

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

---

**Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Сибирский федеральный университет»**

А.И. Алиферов Ю.И. Блинов С.А. Бояков С.А. Галунин  
Е.А. Головенко Л.П. Горева Е.С. Кинев Г.Е.Кирко И.Г. Кирко  
В.В. Ковальский А.В. Комаров Е.В. Кузнецов В.Ю. Неверов К.А. Михайлов  
Е.А. Павлов С.Ф. Сарапулов Ф.Н. Сарапулов В.Н. Тимофеев В.Н. Федоров

**Электротермические процессы и установки**

**Учебное пособие по теоретическому курсу**

Красноярск 2007 г.

**УДК**  
**ББК**  
**С**

Рецензенты:

Авторы и составители:

А. И. Алиферов  
Ю. И. Блинов  
С. А. Галунин  
Е. А. Головенко  
Л. П. Горева  
Л.С. Грובה  
В.В. Ковальский  
Е.В. Кузнецов

В.Ю. Неверов  
М.В. Первухин  
С. Ф. Сарапулов  
Ф. Н. Сарапулов  
Н.В. Сергеев  
Б.А. Сокунов  
П.А. Хоменков  
Д.В. Хохлов

**Электротермические процессы и установки:** Учебное пособие по теоретическому курсу/ Под ред. В.Н. Тимофеева, Е.А. Головенко, Е.В. Кузнецова – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007.

ISBN

В учебном пособии приведены основы применения электротермических установок, рассмотрены различные конструкции электрических печей сопротивления, установок индукционного нагрева, дуговых печей и специального электротермического оборудования, изложены программы теплового и электрического расчета различного электротермического оборудования.

Данное пособие предназначено для бакалавров и магистров направления 140200 «Электроэнергетика и электротехника», также может быть использовано для других направлений.

**УДК**  
**ББК**

ISBN

© ФГОУ ВПО «Сибирский  
федеральный университет»

## ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемое учебное пособие в известной степени обобщает многочисленные разработки авторов в области электротермических процессов и установок, а также содержит материалы по тепловому и электрическому расчету электрических печей сопротивления, индукционных канальных и тигельных печей. Материал пособия основан на работах авторов, выполненных в Санкт-петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» при участии проф. Блинова Ю.И., доцента Галунина С.А. и др., Уральском государственном техническом университете «УПИ» при участии проф. Сарапулова Ф.Н., Сарапулова С.Ф. и др., Новосибирском государственном техническом университете «НЭТИ» при участии проф. Алиферова А. И., доцента Горевой Л. П. и др., Сибирском федеральном университете при участии проф. Тимофеева В.Н., доцента Боякова С. А. и др.

В первой части учебного пособия даны основы применения электротермических процессов и установок, рассмотрены основные классы электротермического оборудования, даны основы теории теплопередачи, рассмотрены различные материалы, применяемые в электротермии, дана общая информация по рациональной эксплуатации электротермического оборудования.

Во второй части пособия изложены область применения и классификация электрических печей сопротивления, рассмотрены основные виды ЭПС периодического и непрерывного действия, приведена методика теплового и электрического расчета печи сопротивления.

В третьей части пособия изложены физические основы индукционного нагрева, описаны области применения и принципы действия канальных и тигельных индукционных печей, приведены методики расчета канальных и тигельных печей, изложена общая информация и методах поверхностной закалки и высокочастотной сварки.

В четвертой части данного пособия рассмотрены общие вопросы по теории дуговых печей, приведены особенности технологических процессов, происходящих в дуговых печах, рассмотрены вопросы проектирования дуговых печей.

В пятой части учебного пособия рассмотрено специальное электротермическое оборудование.

Работа над пособием распределилась следующим образом:

А. И. Алиферов

Ю. И. Блинов

С. А. Галунин

Е. А. Головенко

Л. П. Горева

Л.С. Грובה

В.В. Ковальский

Е.В. Кузнецов

В. Ю. Неверов

М.В. Первухин

С. Ф. Сарапулов

Ф. Н. Сарапулов

Н.В. Сергеев

Б.А. Сокунов

П.А. Хоменков

Д.В. Хохлов

## СОДЕРЖАНИЕ

		стр.
<b>1</b>	<b>ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТАНОВОК</b>	10
1.1	Электротермическое оборудование (ЭТО). Область применения и классификация	10
1.1.1	Виды теплопередачи	10
1.1.2	Влияние изменения температуры на электро- и теплофизические свойства материала	12
1.1.3	Классификация электротехнологических установок	15
1.1.4	Электротермические установки	16
1.1.4.1	Классификация электротермического оборудования	17
1.2	Теплопередача, Материалы, применяемые в электротермии	32
1.2.1	Теплопередача	32
1.2.2	Материалы для электротермических установок	36
1.2.2.1	Огнеупорные материалы	37
1.2.2.1.1	Достаточная огнеупорность	38
1.2.2.1.2	Достаточная механическая прочность при высоких температурах	42
1.2.2.1.3	Достаточная термостойкость	43
1.2.2.1.4	Сопrotивляемость химическим воздействиям при нормальных и высоких температурах	44
1.2.2.1.5	Достаточно малые теплопроводность и теплоемкость	44
1.2.2.1.6	Малая электрическая проводимость и достаточная электрическая прочность при низких и высоких температурах	44 45
1.2.2.1.7	Низкая стоимость, технологичность изготовления	
1.2.2.2	Огнеупорные растворы, бетоны, набивные массы и обмазки	49
1.2.3	Теплоизоляционные материалы	49
1.2.4	Жаропрочные материалы	52
1.2.5	Материалы для нагревательных элементов электropечей сопротивления	54
1.3	Рациональная эксплуатация электрических печей сопротивления.	62
<b>2</b>	<b>ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ</b>	83
2.1	Область применения и классификация. Основные параметры и режимы работ	83
2.1.1	Основные виды ЭПС периодического действия	84
2.1.2	Основные виды ЭПС непрерывного действия	97
2.2	Тепловые и электрические расчеты электрических печей сопротивления	106
2.2.1	Тепловой расчет электрических печей сопротивления	106

2.2.1.1	Определение времени нагрева и остывания изделий в печах периодического действия	106
2.2.1.2	Нагрев тонких изделий	107
2.2.1.3	Остывание тонких изделий	112
2.2.1.4	Нагрев массивных изделий	115
2.2.2	Электрический расчет электрических печей сопротивления	117
2.3.	Проектирование электропечей сопротивления периодического действия	126
2.3.1	Примеры расчета установленной мощности ЭПС	129
2.3.2	Инженерная методика расчета нагревателей электрических цепей	135
<b>3</b>	<b>ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ И УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА</b>	<b>146</b>
3.1	Область применения и классификация. Физические основы индукционного метода нагрева	146
3.1.1	Область применения и классификация	146
3.1.1.1	Преимущества индукционного нагрева	147
3.1.1.2	Область применения индукционных установок	147
3.1.2	Физические основы индукционного нагрева и электроконтактного нагрева	148
3.1.2.1	Характеристики электрического поля	150
3.1.2.2	Характеристики магнитного поля	151
3.1.2.3	Закон полного тока	153
3.1.2.4	Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея-Максвелла-Ленца)	154
3.1.2.5	Закон Джоуля-Ленца	155
3.1.3	Поверхностный эффект в проводниках	156
3.1.3.1	Поверхностный эффект в цилиндрическом проводнике	156
3.1.3.2	Глубина проникновения электромагнитной волны	158
3.1.3.3	Активный слой	160
3.1.3.4	Эффект близости	162
3.1.3.5	Эффект кольцевой	165
3.1.3.6	Эффект паза	166
3.2	Индукционные каналные и тигельные печи	168
3.2.1	Индукционные каналные печи	168
3.2.1.1	Назначение индукционных каналных печей	168
3.2.1.2	Принцип действия индукционной каналной печи	170
3.2.1.3	Конструкция индукционных каналных печей	174
3.2.2	Индукционные тигельные печи	180
3.2.2.1	Назначение индукционных тигельных печей	180
3.2.2.2	Принцип действия индукционной тигельной печи	187
3.2.2.3	Циркуляция металлов в тигельной печи	190

