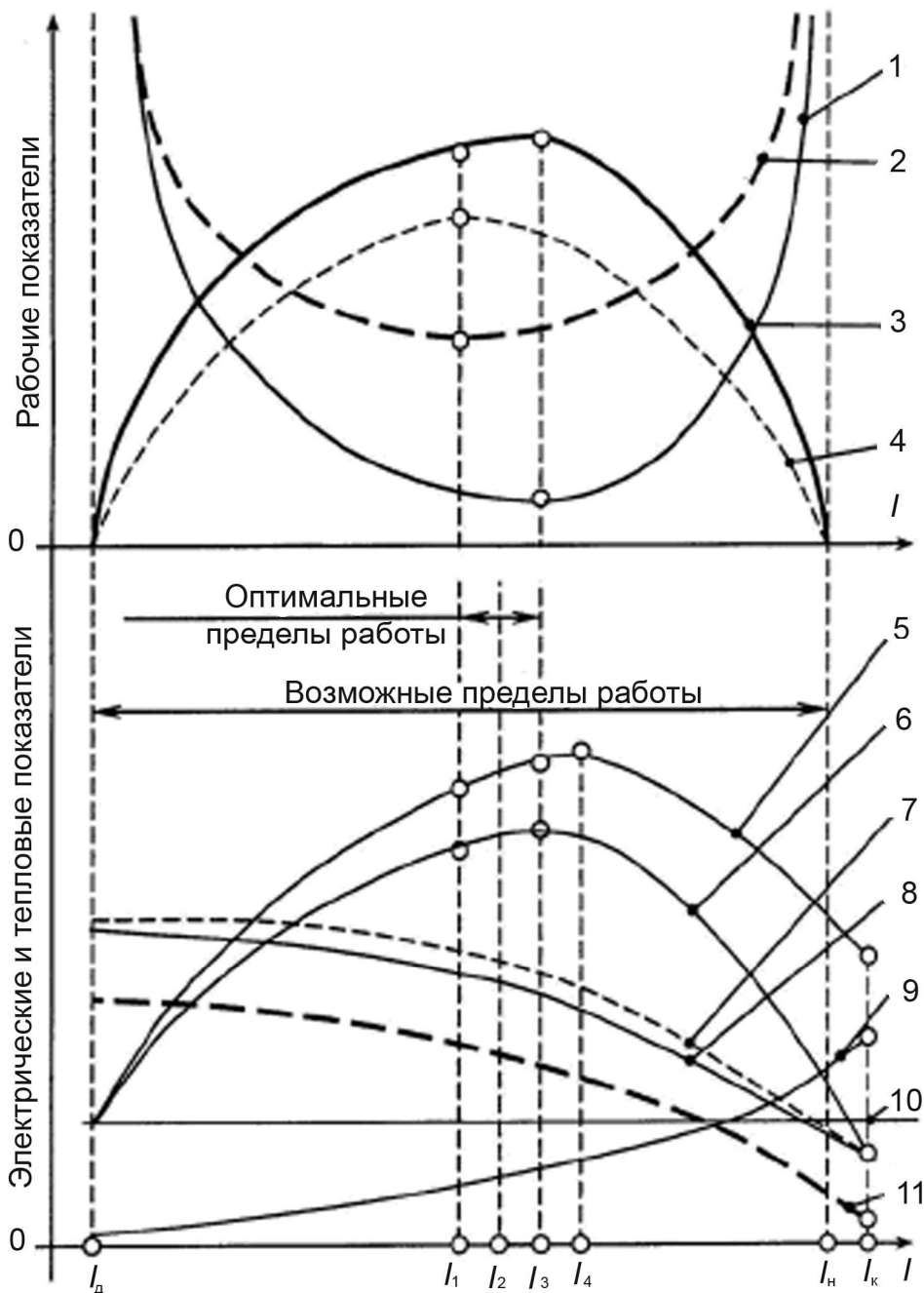


Рис. 2.55. Рабочие и электрические характеристики печи:

1 – время плавки; 2 – удельный расход электроэнергии; 3 – часовая производительность; 4 – полный КПД печи; 5 – мощность печи; 6 – мощность дуги; 7 – коэффициент мощности печи; 8 – КПД дуги; 9 – мощность электрических потерь; 10 – мощность тепловых потерь; 11 – напряжение дуги

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.

Согласно электрическим характеристикам печи 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 увеличиваются до максимума и затем снижаются. Удельный расход электроэнергии N имеет минимум при токе I_1 . Этому же значению тока соответствует максимум полного КПД печи. Ток I_1 определяет режим минимального удельного расхода электроэнергии. Ток I_3 соответствует максимальной мощности дуг и минимальному времени расплавления. Он же определяет режим максимальной производительности. Значения токов I_1 и I_3 неравны: обычно $I_3 > I_1$.

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_1 . Если необходима максимальная производительность, то работают при токе I_3 .

На основании этого определяют ступени напряжения и установки токов в различные периоды плавки, что обеспечивает высокие технико-экономические показатели работы печи.

Так, для сверхмощной стотонной печи ДСП-100 ИБ рекомендуется следующий энергетический режим, при котором реализуется следующее:

- 1) проплавление колодцев в шихте до удельного расхода N , равного $65 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ при токе дуги 57 кА , составляющем 51% тока короткого замыкания;

- 2) плавление основной массы шихты до удельного расхода энергии N , равного $280\text{--}310 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ при токе 62 кА на второй ступени трансформатора;

- 3) подвалка шихты. Проплавление колодцев на режиме по первому пункту, затем переход на вторую ступень напряжения и работа на токах 62 кА , до израсходования $300\text{--}320 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ для общей массы шихты, находящейся в печи;

- 4) переход на третью ступень напряжения и ток в дугах 65 кА до израсходования $380 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$, 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 $P_{уд}$:

$$P_{уд} = 100 + (10 - 13) dT / d\tau,$$

где $P_{уд}$ – удельная мощность, кВт · ч/т;

$dT / d\tau$ – 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 составляет

$$C = A + B / g + cN,$$

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_2 , при котором себестоимость плавления минимальна, больше, чем I_1 , но меньше, чем I_3 .

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.

2.5.5. Вакуумные дуговые печи

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 высокореакционных 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 изготавливают прессованием титановой губки. При переплавке вольфрама, молибдена и ниобия электроды изготавливают 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 применяются 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. 2.56, *а*) и плавка с вытягиванием слитка (рис. 2.56, *б*).

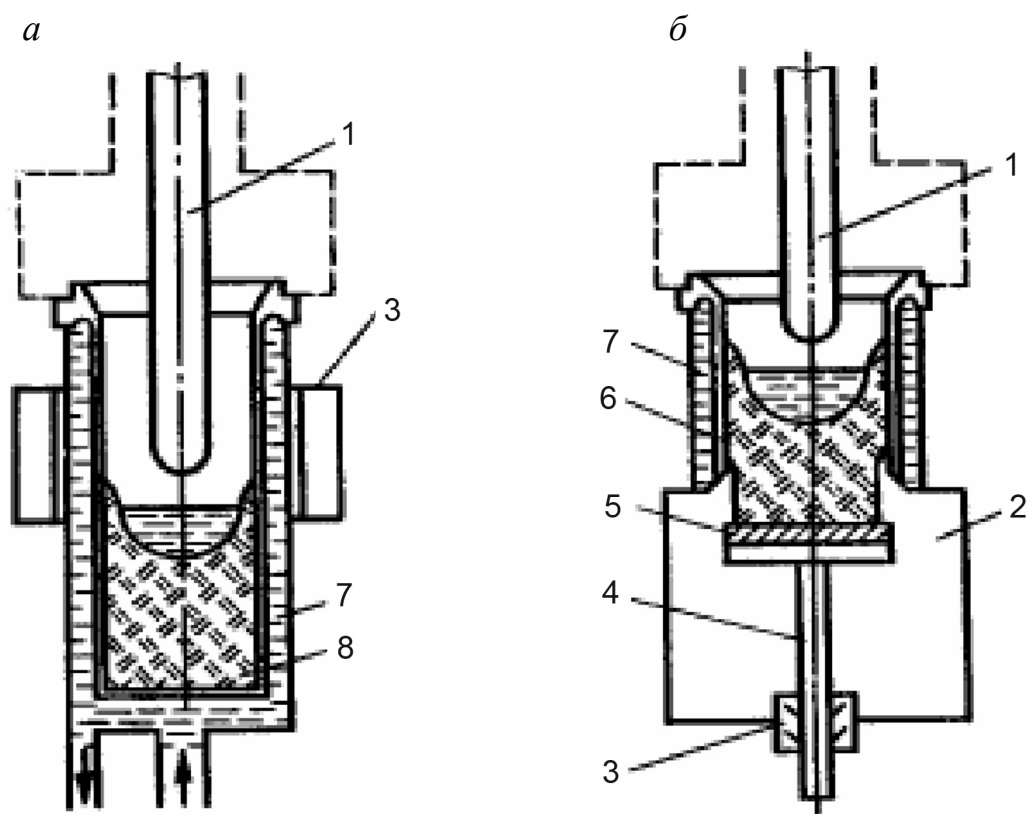


Рис. 2.56. Схема ВДП:

а – с глухим кристаллизатором; *б* – с вытягиванием слитка;

1 – электрод; 2 – холодильник; 3 – вакуумное уплотнение штока; 4 – тянущий шток; 5 – поддон; 6 – слиток; 7 – кристаллизатор; 8 – соленоид

Основной частью печи является рабочая камера, к которой присоединена вакуумная система. Электрод подвешен к подвижному штоку, который проходит через вакуумное уплотнение, расположенное в верхней части камеры. К нижней части рабочей камеры присоединяется водоохлаждаемый кристаллизатор с рубашкой водяного охлаждения. К электроду подается

отрицательный, а к кристаллизатору положительный полюс источника питания. В печи, работающей по схеме с вытягиваемым слитком (см. рис. 2.56, б), имеется проходящий через вакуумное уплотнение шток для вытягивания слитка. Металл наплавляется на поддон и по мере роста слитка 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. На практике ВДП с расходуемыми электродами применяются чаще, поскольку при работе с нерасходуемыми электродами есть опасность загрязнения переплавляемого металла материалом электрода.

К основным элементам печи относятся рабочая камера, шток-электрододержатель, расходуемые электроды, кристаллизатор, поддон и 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 – это электрододержатель. Он 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, несмачивающегося 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 ним 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 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.

Конструкция токоподвода обеспечивает равномерный контакт по периметру поддона, кристаллизатора и вакуумной камеры, что снижает уровень магнитных полей и способствует стабилизации дугового разряда.

Система автоматического управления (САУ) ВДП (рис. 2.57) 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 и 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 промежуток, электрод, ванна жидкого металла – слиток. Входными величинами звена «электрическая дуга» являются напряжение источника питания U_{Π} и межэлектродный промежуток l (τ), которые определяют выходные параметры дуги: ток I_{Π} (τ), напряжение $U_{\text{д}}$ (τ), мощность $P_{\text{д}}$ (τ), поступающую в ванну

расплава. Возмущающими воздействиями являются случайные изменения условий существования дугового разряда. Входные величины звена «межэлектродный промежуток» – скорость подачи электрода $V_{\text{под}}(\tau)$ и скорость его плавления $V_{\text{пл}}(\tau)$, приведенная к линейной скорости увеличения промежутка. Выходной регулируемой величиной является длина промежутка $l(\tau)$, определяемая как интеграл разности указанных величин. Возмущающими воздействиями будут колебания поверхности ванны металла и изменение формы торца электрода.

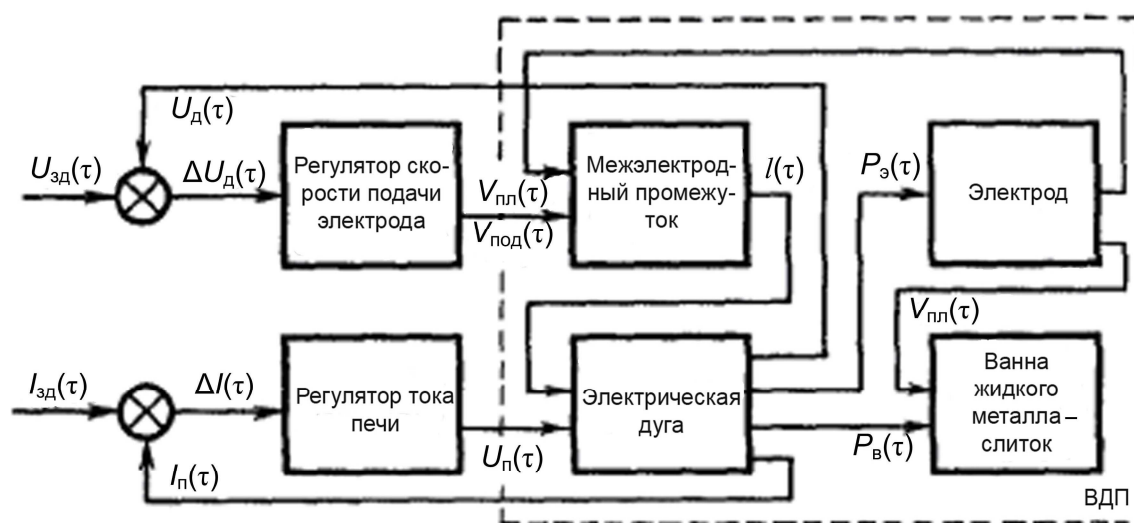


Рис. 2.57. Структурная схема САУ ВДП:

$U_{\text{зд}}(\tau)$ – заданное значение напряжения дуги; $I_{\text{зд}}(\tau)$ – заданное значение тока

Входной величиной звена «электрод» является мощность $P_{\text{э}}(\tau)$, 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 $V_{\text{пл}}(\tau)$ и мощность $P_{\text{в}}(\tau)$, определяющие режим кристаллизации слитка.

В системах управления ВДП используется универсальный регулятор на базе управляющего микропроцессора. В состав регулятора дополнительно входят устройство визуального отображения информации, ручного ввода-вывода информации, тиристорные преобразователи для питания соленоидов и электродвигателей перемещения электрода. В программируемом постоянном запоминающем устройстве микропроцессора хранится программа, реализующая алгоритм управления переплавом.

2.5.6. Печи электрошлакового переплава

Развитие за последние годы авиации, ракетной, космической и других областей техники потребовало новых, более прочных материалов, дающих возможность создания легких и долговечных конструкций [3]. Основными материалами остались стали, но качество их существенно повысилось. Оказалось, что можно значительно улучшить прочностные свойства сталей, их вязкость, пластичность, сопротивляемость переменным нагрузкам и истиранию, если очистить их от мелких загрязнений, примесей, неметаллических включений и растворенных в них газов (азота, водорода, кислорода). При этом оказалось возможным существенно улучшить такие сорта стали, как шарикоподшипниковые, пружинные, жароупорные (из них изготавливают лопатки турбин реактивных двигателей). Например, в результате очистки от примесей и растворенных газов шарикоподшипниковой стали удалось увеличить ресурс (срок службы) шарикоподшипников в 1,5–2 раза.

Лучшие сорта стали получают в ДСП, в которых путем специального рафинирования удается удалить из металла в шлак вредные растворенные в металлической ванне примеси, такие как сера, фосфор, оксиды железа, углерод. Однако ряд неметаллических примесей и растворенных в металле газов удалить полностью в процессе рафинирования стали в ДСП не удается. Для того чтобы добиться особой чистоты стали, нужно еще раз (а иногда и два раза) ее переплавить и провести рафинирование в новых условиях, в корне отличных от условий, в которых проводится рафинирование стали в ДСП. Несмотря на то, что это дорого, такой процесс вторичного переплава стали себя оправдывает.

Для того чтобы подобным образом очистить сталь, нужно найти такой шлакообразующий материал, который интенсивно отбирал бы из металла как неметаллические включения, так и газы. Далее необходимо обеспечить более интенсивное и более тесное взаимодействие между жидкой сталью и шлаком и, наконец, защитить расплавленный металл от соприкосновения с воздухом и футеровкой печи – источниками насыщения металла газами и неметаллическими включениями.