3.3.1	Расчет и проектирование индукционных канальных печей	194
3.3.1.1	Определение емкости печи	195
3.3.1.2	Объем ванны печи, заполняемый жидким металлом (сливаемым)	196
3.3.1.3	Выбор формы ванны печи	197
3.3.1.4	Определение мощности печи	199
3.3.2	Расчет и проектирование индукционной тигельной печи	203
3.3.2.1	Определение основных геометрических размеров печи	206
3.3.2.2	Тепловой расчет тигельной печи	211
3.3.2.3	Определение мощности печи	211
3.3.2.4	Выбор частоты питания индуктора	213
3.4	Индукционные нагревательные установки	218
3.4.1	Основные понятия и определения в технике индукционного нагрева	218
3.4.2	Особенности индукционных установок сквозного нагрева	220
3.4.3	Особенности индукционного нагрева черных и цветных металлов	221
3.4.4	Классификация индукционных нагревателей для сквозного нагрева по принципу действия	225
3.4.5	Индукторы нагревателей для сквозного нагрева	228
3.4.6	Схемы силового электропитания установок индукционного нагрева	230
3.4.7	Требования к индукционным установкам сквозного нагрева	235
3.4.8	Способы повышения эффективности установок индукционного нагрева	236
3.5.1	Методы расчета установок индукционного нагрева	239
3.5.1.1	Методы электромагнитных расчетов индукционных систем	240
3.5.1.2	Методы расчета температурного поля в загрузке	242
3.5.1.3	Методы анализа электрических процессов в схемах силового питания установок индукционного нагрева	244
3.5.1.4	Применение коммерческих пакетов программ	245
3.5.2	Инженерная методика расчёта индукционных установок для нагрева цилиндрической немагнитной загрузки	247
3.5.2.1	Определение размеров индуктора, мощности и частоты питающего напряжения	247
3.5.2.2	Определение частоты питающего напряжения	248
3.5.2.3	Определение времени нагрева и средней мощности, подводимой к заготовке	248
3.5.2.4	Расчет параметров схемы замещения интегральных характеристик системы «индуктор-деталь»	249
3.5.2.5	Расчёт конденсаторной батареи	255
3.5.2.6	Расчет водоохлаждения индуктора	255

3.5.2.7	Расчет воздушного охлаждения индуктора	257
3.6	Индукционные установки для поверхностной закалки	260
3.6.1	Основные типы закалочных индукторов	260
3.6.1.1	Индукторы для внешних цилиндрических поверхностей	261
3.6.1.2	Индукторы для закалки плоских поверхностей	262
3.6.1.3	Индукторы для внутренних поверхностей	262
3.6.2	Выбор частоты	263
3.6.3	Тепловой расчет	265
3.6.4	Определение геометрических размеров индуктора	268
3.6.5	Закалочное оборудование	269
3.7	Исследование процессов высокочастотной сварки	271
3.7.1	Общие понятия о высокочастотной сварке металлов	271
3.7.2	Механизм процесса высокочастотной сварки.	274
3.7.3	Применение высокочастотной сварки	282
<b>4</b>	<b>ДУГОВЫЕ ПЕЧИ</b>	<b>283</b>
4.1	Область применения и особенности технологических процессов	283
4.1.1	Концепция сверхмощной дуговой печи	284
4.1.2	Технология производства стали в сверхмощной ДСП	286
4.1.3	Заправка печи	287
4.1.4	Завалка шихты	288
4.1.5	Плавление шихты	289
4.1.6	Особенности окислительного периода плавки и доводки	293
4.1.7	Внепечная обработка стали	294
4.1.8	Способы вакуумирования	296
4.1.9	Продувка инертными газами	300
4.1.10	Современные тенденции развития электросталеплавильного производства	301
4.2	Расчет и проектирование дуговых печей	304
4.2.1	Футеровка печи	304
4.2.3	Водоохлаждаемый свод	307
4.2.4	Схема впуска металла	308
4.2.5	Конструктивные решения элементов токоподвода	311
4.2.5.1	Кабельные гирлянды	311
4.2.5.2	Электроды	312
4.2.5.3	Подвижная часть вторичного токопровода	314
4.2.5.3	Анализ и сравнение основных характеристик электрододержателей	314
4.2.5.4	Материалы токопроводящих рукавов	317
4.2.5.5	Конструкции и эксплуатационные характеристики токопроводящих рукавов	318
4.2.6	Энергетический баланс дуговой сталеплавильной печи	319



4.2.7	Тепловые потери дуговых печей	322
4.2.7.1	Тепловые потери через футеровку и с охлаждающей водой	322
4.2.7.2	Тепловые потери с отходящими газами	325
<b>5</b>	<b>СПЕЦИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ</b>	<b>327</b>
5.1	Плазменные нагревательные устройства	327
5.1.1	Принцип действия и области применения плазменного нагрева	327
5.1.2	Устройство и рабочий процесс плазмотрона	331
5.1.3	Струйные плазмотроны	333
5.2.4	Плавильные плазмотроны	333
5.2	Электронно-лучевые печи	335
5.3	Печи электрошлакового переплава	340
5.4	Бытовые электронагревательные приборы	346
	<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b>	<b>348</b>

# 1 ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТАНОВОК

## 1.1 Электротермическое оборудование (ЭТО). Область применения и классификация

### 1.1.1 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 [6, 8].

Различают стационарный и нестационарный теплообмен (рис. 1.1).

Существуют три вида теплообмена, три различных способа передачи тепла (рис. 1.2).

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

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 эта лучистая энергия вновь превращается (полностью или частично) в тепло, нагревая эти тела.

При излучении нагретого тела в неограниченное пространство (при односторонней теплопередаче) лучистый тепловой поток пропорционален постоянному коэффициенту излучения абсолютно черного тела, степени

черноты тела, численно равной его поглощающей способности, и абсолютной температуре нагретого тела.

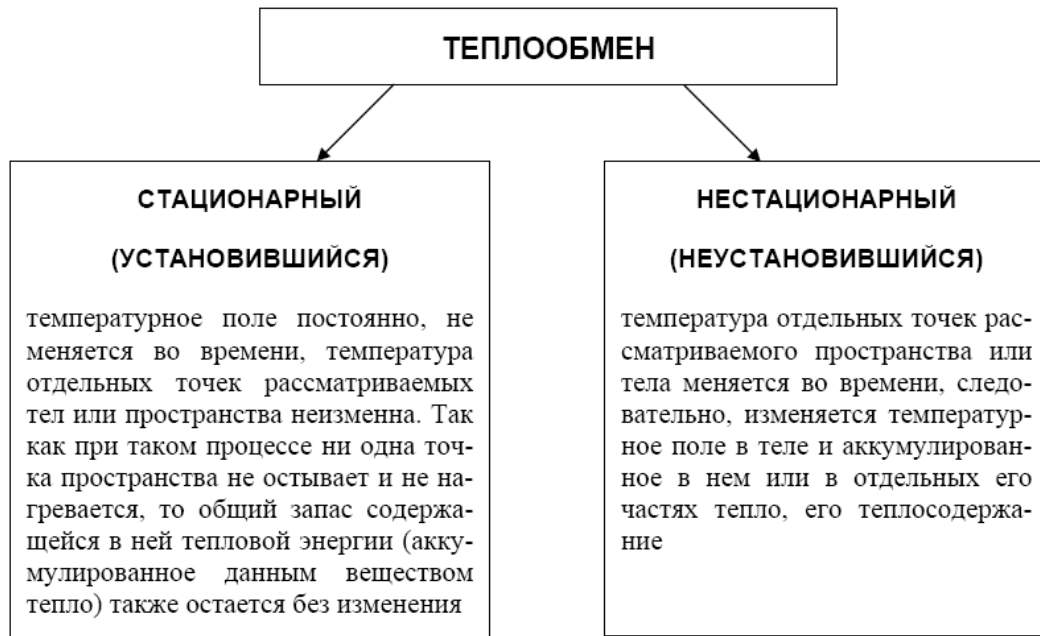


Рис. 1.1. Классификация теплообмена

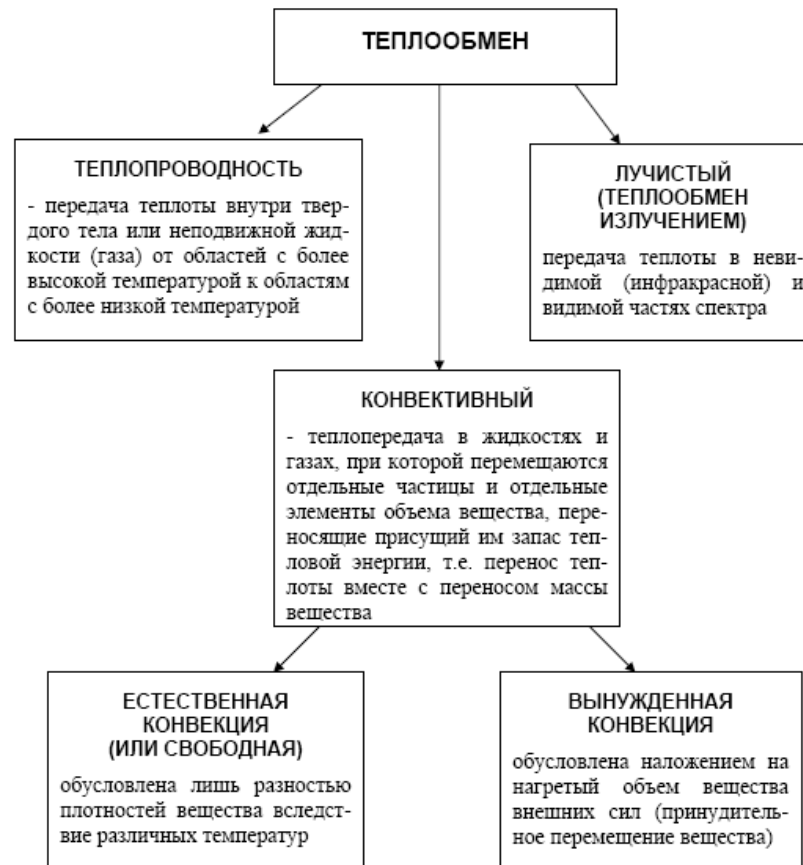


Рис. 1.2. Классификация теплообмена по способу передачи тепла

При излучении нагретого тела в неограниченное пространство (при односторонней теплопередаче) лучистый тепловой поток пропорционален постоянному коэффициенту излучения абсолютно черного тела, степени черноты тела, численно равной его поглощающей способности, и абсолютной температуре нагретого тела.