Процесс, который позволил осуществить все указанные требования, назван *электрошлаковым переплавом* (ЭШП). Осуществляется он следующим образом (рис. 2.58). Из полученной в ДСП стали отливают, прокатывают или проковывают круглые расходуемые электроды примерно половинного се-

чения по сравнению с желаемыми размерами слитка и длиной 6–8 м. Конец такого электрода 1 опускают в металлическую (обычно медную) охлаждаемую водой трубу – кристаллизатор 2. Последний нижним концом устанавливают на поддон 7, также медный и водоохлаждаемый. На поддон, находящийся на тележке, предварительно укладывают затравку (темплет) 6, выполненную из той же стали, которую хотят получить. Конец электрода устанавливают на затравку, а пространство между ним и стенкой кристаллизатора заливают жидким (расплавленным) фтористым шлаком 3 марок АН-6 или АН-7, состоящим из 65–80 % фтористого кальция и 35–20 % глинозема Al_2O_3 . Затем слегка приподнимают электрод, к нему и поддону прикладывают напряжение 45–60 В промышленной частоты. Ток растекается от конца электрода по шлаку (жидкий шлак электропроводен) к стенкам кристаллизатора и к поддону. Шлак разогревается до 1700 °С под действием протекающего через него тока; конец электрода разогревается от шлака и начинает расплавляться, стекая на поддон каплями через шлак.

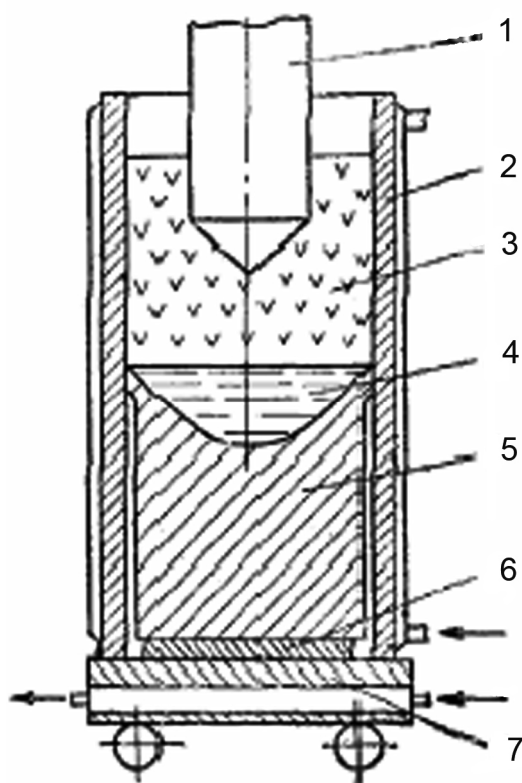


Рис. 2.58. Принцип действия установки электрошлакового переплава

В результате конец электрода принимает форму конуса, а на дне кристаллизатора образуется жидкометаллическая ванна. Но так как поддон

и кристаллизатор медные и охлаждаются водой, то, соприкасаясь с ними, жидкая сталь сразу же застывает, образуя слиток 5, на верхней части которого за счет постоянно притекающего сверху от электрода перегретого металла и образуется жидкометаллическая ванна 4, имеющая сфероконическую форму. Постепенно расходующий электрод плавится все больше, а слиток растет в кристаллизаторе, и верхняя поверхность его поднимается вместе с жидкометаллической ванной. В конце плавки, когда расходующий электрод расплавится (кроме огарка, зажатого в электрододержателе), слиток заполняет кристаллизатор. Печь отключают, кристаллизатор откатывают на тележке в сторону и разгружают: кристаллизатор снимают со слитка вверх (для облегчения съема он выполняется слегка конусным). Из электрододержателя извлекают огарок и вставляют новый расходующий электрод. Затем под электрод подкатывают второй кристаллизатор, и начинается новая плавка. Таким образом, процесс ЭШП является периодическим, а установка ЭШП – *печью периодического действия*.

Падающий с конца электрода каплями перегретый металл проходит до попадания в ванну через слой шлака. Поверхность капель намного больше поверхности ванны, поэтому рафинирующее действие шлака более интенсивно, чем в ДСП. Шлак защищает жидкий металл от соприкосновения с воздухом, а соприкосновение его с холодными стенками кристаллизатора также не способствует его загрязнению. Поэтому металл, полученный ЭШП, намного чище по сравнению с металлом, полученным в ДСП.

Питание установки осуществляется от понижающего трансформатора с большим числом мелких ступеней напряжения для регулирования скорости расплавления и компенсации изменения сопротивления контура, вызванного изменением длины, а, следовательно, и сопротивления электрода по мере его расплавления. Токоподвод от трансформатора к электроду выполняется гибким.

Печи ЭШП выполняются для получения слитков массой от 1–5 т и более до 100 т. Проектируются печи для производства слитков массой до 250 т. Мощность печей достигает (для слитка массой 40 т) $3000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, а так как напряжение невелико и печь однофазная, токи достигают 75000 А и более. Из-за большой индуктивности токоподвода коэффициент мощности установки составляет всего 0,8–0,7, снижаясь до 0,6 у печи на слиток 40 т.

Так как тепловые потери в кристаллизаторе велики, КПД установок низок, а удельный расход энергии достигает 1000–1200 кВтч/т.

Для улучшения параметров и эксплуатационных характеристик печей ЭШП делались попытки их перевода на питание постоянным током, однако они не дали положительных результатов, так как качество слитков при этом снизилось.

Попытки разработки трехфазной печи с тремя расположенными в линию кристаллизаторами также не имели успеха из-за большого переноса мощности и очень значительного расхождения в скорости плавления в «мертвой» и «дикий» фазах. Лучше работает трехфазная печь с одним кристаллизатором и тремя расположенными по треугольнику электродами.

В настоящее время используют два метода снижения индуктивности контура печи. Первый состоит в применении бифилярного токоподвода у печей с двумя электродами и прямоугольным кристаллизатором для выплавки плоских слитков; в этом случае прямой и обратный провода могут располагаться рядом и индуктивность токоподвода резко уменьшается; коэффициент мощности растет до 0,9–0,95. Второй способ – питание печей ЭШП током низкой частоты (2–10 Гц) от преобразователя частоты.

Электрический режим печей ЭШП сравнительно спокойный: дуга отсутствует, колебания тока невелики. Качество слитка получается хорошим, если скорость плавления постоянна. Для этой цели на печах устанавливается система автоматического регулирования, стабилизирующая ток ванны, в то время как напряжение на ней меняется по программе за счет переключения ступеней напряжения питающего трансформатора. Благодаря этому в начале плавки мощность печи поднимается постепенно (прогрев электрода), а в конце плавки также постепенно снижается. Последнее необходимо для вывода лунки и уменьшения усадочной раковины в верхней части слитка. Во время плавки перемещение электродов происходит с постоянной скоростью для обеспечения постоянства скорости наплавления слитка.

Несмотря на дороговизну (низкий КПД, высокий удельный расход энергии), ЭШП себя оправдывает в ряде случаев из-за высокого качества металла и возможности получения очень плотных крупных слитков.

2.5.7. Рудно-термические печи

В рудно-термических (рудовосстановительных) печах (РТП) проводят восстановительные электротермические процессы, с помощью которых получают чистые металлы или сплавы металлов из руд, содержащих эти металлы в виде оксидов или сернистых соединений. Так, из оксида железа (FeO)

получают чугун (процесс, аналогичный доменному), из оксида марганца (MnO) – марганец, из диоксида кремния (SiO_2) – кремний, из оксида молибдена (MoO_3) – молибден, из оксида кальция или извести (CaO) – карбид кальция (CaC_2) и др. [3].

Во многих случаях получают сплавы с железом – ферросплавы (ферросилиций, ферромарганец, феррохром, силикомарганец и др.). Они имеют меньшую температуру плавления, их легче и дешевле получать. Такие сплавы широко применяются при производстве сталей, как легированных, так и обычных углеродистых.

Широко применяются также в промышленности получаемые в этих печах фосфор (удобрения), карбид кальция (производство ацетилена, некоторых сортов удобрений), никелевый штейн (получение металлического никеля). Более ограниченный характер носит производство в РТП других материалов, таких как малоуглеродистые ферросплавы и чистые кремний, марганец, хром (они применяются для получения некоторых высоколегированных сталей), алунд и карборунд (абразивные материалы), электрографит (графитовые электроды для ДСП) и др.