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. Тепловой поток конвективного теплообмена определяют на основании закона Ньютона - Рихмана. По этому закону тепловой поток прямо пропорционален поверхности омывания, режиму движения теплоносителя (коэффициент теплоотдачи) и разности температур стенки и газа или жидкости.

### 1.1.2 Влияние изменения температуры на электро- и теплофизические свойства материала

С увеличением температуры происходит изменение электрофизических, теплофизических и магнитных свойств материалов и веществ (рис. 1.3 – 1.4) [6,10,11].

При изменении температуры наблюдается рост удельного сопротивления металлов. Скачкообразное изменение удельного сопротивления соответствует переходу металла из одного агрегатного состояния в другое (из твердого - в жидкое состояние) (рис. 1.3).

Изменение относительной магнитной проницаемости, показанное на рис. 1.4, характерно только для ферромагнитных металлов.

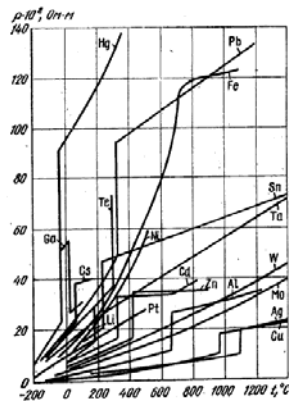


Рис. 1.3. Зависимость удельного электрического сопротивления некоторых металлов от температуры

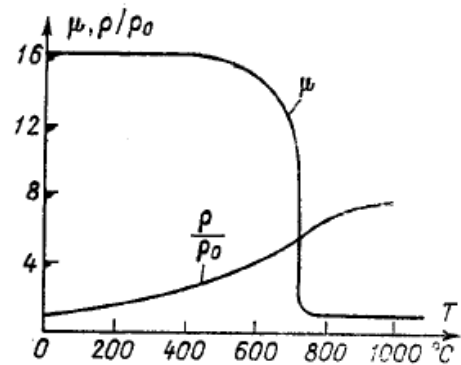


Рис. 1.4. Зависимость относительной магнитной проницаемости и удельного сопротивления от температуры для среднеуглеродистой стали

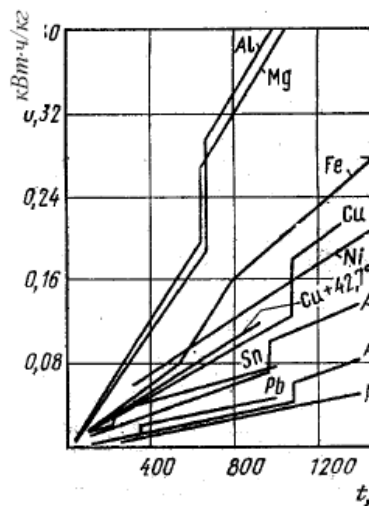


Рис. 1.5. Энтальпия различных металлов

При температуре, соответствующей точке Кюри (ориентировочно  $730 - 750^{\circ}\text{C}$ ), металл теряет свои магнитные свойства, и относительная магнитная проницаемость становится равной единице.

Изменение энтальпии (теплосодержания) для металлов, показанное на рис. 1.5, имеет такой же характерный переход при изменении агрегатного состояния, что и изменение удельного сопротивления.

Изменение коэффициента теплопроводности для некоторых газов и жидкостей (рис. 1.6, 1.7) связано с явлением переноса некоторого количества тепла в различных слоях жидкости или газа.

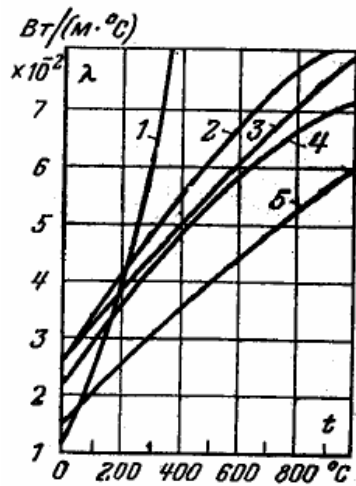


Рис. 1.6. Зависимости коэффициентов теплопроводности некоторых газов от температуры:

1 - водяной пар; 2 - кислород; 3 - воздух; 4 - азот; 5 - аргон

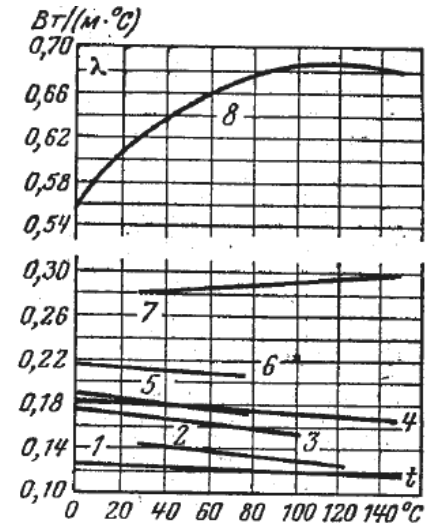


Рис. 1.7. Зависимости коэффициентов теплопроводности некоторых капельных жидкостей от температуры:

1 - вазелиновое масло; 2 - бензол; 3 - ацетон; 4 - касторовое масло; 5 - этиловый спирт; 6 - метиловый спирт; 7 - глицерин; 8 - вода

Собственно коэффициент теплопроводности численно равен количеству тепла, переносимого через единицу поверхности за единицу времени при градиенте температуры равном единице. Для различных жидкостей и газов изменение коэффициента теплопроводности (в зависимости от изменения температуры) проявляется по-разному, что связано с явлением переноса внутренней энергии, зависящим от распределения молекул жидкостей и газов по скоростям. Изменение теплопроводности металлов (рис. 1.8) происходит по закону Видемана - Франца, в соответствии с которым для всех металлов отношение коэффициента теплопроводности к удельной электропроводности прямо пропорционально абсолютной температуре.

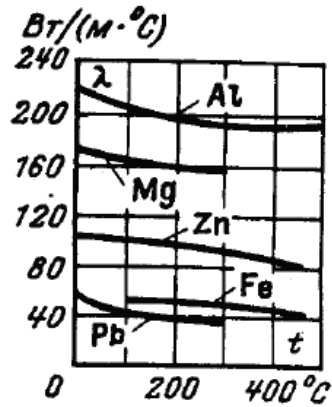


Рис. 1.8. Зависимости Коэффициентов теплопроводности некоторых металлов от температуры

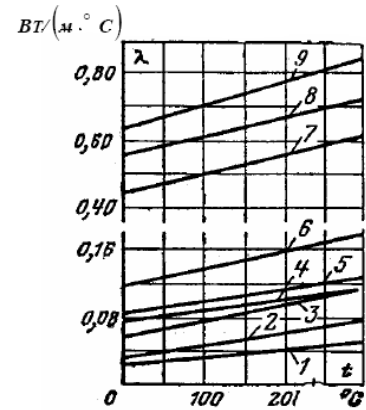


Рис. 1.9. Зависимости коэффициентов теплопроводности некоторых теплоизоляционных и огнеупорных материалов от температуры:

1 - воздух; 2 - минеральная шерсть, плотность  $160 \text{ кг/м}^3$ ; 3 - шлаковая вата, плотность  $200 \text{ кг/м}^3$ ; 4 - ньювель, плотность  $340 \text{ кг/м}^3$ ; 5 - совелит, плотность  $140 \text{ кг/м}^3$ ; 6 - диатомитовый кирпич, плотность  $550 \text{ кг/м}^3$ ; 7 - красный кирпич, плотность  $1670 \text{ кг/м}^3$ ; 8 - шлакобетонный кирпич, плотность  $1370 \text{ кг/м}^3$ ; 9 - шамотный кирпич, плотность  $1840 \text{ кг/м}^3$

Закон Видемана- Франца является следствием того, что теплопроводность металлов, как и их электропроводность, осуществляется свободными электронами [7].

Изменение теплопроводности огнеупорных и теплоизоляционных материалов, представленных на рис. 1.9, показывает, что для большинства этих изделий с ростом температуры наблюдается увеличение коэффициента теплопроводности. Однако следует отметить, что наряду с приведенными материалами существуют и такие, у которых с ростом температуры коэффициент теплопроводности уменьшается (муллитовые, карборундовые изделия, хромомagneзитовый кирпич).

### 1.1.3 Классификация электротехнологических установок

Установки, в которых происходит превращение электрической энергии в другие виды с одновременным осуществлением технологических процессов, в результате которых происходит изменение вещества, называют *электротехнологическими*.

Основные группы *электротехнологических* установок общепромышленного назначения представлены на блок-схеме (рис. 1.10).



Рис. 1.10. Основные группы электротехнологических установок общепромышленного назначения

**ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ** применяются в промышленности для термообработки металлов под пластическую деформацию, закалку, плавнения, 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-химико-механической обработки изделий в электролитах.

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ** применяются в промышленности для ультразвукового воздействия на обрабатываемый материал, магнито-импульсной обработки металлов.



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

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ - установки, представляющие совокупность различного рода воздействий, в частности перенос энергии за счет электромагнитного поля.

#### 1.1.4 Электротермические установки

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

*Электронагрев (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 полей температур в нагреваемом пространстве;
- строгий контроль и точное регулирование длительности выделения энергии;
- гибкость в управлении потоками энергии;
- возможность нагрева материалов изделий в газовых средах любого химического состава и вакууме;
- выделение тепловой энергии непосредственно в нагреваемом веществе.

Использование электронагрева вместо пламенного в некоторых технологических процессах позволяет получить большую экономию топлива и сократить количество обслуживающего персонала. Внедрение электротермии также обеспечивает экономию материальных и трудовых ресурсов, что в конечном результате приводит к повышению экономической эффективности.

Вся литература и информация об электронагреве подбирается и учитывается по международной системе - универсальная десятичная классификация (УДК) [17]. Каждому понятию присваивается индекс УДК, например

- электропечи сопротивления - УДК 621.365.3;
- индукционные печи - УДК 621.365.5;

- вакуумные индукционные печи - УДК 621.365.55 - 982.

#### 1.1.4.1 Классификация электротермического оборудования

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

*Электротермическое оборудование (ЭТО)* – это оборудование, предназначенное для технологического процесса тепловой обработки с использованием электроэнергии в качестве основного энергоносителя. Классификация ЭТО показана на рис. 1.11.

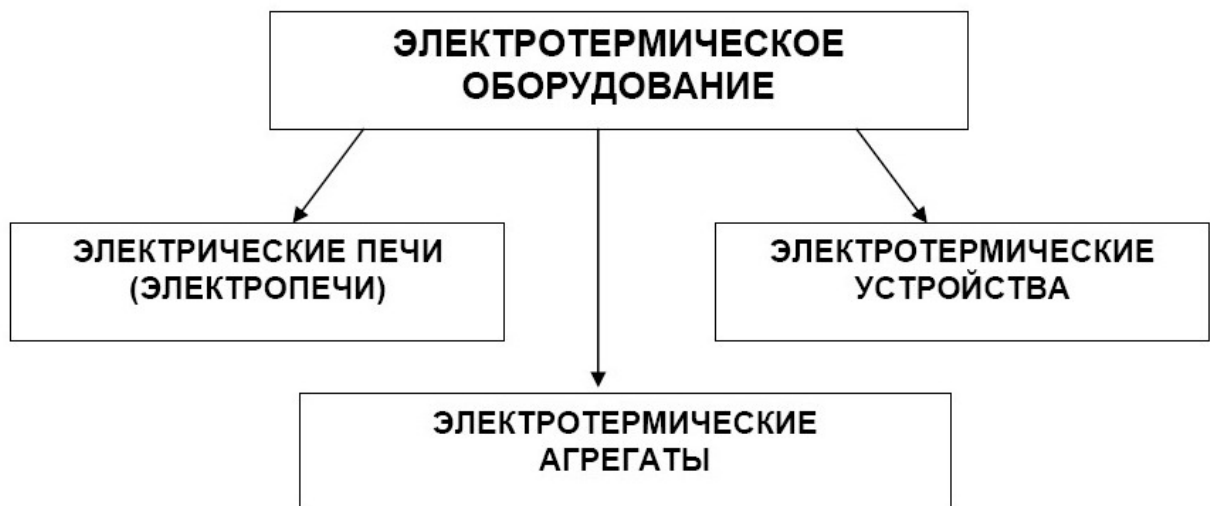


Рис. 1.11. Классификация электротермического оборудования

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

*Электротермические устройства* - оборудование без нагревательной камеры.

Совокупность конструктивно связанных электропечей, устройств и другого технологического оборудования (трансформирующего, охлаждающего, моечного и др.) называется *электротермическими агрегатами*.

Классификация электротермического оборудования по методу нагрева представлена на рис. 1.12 [12 - 15].

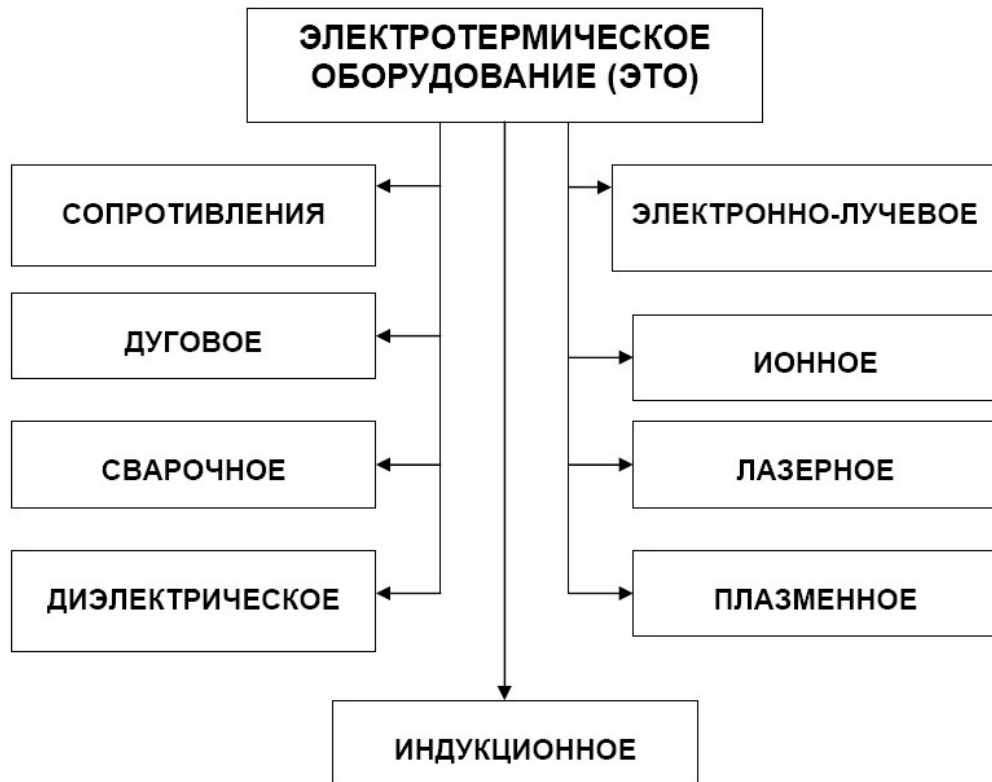


Рис. 1.12. Классификация электротермического оборудования по методу нагрева

В ЭТО *сопротивления* [12, 18, 19, 20, 23, 25] происходит выделение теплоты в твердых или жидких телах, включенных непосредственно в электрическую цепь, при протекании по ним электрического тока. На рис. 1.13 приведены схемы нагрева сопротивлением.

Нагрев сопротивлением основан на законе Джоуля - Ленца, по которому при протекании тока в проводнике выделяется тепло, пропорциональное его электрическому сопротивлению, квадрату тока и времени прохождения тока. Ток может протекать по самому нагреваемому телу - прямой нагрев или по специальному нагревателю, от которого выделяемое тепло передается к нагреваемому телу теплообменом, такой нагрев называется косвенным.