Рудно-термические печи имеют следующие отличительные черты:

- удельное электрическое сопротивление шихты в нагретом состоянии сравнительно велико (холодная шихта, как правило, неэлектропроводна);
- в отличие от ДСП, в которых, по существу, проводится лишь один процесс – выплавка электростали (все варианты этого процесса могут быть осуществлены в одном типе печи), в руднотермических печах проводится множество различных технологических процессов, оказывающих существенное влияние на электрические и геометрические параметры и конструктивные особенности печей;
- энергоемкость проводимых в руднотермических печах процессов весьма велика и достигает 2000–10000 кВт · ч/т продукта (против 600–1000 кВт · ч/т при выплавке стали);
- для многих руднотермических процессов (получение массовых ферросплавов, чугуна, карбида кальция, фосфора, никелевого штейна) характерны крупные объемы производства, поэтому необходимы очень мощные печи (до 100 МВ · А);
- печи работают непрерывно, капитальный ремонт возможен один раз в 1,5–2 года, поэтому требуется высокая надежность конструкций печи, а в местах, подвергающихся нагреву, – усиленное водяное охлаждение;

- электрический режим печей (кроме рафинировочных печей с открытой дугой) сравнительно спокоен, так как последовательно или параллельно с дугой включено сопротивление шихты; кроме того, сама дуга горит устойчиво (благодаря большим токам, хорошей тепловой изоляции дуги и, следовательно, высоким температурам зон вокруг дуги), толчки тока невелики, эксплуатационные короткие замыкания отсутствуют.

Из всего многообразия процессов, проводящихся в РТП, можно выделить следующие пять основных групп процессов.

1. *Бесшлаковые и малошлаковые процессы* – получение ферросилиция, ферромарганца, углеродистого феррохрома, карбида кальция.

Печи для этих процессов (рис. 2.59) трехфазные, непрерывного действия, неподвижные: загрузка осуществляется сверху, порциями; выпуск металла производится периодически через летки 8, которые забиты пробками и пробиваются или прожигаются электрической дугой перед выпуском. Обычно печь в плане бывает круглой (меньшие тепловые потери; электроды расположены по треугольнику, следовательно, меньше перенос мощности). Также применяются и прямоугольные печи с размещенными по длинной оси прямоугольника тремя или шестью электродами. В первом случае печь имеет две или три летки, во втором – всегда три летки (против каждого электрода) с выпуском металла поочередно из каждой летки. Электроды 1 погружены в шихту 3, они зажаты электрододержателями 2, висящими на цепях лебедок. 10

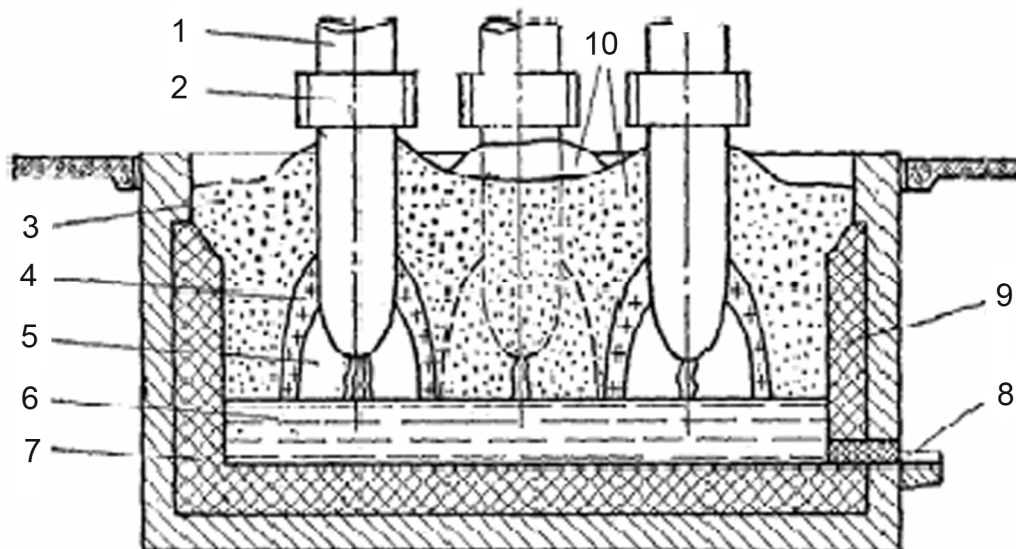


Рис. 2.59. Схема печи для бесшлакового процесса

Дуга горит в газовом пузыре 5 у нижних концов электродов 1 в шихте; пузыри возникают из-за давления выделяющихся газов и оформляются спекшейся шихтой, образующей стенки «тигля» 4, опирающиеся на жидкий металл (расплав) 6, на котором и горит дуга; на внутренней поверхности «тигля» температура равна температуре плавления металла. Именно в стенках «тигля» протекают реакции восстановления; восстановленный металл расплавляется на внутренней поверхности «тигля» и каплями стекает вниз. Ток проходит не только по дуге, но и от электрода к расплаву через стенки «тигля» (спекшаяся шихта является хорошим проводником), шунтируя ток дуги. Последовательно с дугой включен расплав; в нем также выделяется джоулева теплота, но она невелика, так как электрическое сопротивление металлического расплава достаточно мало. Кроме того, ток проходит по «треугольнику» непосредственно от электрода к электроду через шихту 3, однако из-за высокого сопротивления холодной шихты этот ток невелик.

По мере расплавления шихты в «тигле» ее место занимает опускающаяся вниз вокруг электродов шихта. Остальные участки шихты (у стенок шахты печи, между электродами) остаются неподвижными и не участвуют в реакциях, образуя гарнисаж, защищающий футеровку от перегрева. Загрузку шихты поэтому следует проводить вокруг электродов, а не по всей площади колошника, образуя вокруг них конусы 10. Благодаря этим конусам газы (угарный газ (CO)) отклоняются от электродов и выходят на колошнике на некотором расстоянии от электрододержателей 2. В противном случае последние, несмотря на водяное охлаждение, быстро вышли бы из строя в результате воздействия горящих струй окиси углерода.

Так как восстановителем является углерод (кокс), стенки шахты печи 9 и ее подина 7 могут быть изготовлены из угольных блоков, выдерживающих большую по сравнению с керамическими материалами температуру.

Условия работы у открытого колошника и у леток тяжелые (жара, пыль, необходимость вручную регулировать состав шихты). Отсюда вытекает настоятельная необходимость закрытия колошника печи, ее герметизации и механизации загрузки печи и выпуска металла.

2. *Многошлаковые процессы* – получение никелевого штейна из сернистых руд (рис. 2.60), фосфора и др.

Печи для многошлаковых процессов также являются печами непрерывного действия, прямоугольными (для никелевого штейна – с тремя или шестью электродами 1) или круглыми (для фосфора), неподвижными, с вы-

пуском через летки отдельно металла 6 и отдельно шлака 8. Летки для металла и шлака находятся на разных уровнях. На поверхности расплава 7 плавают толстый слой расплавленного шлака 9, ток проходит через дугу 5 и шлак на расплав. Загрузка шихты через устройства 2 осуществляется на поверхность шлака, шихта 10 плавает на нем и растворяется в шлаке, восстановленный металл стекает в расплав. Благодаря этому не требуется ухода за колошником, что облегчает закрытие и герметизацию печи. Такие печи перекрыты сводом 3 и герметизированы, имеют вытяжку газов 4, так как либо их газы ядовиты, либо нужный продукт получается в виде пара (фосфор), который надо сконденсировать и собрать.

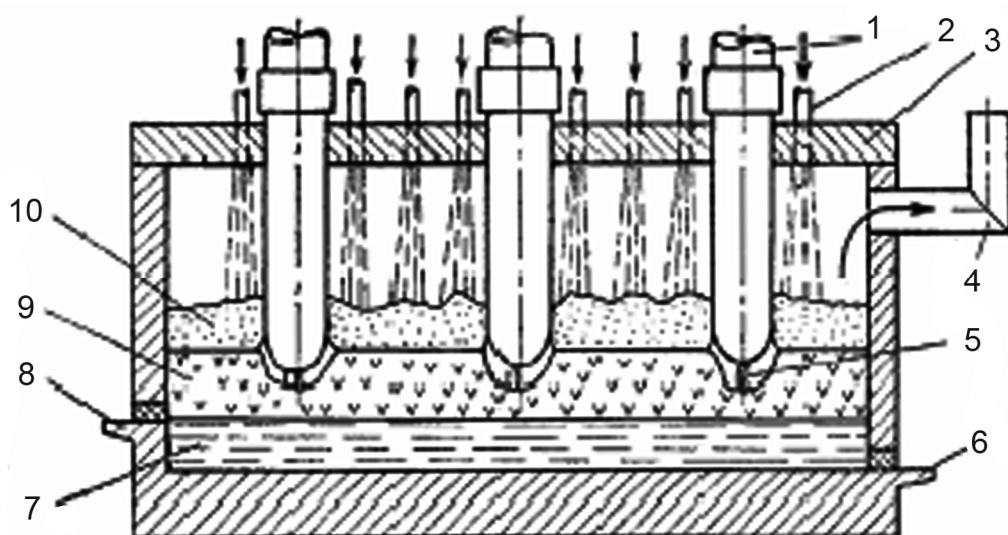


Рис. 2.60. Схема печи для многошлакового процесса

3. *Рафинировочные процессы* – получение безуглеродистых или малоуглеродистых ферромарганца и феррохрома, металлического кремния и никеля. Структура рабочего пространства печей при данных процессах подобна печи для многошлакового процесса, отличие в периодичности процесса: загрузка и слив происходят при наклоне печи.

4. *Блок-процессы* – получение электрокорунда, ферровольфрама, карбида бора. Из-за высокой температуры расплава его из печи не выливают, а по мере наращивания слитка ванну откатывают, блок извлекают и пускают для последующей переработки.

5. *Выплавка огнеупоров* – их целесообразно вести открытой дугой с постепенной подсыпкой шихты. Слив расплава производится по мере наполнения печи.

2.5.8. Конструкция и электрооборудование рудно-термических печей

Печи для бесшлаковых и многошлаковых процессов состоят из следующих основных элементов.

Ванна печи. Ванна состоит из прочного цилиндрического или прямоугольного кожуха, усиленного горизонтальными и вертикальными поясами жесткости, футерованного изнутри магнезитовой или угольной футеровкой и установленного на бетонном фундаменте. Кожух у печей для бесшлаковых процессов открыт сверху или перекрыт металлическим охлаждаемым водой сводом; у печей для многошлаковых процессов он перекрыт арочным керамическим сводом. Подина ванны очень толстая и обладает большой тепловой инерцией. Ванна печи снабжена несколькими летками для выпуска сплава и шлака. Закрытые печи снабжаются газоотводом и системой газоочистки.

Электроды. Обычно печь имеет три электрода, расположенных по треугольнику (круглые печи) или вытянутых в линию (прямоугольные печи); в последнем случае на крупных печах применяют шесть электродов. Электроды являются самоспекающимися, они состоят из стального кожуха, сваренного из листа, и заполняющей его массы (кокс в смеси с каменноугольной смолой и пеком). Внизу, в ванне печи, электроды расходуются, причем кожух расплавляется. По мере обгорания и распыления концов электродов они опускаются, наполняющая их масса попадает во все более горячую зону и спекается, превращаясь в твердый угольный электрод. По мере укорочения электрода к его верхней части приваривают новую секцию кожуха, заполняемую новой порцией массы. Такие самоспекающиеся электроды достигают 2000 мм в диаметре и образуют столб длиной 10–15 м и массой до 5 т.

Токоподводы. Так как токи фаз составляют несколько десятков тысяч ампер и доходят до 100000 А и даже больше, токоподводы выполняются для уменьшения индуктивности из перешихтованных шин (чередование прямых и обратных шин или чередование фазных шин) или охлаждаемых водой медных труб. Они состоят из перешихтованного участка от выводов печного трансформатора до неподвижных литых медных башмаков, в которых закреплена гибкая часть токоподвода (пакеты гибких кабелей или лент, обеспечивающих свободное перемещение электрододержателей от-

носителем неподвижного токоподвода). Другой конец гибкой петли токоподвода зажат в подвижных башмаках, жестко связанных медными водоохлаждаемыми трубами со щетками электрододержателей.

Электрическое оборудование, обслуживающее крупные руднотермические печи, отличается от оборудования ДСП отсутствием реактора ввиду относительно спокойного электрического режима, более устойчивых и хорошо теплоизолированных дуг. Трансформаторы, как правило, выполняются с переключением ступеней напряжения под нагрузкой, регулирование режима осуществляется как перемещением электродов, так и переключением ступеней трансформатора. Ввиду перешихтовки токоподводов трансформаторы тока со стороны низкого напряжения (НН) установить нельзя. Несмотря на перешихтовку, индуктивность токоподводов весьма велика и коэффициент мощности установки низок (0,8–0,7); кроме того, велика неравномерность нагрузки по фазам, особенно в прямоугольных печах (перенос мощности).

Для улучшения коэффициента мощности и доведения его до приемлемого значения (0,9–0,95) применяются те или иные схемы компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторов.

При поперечно-емкостной компенсации (рис. 2.61) конденсаторы C включаются между фазами со стороны высокого напряжения (ВН), при этом реактивная энергия не поступает в сеть, а циркулирует в трансформаторе T и короткой сети, вызывая дополнительные потери.

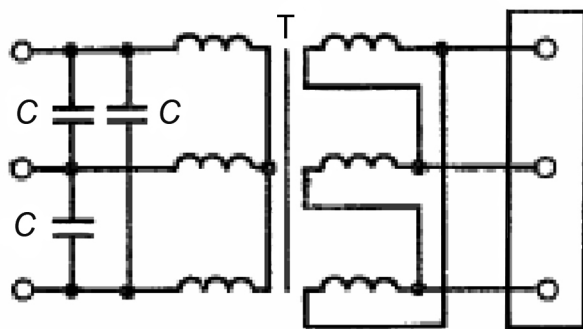


Рис. 2.61. Схема поперечно-емкостной компенсации

При продольно-емкостной компенсации (рис. 2.62) конденсаторы C включаются в разрез токоподвода последовательно с дугами. Так как напряжение на стороне НН мало и потребовалась бы очень большая емкость конденсаторов для компенсации (и причем они были бы в значительной степени недоис-

пользованы), их включение осуществляется в специальные повышающие трансформаторы $T_1 - T_3$, включаемые в токоподвод последовательно.

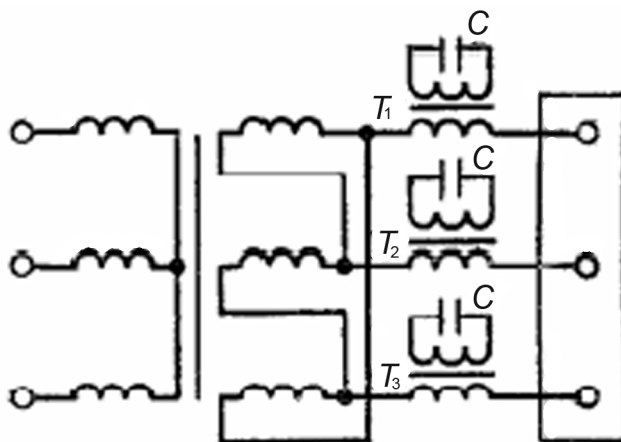


Рис. 2.62. Схема продольно-емкостной компенсации

При продольно-емкостной компенсации мощность электропечного трансформатора можно уменьшить, так как она покрывает лишь активную составляющую мощности, однако при этом появляются еще три однофазных повышающих трансформатора.