При косвенном нагреве различают три вида теплообмена: излучением, конвекцией и теплопроводностью. При высоких температурах определяющее значение имеет нагрев излучением. В нагреве излучением выделяется инфракрасный нагрев, основанный на подборе спектрального состава излучения с учетом свойств материалов избирательно поглощать или пропускать его.

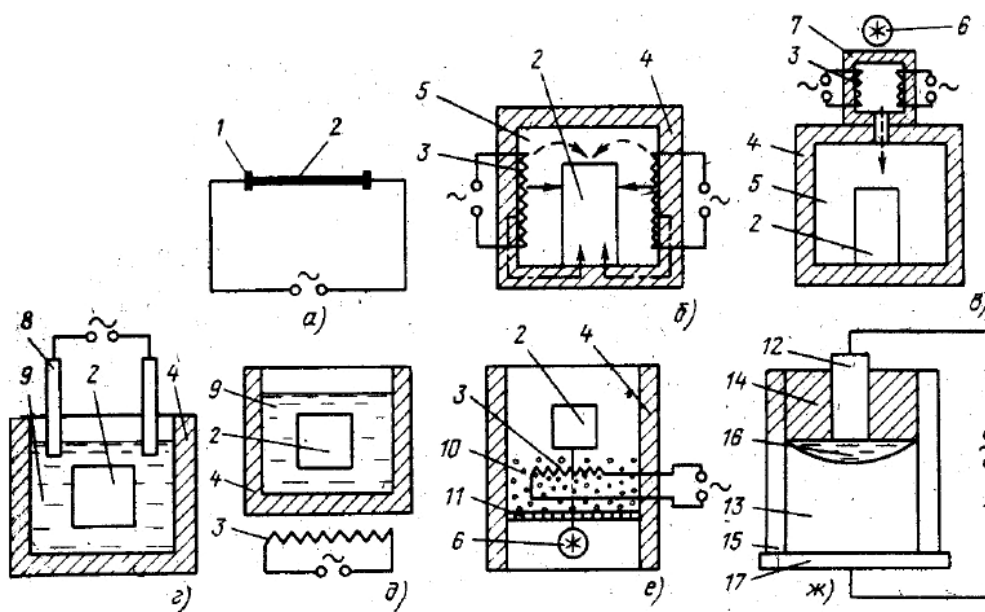


Рис. 1.13. Схемы нагрева сопротивлением

а - прямой; б - косвенный; в - конвекцией с калорифером;  
г - электродный в жидкой среде; д - в жидкой среде с внешним обогревом;  
е - в псевдокипящем слое, ж - электрошлаковый:

1 - контактная система; 2 - нагреваемое тело; 3 - нагреватель; 4 - футеровка;  
5 - рабочее пространство; 6 - вентилятор; 7 - калорифер; 8 - электрод; 9 - жидкая среда;  
10 - мелкие частицы; 11 - решетка; 12 - расходующий электрод; 13 - слиток;  
14 - шлаковая ванна; 15 - водоохлаждаемый кристаллизатор; 16 - жидкая металлическая ванна; 17 - поддон

Вид теплопередачи:

сплошные стрелки - излучением; пунктирные - конвекцией; штрих-пунктирные - теплопроводностью

Как показано на рис. 1.14 [4, 12, 28], падающий на полупрозрачное тело поток излучения в общем случае разделяется на три составляющие:

отраженный, пропущенный и поглощенный потоки. Первые две рассеиваются в пространстве, третья превращается в тепловую энергию. Соотношение между этими составляющими зависит от спектра излучения нагревателя и свойств нагреваемого тела.

Подбор спектра нагревателя, соответствующего характеристикам нагреваемого материала, позволяет получать желаемые технологические результаты.

В дуговом ЭТО [3, 12, 25 - 27] происходит выделение теплоты в электрической дуге. Материал нагревается за счет теплоты, поступающей в него из опорных пятен дуги, а также вследствие теплообмена с дугой и электродами.

На рис. 1.15 представлены схемы дугового нагрева.

В индукционном ЭТО [10 - 12, 29 - 31] происходит передача электроэнергии нагреваемому телу, помещенному в переменное электрическое поле, и превращение ее в тепловую энергию при протекании индуцированных токов в нагреваемом теле. На рис. 1.16 представлены схемы индукционного нагрева.

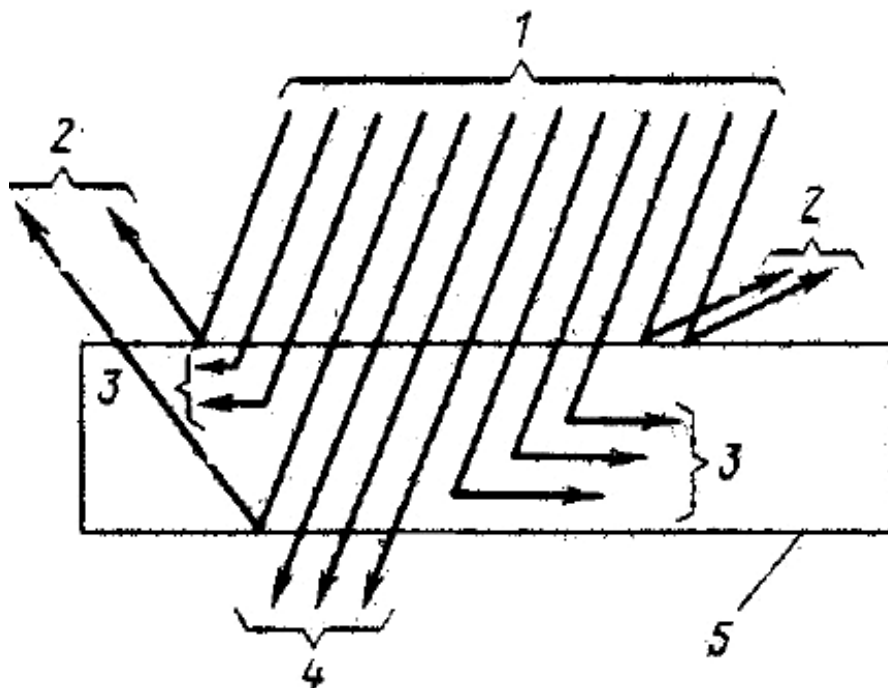


Рис. 1.14 – Нагрев полупрозрачных тел излучением  
1 - падающее излучение; 2 - отраженное излучение; 3 - поглощенное излучение; 4 - пропущенное излучение; 5 - нагреваемое тело

В диэлектрическом ЭТО [3, 4, 12] происходит выделение теплоты в диэлектриках и полупроводниках, помещенных в переменное электрическое поле, за счет перемещения электрических зарядов при электрической поляризации.

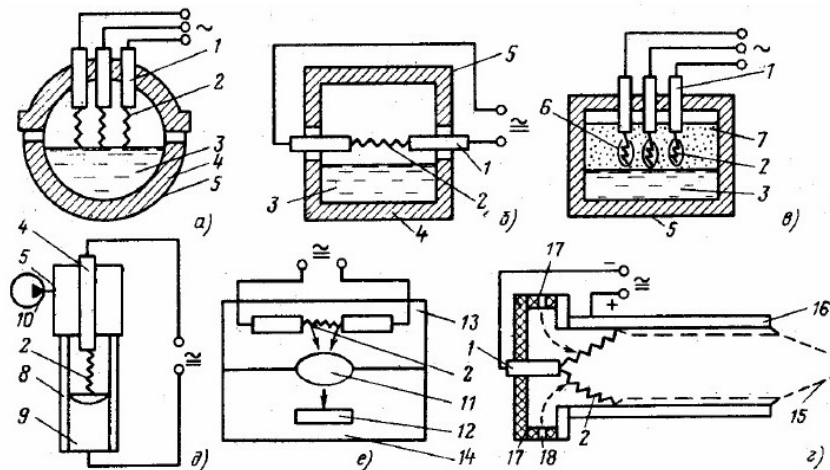


Рис. 1.15. Схемы дугового нагрева:

а - прямой; б - косвенный; в - смешанный; г - дуговой плазмотрон;  
д - вакуумно-дуговой; е - оптический дуговой:

1 - электрод; 2 - электрическая дуга; 3 - расплавленный металл; 4 - футеровка;  
5 - корпус печи; 6 - газовая полость; 7 - слой шихты; 8 - охлаждаемый кристаллизатор;  
9 - слиток металла; 10 - вакуумная система; 11 - оптическая система;  
12 - нагреваемое тело; 13 - дуговая камера; 14 - технологическая камера;  
15 - струя плазмы; 16 - корпус плазмотрона (анод); 17 - электроизоляционный узел;  
18 - подвод газа

Сплошными стрелками показана теплопередача излучением,  
пунктиром – поток газа.

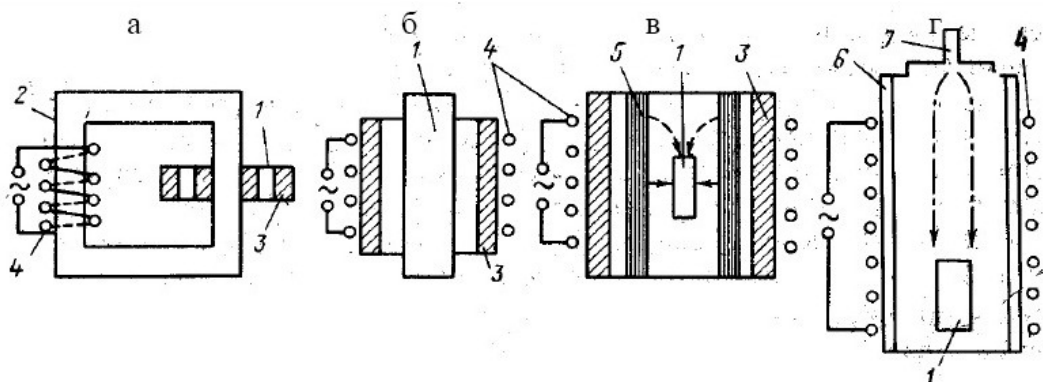


Рис. 1.16. Схемы индукционного нагрева:

а - с магнитопроводом; б - без магнитопровода;  
в - косвенный нагрев с промежуточным нагревателем;  
г - индукционно-плазменный:

1 - нагреваемое тело; 2 - магнитопровод; 3 - футеровка; 4 - индук

тор; 5 - промежуточный нагреватель; 6 - кварцевая труба; 7 - подвод газа

Род теплопередачи: сплошные стрелки - излучением; пунктирные - конвекцией.

Штрих-пунктирными стрелками обозначен поток ионизированного газа.

На рис. 1.17 представлены схемы диэлектрического нагрева.

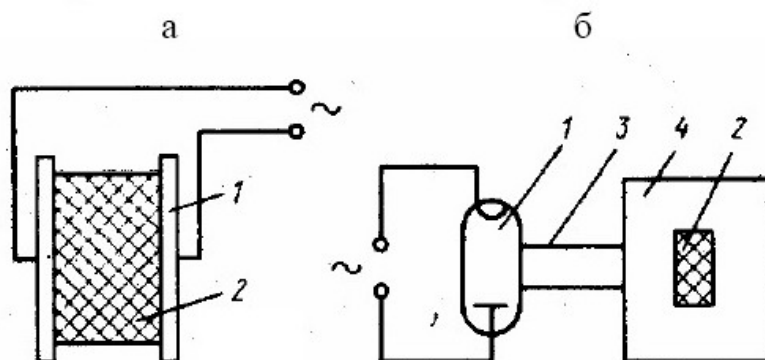


Рис. 1.17. Схемы диэлектрического нагрева:

а - в электрическом поле; б - в электромагнитном поле (сверхвысокочастотном):

1 - электроды; 2 - нагреваемое тело; 3 - волновод; 4 - резонатор

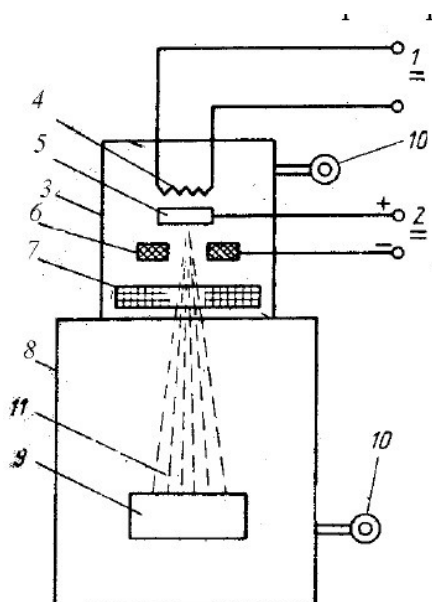


Рис. 1.18. Схема электронно-лучевого нагрева с аксиальной электронной пушкой:

1 - выводы к источнику

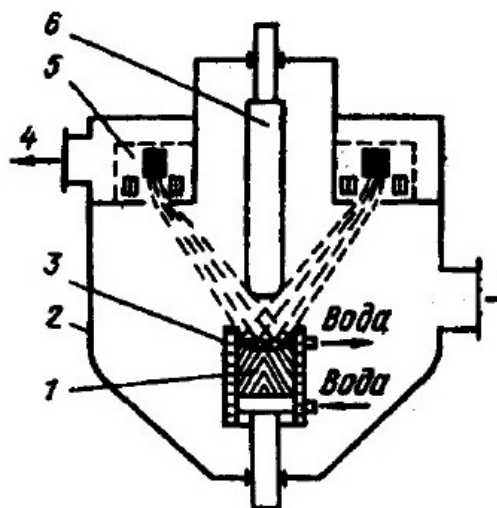


Рис. 1.19. Схема электронно-лучевой печи:

1 - слиток, 2 - плавильная камера, 3 - кристаллизатор, 4 -

питания подогревом; 2- выводы к основному источнику питания; 3- электронная пушка, 4 - катод подогрева, 5 - катод; 6 – анод, 7 - система проведения пучка, 8 - герметичный корпус печи, 9 - нагреваемое тело, 10 - вакуумная система; 11 - пучок электронов

присоединение к вакуумным, 5 - электронная пушка, 6 - переплавляемый электрод.

В *электронно-лучевом* ЭТО [3, 4, 12, 25] происходит выделение теплоты при бомбардировке нагреваемого тела в вакууме потоком электронов, эмитируемых катодом.

Схема электронно-лучевого нагрева с аксиальной электронной пушкой приведена на рис. 1.18, схема электронно-лучевой печи - на рис. 1.19.

В *ионном* ЭТО [4, 12, 25] происходит выделение теплоты в нагреваемом теле потоком ионов, образованным электрическим разрядом в вакууме.

Схемы ионного нагрева представлены на рис. 1.20.

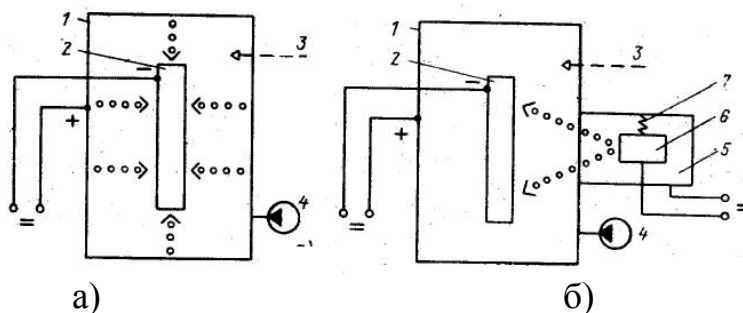


Рис. 1.20. Схемы ионного нагрева:

а - диффузионный нагрев; б - ионное осаждение:

1 - герметичный корпус; 2 - обрабатываемое тело; 3 - подача газов;  
4 - вакуумная система; 5 - испарительная камера; 6 - испаряемый материал;  
7 - электрическая дуга

Стрелками с кружками показан поток ионов.



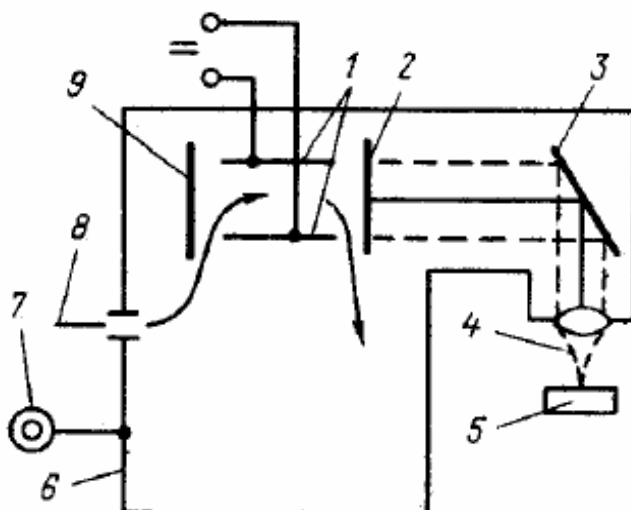


Рис. 1.21. Схема лазерного нагрева:

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

В *плазменном ЭТО* [3 - 5, 25] происходит выделение теплоты, основанное на нагреве газа за счет пропускания его через дуговой разряд или высокочастотное электромагнитное или электрическое поле. Схема плазменной печи с керамической футеровкой показана на рис. 1.22 и схема плазменно-дуговой печи с водоохлаждаемым тиглем показана на рис. 1.23.