2.6. Установки плазменного нагрева

Дуга, свободно горящая в воздухе, имеет температуру столба 6000–8000 К. Если увеличить внешнее охлаждение дуги, сжав ее потоком газа, то температура ее столба возрастет. Этого можно достигнуть, направляя поток газа параллельно дуге (рис. 2.63, *а*) или по касательной к ней (с закрученным током газа) (рис. 2.63, *б*); в последнем случае формируется закрученный вокруг дуги газовый поток. Таким путем можно добиться повышения температуры столба дуги до $(10-20) \cdot 10^3$ К и более. Такого рода дуга горит более устойчиво, чем открытая, и может достигать значительной длины; она характеризуется большей плотностью тока, повышенным градиентом потенциала в столбе дуги, большей концентрацией мощности. Ее называют стабилизированной дугой.

Стабилизация дуги может быть достигнута и обжатием ее магнитным полем (рис. 2.63, *в*).

С увеличением температуры увеличивается степень ионизации газа. Так, при температуре около 10000 К степень ионизации паров ряда металлов достигает 0,5. Такое высокоионизированное состояние вещества назы-

вают низкотемпературной плазмой. При этом подразумевается, что в такой плазме числа положительно и отрицательно заряженных частиц в единице объема одинаковы (квазинейтральная плазма) и что вещество находится в состоянии термодинамического равновесия.

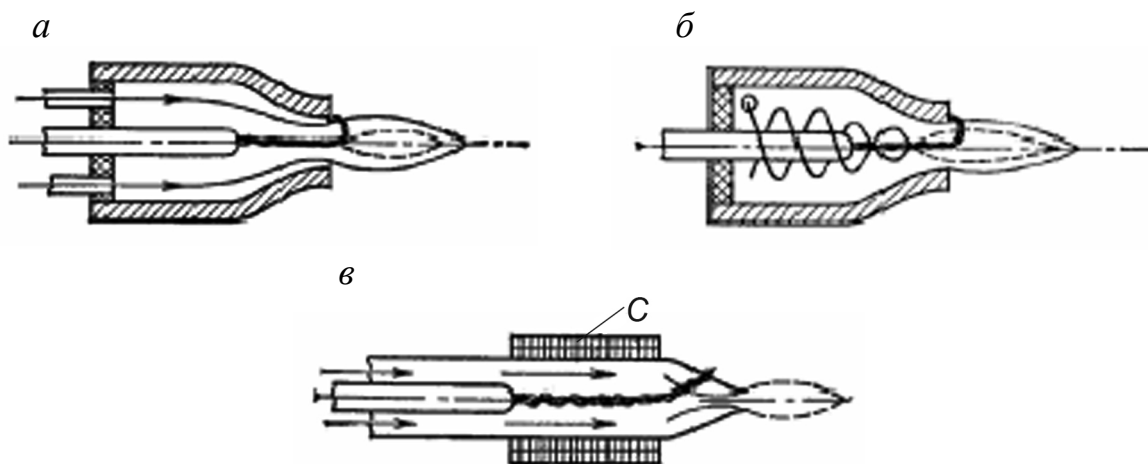


Рис. 2.63. Схемы плазмотронов:

а – с параллельным током газа; *б* – с закрученным током газа;
в – с обжатием дуги магнитным полем соленоида *С*

Для того чтобы газ оказывал на дугу стабилизирующее действие, его скорость должна быть весьма большой (она может превышать скорость звука).

Устройства, в которых электрическая энергия превращается в тепловую энергию потока низкотемпературной плазмы, носят название плазмотронов.

Дуговые плазмотроны можно подразделить на высоковольтные (2000–6000 В, 50–500 А) и низковольтные (100–800 В, 2000–10000 А). У первых дуга более длинная, с развитой поверхностью, приспособленной для нагрева газов, у вторых более концентрировано выделение энергии.

В настоящее время подавляющее количество плазмотронов работает на постоянном токе, так как сильное охлаждение дуги переменного тока газом приводит к ее неустойчивости: дуга обрывается при переходе тока через нуль.

Различают *плазмотроны прямого действия*, когда анодом является обрабатываемый материал (сталь в сталеплавильной плазменной печи; свариваемый или подвергаемый резке материал в плазменных сварочных установках), и *косвенного действия*, когда анодом является корпус плазмотронов, а нагрев осуществляется выходящим из сопла плазменным факелом.

Ток и мощность плазмотрона ограничены в основном эрозией электродов, что обуславливает малый срок их службы. В качестве материалов

для катода применяют графит и торированный вольфрам, для анода – охлаждаемую водой медь или обрабатываемый материал (плазмотроны прямого действия).

Так, печи для переплава расходуемого электрода в кристаллизатор должны быть герметизированы; в первом случае плавка проводится в вакууме, во втором – в атмосфере защитного газа, например, аргона. В результате может быть получен продукт плавки, приближающийся по качеству к металлу, получаемому в ВДП или вакуумных индукционных печах.

Особенно интересна конструкция плазменной сталеплавильной печи, напоминающей обычную ДСП, в которой три расположенные по треугольнику электрода заменены тремя плазмотронами прямого действия. Печь герметизирована, заполнена аргоном (газ подается через плазмотроны), имеет подовые электроды (аноды), расположенные в подине. Для печи емкостью 10 т применены три плазмотрона мощностью по 1800 кВт каждый со следующими параметрами: в начале плавки – 600 В, 3000 А; в конце – 300 В, 6000 А. Преимуществом выплавки стали в плазменной печи по сравнению с ВДП является отсутствие вакуумной системы и дорогих расходуемых электродов (работа на шихте), а по сравнению с ДСП – высокое качество получаемого металла (плавка в аргоне). Недостатки плазменной печи – большая длина дуг (высокие тепловые потери, тяжелые условия работы свода и стен, сильные динамические взаимодействия дуг) и наличие подовых электродов (уменьшение надежности работы печи).

Следует особо выделить *область применения плазмотронов*. В целом она весьма широка: это химическая промышленность, где высокая температура плазмы позволяет проводить реакции в газовой фазе с большой скоростью и полнотой; металлургия – плавление и переплав металлов (рис. 2.64), сварка и резка металлов, особенно цветных и тугоплавких; скоростное бурение горных пород; напыление – плазменное нанесение антикоррозионных, жаростойких и износостойких покрытий; стенды для испытаний материалов на ударные тепловые нагрузки; получение особо чистых порошков и выращивание монокристаллов.

Плазменные сварка и резка металлов осуществляются с помощью плазмотронов постоянного тока прямого действия. Катодом является графитовый электрод, анодом – свариваемый (или разрезаемый) металл и добавочный электрод. В качестве плазмообразующего газа применяют воз-

дух, нейтральные газы или водяной пар. В основном плазменная резка применяется для цветных и легких металлов и нержавеющей стали при большой толщине металла.

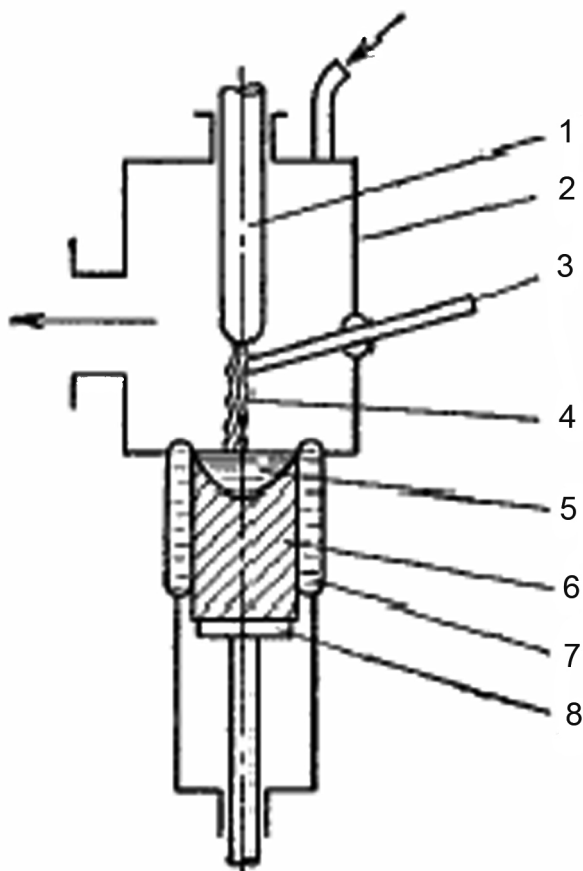


Рис. 2.64. Плазменная установка

для переплава расходного электрода в кристаллизатор:

1 – плазмотрон; 2 – камера; 3 – расходимая заготовка; 4 – плазменная дуга; 5 – ванна жидкого металла; 6 – слиток; 7 – гильза кристаллизатора; 8 – подвижный поддон

Для напыления и нанесения покрытий применяют плазмотроны постоянного тока косвенного действия. Напыляемый материал вводится в состав катода и при плавлении последнего поступает в виде мелких капель в плазменный факел, обдувающий изделие, на которое нужно нанести покрытие. Если материал покрытия не электропроводен, он может быть введен в виде порошка в камеру плазмотрона. Благодаря большой скорости мельчайшие частицы внедряются в напыляемую поверхность, образуя на ней плотный слой покрытия.