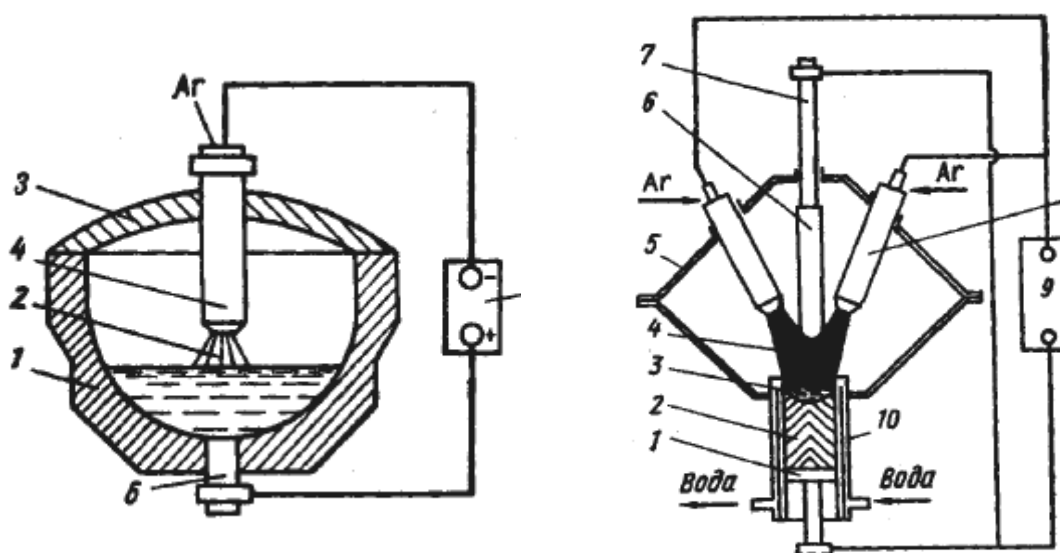


Рис. 1.22. Схема плазменной печи с керамической футеровкой:

1 - корпус печи; 2 - плазменная дуга; 3 – свод; 4 – плазматрон; 5 – источник; 6 – подовый водоохлаждаемый электрод

Рис. 1.23.– Схема плазменно-дуговой печи с водоохлаждаемым тиглем:

1 – поддон; 2 – слиток; 3 – жидкий металл; 4 – плазменная дуга; 5 – корпус печи; 6 – переплавляемый электрод; 7 – электрододержатель; 8 – плазматрон; 9 – источник питания; 10 – кристаллизатор

В сварочном ЭТО [5, 12, 14] происходит выделение теплоты в нагреваемых телах в целях осуществления неразъемного соединения с обеспечением непосредственной сплошности в месте сварки.

Сварочные ЭТО делятся по виду сварки, рис. 1.24.

Схемы ручной дуговой сварки показаны на рис. 1.25, точечной сварки - на рис. 1.26, стыковой сварки - на рис. 1.27, шовной двусторонней (а) и односторонней (б) сварки - на рис. 1.28.



Рис. 1.24 – Классификация сварочных ЭТО

Схемы ручной дуговой сварки показаны на рис. 1.25, точечной сварки - на рис. 1.26, стыковой сварки - на рис. 1.27, шовной двусторонней (а) и односторонней (б) сварки - на рис. 1.28.

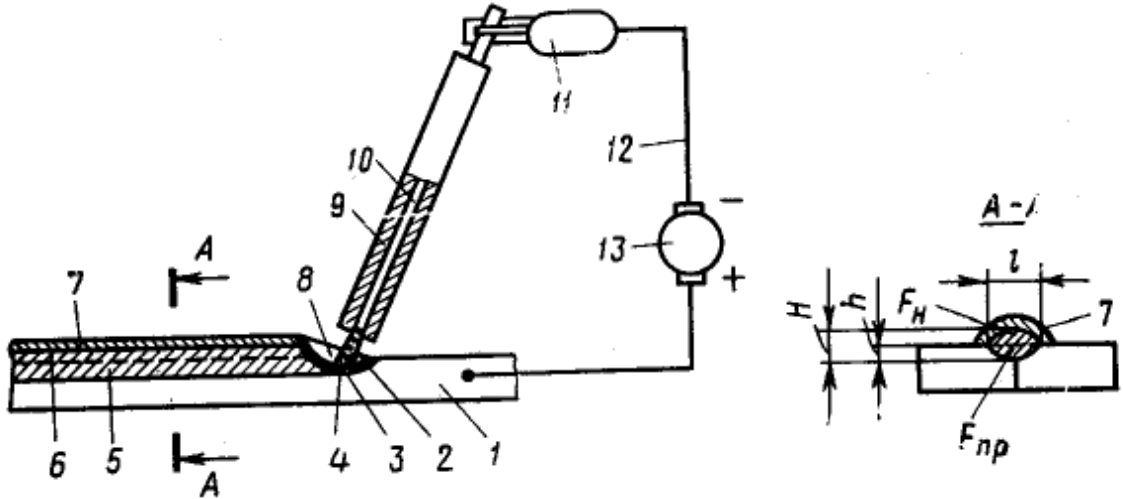


Рис. 1.25 – Схема ручной дуговой сварки:

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

Применение электротермического оборудования для различных видов промышленности приведено в табл. 1.1, 1.2, 1.3.

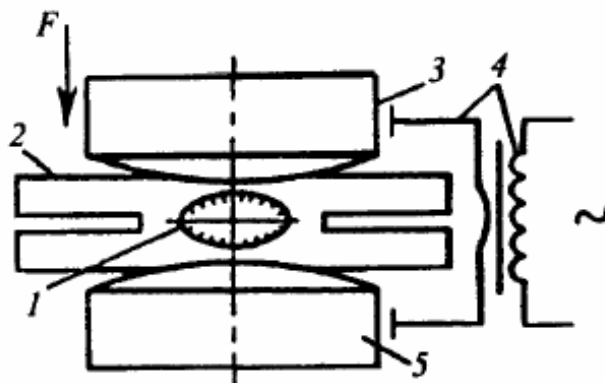


Рис. 1.26 – Схема точечной сварки:

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

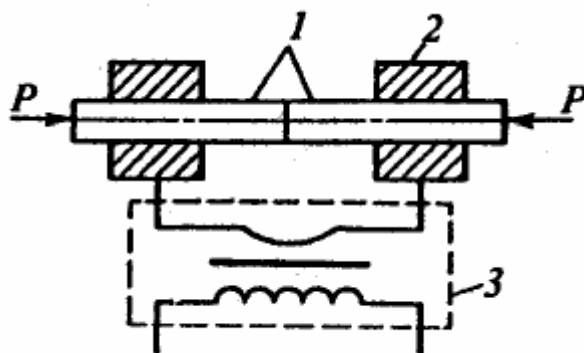


Рис. 1.27 – Схема стыковой сварки:

1 - детали; 2 - зажимные губки; 3 - сварочный трансформатор

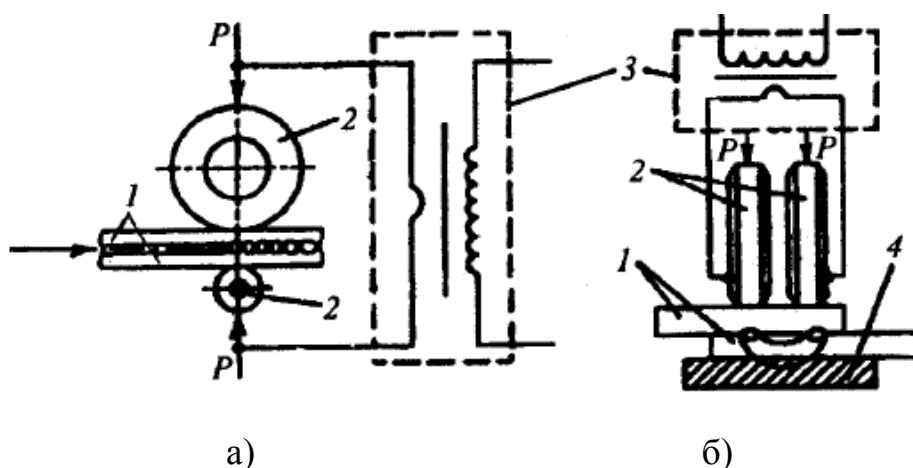


Рис. 1.28. Схема шовной двусторонней (а) и односторонней (б) сварки:

1 - свариваемые детали; 2 - сварочные ролики;  
3 - сварочный трансформатор; 4 - медная прокладка

Таблица 1.1  
Важнейшие электротермические процессы цветной металлургии и применяемое для них ЭТО

Процессы	Металлы и сплавы	Оборудование
Восстановление металла из руд с получением продукта в твердой фазе	Медный, медно-никелевый и никелевый штейн, силикоалюминий, никель, ферроникель, ферротитан, свинцовые шлаки	РТП