Плазменное бурение горных пород осуществляется плазмотронами косвенного действия. Истекающий из такого плазмотрона факел плазмы вызывает резкий местный перегрев породы, которая растрескивается и распадается на куски.

2.7. Электронно-лучевые установки

Принцип электронного нагрева заключается в следующем [3]. Если поместить два электрода в глубокий вакуум и нагреть катод до температуры более 2000 К, то он начнет эмитировать электроны, которые под действием электрического поля направляются к аноду. В вакууме при давлении 10^{-2} – 10^{-3} Па практически отсутствуют нейтральные частицы, положительно заряженные ионы не образуются, и ток можно считать чисто электронным.

Если ускоряющая электроны разность потенциалов достаточно велика, то при подходе к аноду электроны приобретают такую скорость, а следовательно, и кинетическую энергию, что оказываются способными разогревать анод своими ударами. При этом электрическая энергия превращается в тепловую в тонком поверхностном слое анода; дальнейшее распространение теплоты в последнем происходит теплопроводностью и конвекцией (если анод жидкий, например, жидкометаллическая ванна).

При еще больших скоростях электронов в результате бомбардировки анода электронным пучком возникает рентгеновское излучение, аналогичное изучению в рентгеновских трубках.

В электронном пучке электроны отталкиваются друг от друга и пучок расширяется. Поэтому если необходимо получить острый, сконцентрированный пучок, то ускоряющее напряжение должно быть весьма высоким, а на пути пучка следует применять магнитную фокусировку, сжимая его магнитным полем. Практически при широком нефокусированном пучке (установки с кольцевым катодом и радиальными пушками) ускоряющие напряжения составляют 5–15 кВ, а при сфокусированном луче (установки с аксиальными пушками) – 30–40 кВ; при работе с остро сфокусированным лучом (сварочные установки) ускоряющие напряжения равны 70–100 кВ.

Если ускоряющее напряжение превосходит 20 кВ, то приходится принимать меры по защите персонала от рентгеновского излучения. При напряжениях до 40 кВ установки заключают в стальной кожух толщиной не менее 15 мм, в гляделках применяют свинцовое стекло толщиной 40 мм; при более высоком напряжении кожух обкладывают свинцовыми листами.

Электронно-лучевая установка (ЭЛУ) состоит из устройства для получения и формирования электронного пучка, рабочей камеры с расплавляемым электродом и кристаллизатором (плавильная печь) или с нагрева-

емым материалом (нагревательная печь) и откачной системы, поддерживающей в катодной области на пути пучка давление не более 10^{-2} Па.

Таким образом, в электронно-лучевой установке источник энергии вынесен из объема, где осуществляется технологический процесс, и поэтому в отличие от ВДП и печей ЭШП его мощность можно регулировать независимо от того, что происходит в рабочей камере, что позволяет перегревать металл в нужных пределах, осуществлять его выдержку при постоянной температуре, необходимой для глубокой очистки от примесей и газов, проводить операции рафинирования с использованием шлаков. Это дает возможность получить в ЭЛУ металл (главным образом, тугоплавкие металлы и сплавы) более высокого качества по сравнению с ВДП, где невозможно прекращать наплавление слитка.

Конструкции и области применения ЭЛУ. Наиболее простая конструкция электронной плавильной установки показана на рис. 2.65, а. Это установка с кольцевым катодом и автоэлектронным нагревом, у которой анодом служит сам расплавляемый металл. Катод К представляет собой вольфрамовую спираль, нагретую до 2500 К с протекающим через нее током. Анодом А являются расплавляемый электрод и жидкометаллическая ванна, находящаяся в верхней части слитка, который образуется в кристаллизаторе.

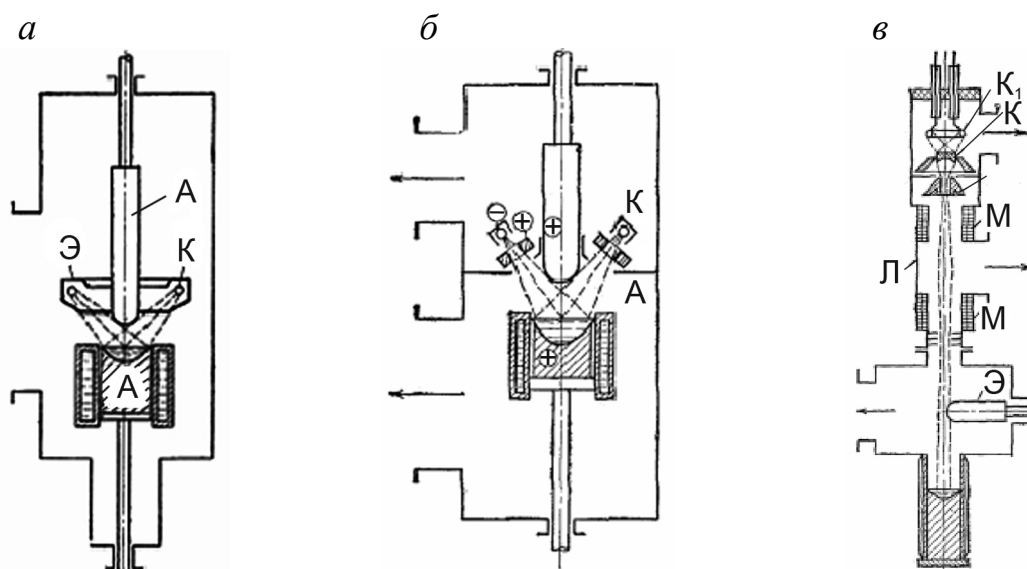


Рис. 2.65. Схемы ЭЛУ:

а – с кольцевым катодом, б – с радиальными пушками, в – с аксиальной пушкой

Катод окружен молибденовым экраном Э, находящимся под тем же потенциалом, что и катод. Электроны, выходящие из катода, отталкиваются экраном и в виде кольцевого пучка устремляются на электрод и жидкометаллическую ванну слитка. Конец электрода под действием бомбардирующих его электронов расплавляется, и металл каплями стекает в ванну. Поднимая и опуская электрод, можно изменять долю попадающих на него электронов, например, приподнять его так, чтобы полностью прекратить его плавление. В этом случае металл в ванне будет перегреваться или выдерживаться при постоянной температуре (в зависимости от тока, а следовательно, и мощности пучка). Печи с кольцевым катодом работают на напряжении 5–15 кВ.

Преимущество ЭЛУ – простота устройства и большая проводимость, благодаря чему в них можно получить токи пучка при низком напряжении. Однако эти печи обладают крупным недостатком: у них катод находится в плавильной камере, поэтому при газовыделении с поверхности ванны он оказывается в зоне повышенного давления. Выходящие из катода электроны, сталкиваясь с частицами газов, ионизируют их; образующиеся положительные ионы направляются к катоду и оседают на нем, при этом происходит отравление катода – сильно снижается его эмиссионная способность и сокращается срок службы. Кроме того, при значительном повышении давления может произойти разряд между электродом и катодом с разрушением последнего.

Ввиду этого плавильные установки с кольцевым катодом имеют ограниченное применение для переплава металлов с малым выделением газов.

Несколько лучше в этом отношении ЭЛУ с радиальными пушками (рис. 2.65, б), у которых вокруг электрода по радиусам 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 они и находятся под одинаковым потенциалом. Анод является направляющим и формообразующим устройством. Устройство, состоящее из катода и направляющего пучок анода, носит название *электронной пушки*.

Пространство, в котором находятся электронные пушки, отделено от плавильного пространства перегородкой с отверстиями для электрода и пучков электронов. Верхняя и нижняя части камеры имеют самостоятельные

откачные системы. Если выделение газов из ванны значительно увеличивается, то лишь часть паров металла попадает через отверстия в верхнюю камеру и откачивается ее насосом.

Поэтому в плавильных установках с радиальными пушками не наблюдается пробоев между катодом и анодом, однако их работа протекает удовлетворительно лишь при плавлении металлов с ограниченным газовыделением. Радиальные пушки работают со сравнительно низким ускоряющим напряжением (около 15 кВ), поэтому их мощность ограничена, и для создания, например, установки мощностью 150 кВт требуется расположить вокруг электрода девять пушек, что затрудняет управление ими.

Наибольшее распространение в настоящее время в качестве плавильных агрегатов получили ЭЛУ с аксиальными пушками (рис. 2.65, в).

Аксиальная пушка образует сильно сфокусированный электронный луч. Она имеет два катода. Основной катод К представляет собой массивную вогнутую снизу вольфрамовую пластину диаметром 2,5–4,0 см, разогреваемую до 2300–2500 К электронной бомбардировкой от вспомогательного катода K_1 , выполненного в виде нагреваемой током проволочной вольфрамовой спирали. Между обоими катодами приложено напряжение 3,5–5,0 кВ; вспомогательный катод относительно основного имеет отрицательный потенциал, так что основной катод является анодом для вспомогательного. Анод А имеет специальную форму с тем, чтобы создать в пространстве между ним и катодом такое электрическое поле, которое сфокусировало бы электронный пучок таким образом, чтобы он практически весь проходил через отверстие анода. Выйдя из анода, электронный пучок попадает в лучепровод Л, который соединяет катодную камеру с плавильной камерой установки. В последней находится электрод Э, который может перемещаться горизонтально: его можно вводить под пучок или выводить его конец из-под него. Часть электронов пучка проходит мимо конца электрода и попадает на поверхность жидкометаллической ванны, расположенной внизу плавильной камеры в кристаллизаторе.

Задача лучепровода – защитить катодный узел от прорыва в него газов из плавильной камеры. Для этой цели лучепровод откачивается своим насосом, помимо насосов, откачивающих катодный узел и рабочую камеру. Диафрагмы внизу лучепровода также затрудняют поступление газов по нему вверх. Так как на своем пути через лучепровод электронный пучок

расширяется, производится его дополнительная магнитная фокусировка (сжатие) с помощью магнитных линз М (соленоидов) (см. рис. 2.65, в).

В настоящее время плавильные электронные установки используются главным образом для переплава стали, молибдена и других тугоплавких и химически высокоактивных металлов. Электронные установки с аксиальными пушками работают при напряжениях 30–40 кВ, сварочные электронно-лучевые установки с особо остросфокусированным лучом работают при напряжениях 70–100 кВ.

Мощность плавильных ЭЛУ составляет от 50 (лабораторные установки) до 2000 кВт, сварочные ЭЛУ имеют мощность в десятки или сотни киловатт.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Классифицируйте теплообмен по способу передачи тепла.
2. Каковы принципы измерения и регулирования температуры?
3. Перечислите приборы температурного контроля.
4. Классифицируйте материалы в электротермии.
5. Дайте классификацию электротермических установок.
6. Какова физическая сущность нагрева сопротивлением?
7. Назовите нагревательные элементы печи сопротивления, перечислите их разновидности, конструкции и материалы.
8. Какие требования предъявляются к материалам, используемым в пещестроении?
9. Перечислите основные типы печей сопротивления, классифицируйте их.
10. Представьте разновидности и конструкции печей сопротивления непрерывного действия.
11. Представьте разновидности и конструкции печей сопротивления периодического действия.
12. Представьте разновидности и конструкции высокотемпературных электропечей.
13. Каковы особенности электрического расчета печи сопротивления?
14. Укажите принципы автоматического регулирования температурного режима печей сопротивления.
15. Какова физическая сущность индукционного нагрева?

16. Проведите классификацию установки индукционного нагрева.
17. Перечислите основные типы индукционных печей. Объясните их принцип работы и назначение.
18. Представьте конструкцию канальной печи, ее основные конструктивные элементы, устройство индукционных единиц.
19. Представьте разновидности и конструкции тигельных печей.
20. Объясните сущность и разновидности индукционного нагрева под термообработку заготовок и деталей.
21. Какова физическая сущность диэлектрического нагрева?
22. Приведите и охарактеризуйте виды поляризации.
23. Что такое коэффициент диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость вещества? Как влияет на них изменение частоты электрического поля?
24. Представьте конструкцию установок диэлектрического нагрева, их применение.
25. Объясните процесс ионизации газа и приведите основные виды ионизации в столбе дуги.
26. Какова структура электродугового разряда?
27. Назовите способы регулирования режима дуги.
28. Приведите классификацию и конструкции электродуговых печей.
29. Укажите этапы получения стали в электродуговых печах.
30. Перечислите электрооборудование электродуговых печных установок и требования, предъявляемые к нему.
31. Проанализируйте характеристики электродуговых печей. Как определить оптимальный режим работы печи?
32. Укажите назначение и основные конструктивные элементы вакуумных дуговых печей.
33. Какова структурная схема САУ вакуумных дуговых печей?
34. Укажите назначение и основные конструктивные элементы печей электрошлакового переплава.
35. Поясните процесс электрошлакового переплава.
36. Укажите назначение и особенности рудно-термических печей.
37. Назовите основные группы процессов и конструкции РТП.
38. Укажите электрооборудование рудно-термических печей и их отличие от электрооборудования электродуговых печей.
39. Что такое плазма и каковы способы ее получения?

40. Опишите схемы плазмотронов и охарактеризуйте способы стабилизации плазменной дуги.
41. Укажите область применения плазмотронов.
42. Объясните принцип электронного нагрева.
43. Каковы устройство электронно-лучевой установки и особенности конструктивного исполнения электронных пушек?
44. Укажите область применения электронно-лучевых установок.

Заключение

Первая часть учебного пособия «Электротехнологические установки» в основном посвящена электротермии. Данная технология позволяет получать чистые металлы и сплавы, обеспечить плавку и термическую обработку материалов и изделий, осуществлять их сварку, резку и т. д.

В первой части данного пособия описаны следующие технологические процессы и методы обработки материалов: электротермические процессы, в которых используется превращение электрической энергии в тепловую для нагрева материалов и изделий в целях изменения их свойств или формы, а также для их плавления и испарения.

В работе излагается физическая сущность электротермических процессов, приводятся конструкции наиболее широко используемых установок, описывается их принцип действия и применение. Также в пособии отражены вопросы, связанные с контролем технологических параметров, управлением и автоматизацией. Пособие включает в себя значительный учебный материал, систематизированный и иллюстрированный, способствующий глубокому пониманию сущности процессов и спектра применения электротермических установок. Материал учебного пособия может использоваться студентами, обучающимися по профилям, связанным с изучением электротехнологий, в курсовом и дипломном проектировании, а также он может быть полезен преподавателям в их практической работе.

Список используемой литературы

1. *Бейтмен Г.* Высшие трансцендентные функции: функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. Москва: Физматгиз, 1966. 296 с.
2. *Болотов А. В.* Электротехнологические установки: учебник для вузов / А. В. Болотов, Г. А. Шепель. Москва: Высшая школа, 1988. 336 с.
3. *Электротехнологические* промышленные установки: учебник для вузов / И. П. Евтюкова [и др.]. Москва: Энергоиздат, 1982. 400 с.

Учебное издание

Щеклеина Ирина Леонтьевна

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Часть 1

Учебное пособие

Редактор Е. В. Евстигнеева

Компьютерная верстка Н. А. Ушениной

Печатается по постановлению

редакционно-издательского совета университета

Подписано в печать 02.11.15. Формат 60×84/16. Бумага для множ. аппаратов.
Печать плоская. Усл. печ. л. 9,6. Уч.-изд. л. 9,8. Тираж 100 экз. Заказ № ____.
Издательство Российского государственного профессионально-педагогического университета. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.