То же с получением продукта в газовой фазе	Магний, цинк, медь, никель и их сплавы	ДП косвенного нагрева, ИКП, ПС
Плавка из чушек или металлоотходов для получения сплавов, заготовок, рафинирования или выплавки фасонного литья	Медь, никель и их сплавы	ИКП, ИТП, ДП косвенного нагрева
То же	Алюминий, цинк, магний, олово, свинец и их сплавы, благородные и редкие металлы	ИТП, ИКП, ПС косвенного нагрева (в том числе вакуумные)
Получение металла спеканием штабиков, спрессованных из порошков	Тугоплавкие (вольфрам, молибден и др.)	ПС косвенного и прямого нагрева, ИП косвенного
Получение монокристаллических заготовок выращиванием из расплава	Полупроводниковые (кремний и др.), оптические (арсенид галлия и др.)	ПС косвенного нагрева и ИП
Переплав для рафинирования	Медь	ВДП, ИВП
Переплав спрессованных и спеченных заготовок	Тугоплавкие, высокореакционные (титан)	ВДП, ЭЛЛ

Процессы	Металлы и сплавы	Оборудование
Зонная очистка от примесей	Полупроводниковые	ИП повышенной чистоты
Нагрев перед пластической деформацией (ковка, прокатка) для получения профилей, листа труб и др.	Медь, алюминий и их сплавы	ИП, ПС косвенного нагрева

Тоже	Тугоплавкие, высокорреакционные (титан, цирконий и др.), редкие	ИД, ПС косвенного нагрева, вакуумные
Термическая и химико-термическая обработка	Цветные, легкие, тугоплавкие, высокорреакционные, полупроводниковые, редкие	ПС косвенного нагрева с воздушной атмосферой, контролируемой атмосферой или вакуумные

Примечание: сокращенные обозначения: РТП - рудно-термические печи;  
 ВДП - вакуумно-дуговые печи, ДП - дуговые печи, ИН - индукционные нагреватели,  
 ИВП - индукционные вакуумные печи, ИКП - индукционные каналные печи,  
 ИТП - индукционные тигельные печи, ИП - индукционные печи,  
 ПС - печи сопротивления, ЭЛЛ - электронно-лучевые печи.

Таблица 1.2

Важнейшие электротермические процессы в заготовительных производствах машиностроения и применяемое для них ЭТО

Процесс	Металлы и сплавы	Оборудование
Фасонное литье	Сталь, сплавы на основе железа	ДСП, ИТП, в том числе вакуумные, ЭЛЛ, ВДП
	Чугун	ИТП, ИКП, ДСП косвенного и прямо-
	Цветные	ИКП, ИТП, ДП косвенного нагрева, ПС
	Легкие	ПС, ИТП, ИКП
	Химически высокоактивные, тугоплавкие	ВДП (гарнисажные), ЭЛЛ (гарнисажные)
Процесс	Металлы и сплавы	Оборудование

Нагрев под ковку, штамповку и другие процессы пластической деформации	Сталь, сплавы на основе железа, цветные	ИП, ПС косвенного и прямого нагрева
Спекание из порошков	Сталь, сплавы на основе железа, цветные	ПС
Нагрев перед сваркой	Сталь, сплавы на основе железа, цветные	ПС, ИП
Отжиг отливок, поковок, сварных конструкций	Сталь, сплавы на основе железа, цветные	ПС, ИП

Примечание: сокращения те же, что и в таблице 1.

Таблица 1.3

Важнейшие электротермические процессы термической и химико-термической обработки и нанесения покрытий в машиностроении и применяемое для них ЭТО

Процессы	Методы нагрева	Виды электропечей
Отжиг, нормализация, старение	Сопротивлением, индукционный	Камерные, шахтные, элеваторные, конвейерные, соляные электрованны, толкательные, рольганговые, с пульсирующим подом, карусельные, ручьевые, барабанные, с шагающим подом
Изотермический отжиг	Сопротивлением	Рольганговые, толкательные

Процессы	Методы нагрева	Виды электропечей
----------	----------------	-------------------

Закалка	Сопротивлением, индукционный	Камерные, шахтные, соляные электрованны, элеваторные, конвейерные, толкательные, рольганговые, барабанные, с пульсирующим подом, ручьевые
Местная закалка, в том числе поверхностная	Высокочастотный индукционный, сопротивлением, лазерный, плазменный	Закалочные станки, специальные периодического действия, конвейерные, карусельные, ручьевые, рольганговые
Отпуск	Сопротивлением	Камерные, шахтные, соляные электрованны, элеваторные, конвейерные, толкательные, рольганговые, барабанные, ручьевые
Газовая цементация	Сопротивлением, индукционный, ионно-плазменный	Шахтные, камерные, толкательные, барабанные
Азотирование	Сопротивлением, ионно-плазменный	Шахтные, двухстендовые с передвижной камерой, колпаковые
Нитроцементация	Тоже	Шахтные, камерные, конвейерные, толкательные, барабанные, с пульсирующим подом
Горячая пайка	Сопротивлением, индукционный	Камерные, колпаковые, конвейерные, с шагающим подом, соляные электрованны
Эмалирование, цинкование и другие покрытия	Сопротивлением	Камерные, колпаковые, элеваторные, конвейерные, протяжные
Процессы	Методы нагрева	Виды электропечей



Нанесение (напыление, осаждение) покрытий, поверхностное реагирование и плакирование	Ионно-плазменный, дуговой, сопротивлением, лазерный, диэлектрический	Камерные, конвейерные, шахтные, специальных конструкций
Пайка	Сопротивлением, высокочастотный и индукционный	Камерные, шахтные, специальных конструкций

## 1.2 Теплопередача, Материалы, применяемые в электротермии

### 1.2.1 Теплопередача

**Тепловым потоком** называется поток внутренней энергии, самопроизвольно возникающий в вещественной среде с неоднородным температурным полем. Тепловой поток обозначается символом  $Q$  и направлен из области с более высокой температурой в область с низкой температурой. При необходимости создания высокотемпературного рабочего пространства эта область пространства окружается тепловой защитой, имеющей высокое тепловое сопротивление. Наиболее часто эту тепловую защиту называют теплоизоляцией или футеровкой.

Различают три процесса переноса тепловой энергии (теплоты):

- 1) **теплопроводность** (кондукция) - процесс распространения энергии только вследствие взаимодействия структурных частиц вещества (молекул, ионов, атомов, свободных электронов). В идеализированном виде теплопроводность может наблюдаться в твердых телах и неподвижных объемах жидкости и газа;
- 2) **конвекция** - процесс переноса тепловой энергии вследствие перемещения масс вещества в неоднородном поле температур; конвекция всегда сопровождается теплообменом между веществом и контактирующей с ним средой; конвекция наблюдается в движущихся квазисплошных средах (газах, жидкостях, плазме и смесях этих веществ с сыпучими материалами);
- 3) **излучение** (радиация) - процесс переноса энергии электромагнитными волнами, создаваемыми вследствие теплового движения в веществе, и передаваемой через прозрачную или частично прозрачную среду в область с более низкой температурой.

Теоретическое разделение процессов теплообмена на три носит условный характер, так как в реальных физических явлениях наблюдается совместное протекание перечисленных процессов переноса тепловой энергии. Процессы конвективного переноса теплоты всегда связаны с теплопроводностью внутри перемещающихся потоков вещества. Радиационный теплообмен может сочетаться как с теплопроводностью, так и с конвекцией. Если необходимо рассматривать действие одновременно двух или трех процессов переноса теплоты, то такие задачи называют сложным теплообменом. При первичном анализе реально протекающего физического процесса выявляют определяющие процессы переноса и после этого проводят физико-математическое описание процессов.

Для формализации качественных и количественных соотношений в системе тел, связанных теплопередачами, вводят следующие определения и понятия.

**Теплообменом** называют самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве, обусловленный неоднородным температурным полем; основной характеристикой теплопередачи является **тепловой поток**.

**Теплоотдачей** называется процесс теплообмена от одной среды к другой, если они разделены отчетливой границей (теплоотдача от поверхности твердого тела к воздушной (газовой) среде или от поверхности жидкости к газовой среде и т.д.).

**Теплопередача** - процесс передачи тепла от горячей среды к холодной через разделяющую их стенку.

**Температурное поле** - это совокупность мгновенных значений температуры во всех точках изучаемого пространства в данный момент времени.

**Температура** - фундаментальная физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. С молекулярно-кинетической точки зрения температура равновесной системы характеризует интенсивность теплового движения атомов, молекул и других частиц, образующих систему. Например, для системы, описываемой законами классической статистической физики, средняя кинетическая энергия теплового движения частиц прямо пропорциональна термодинамической температуре системы. Строго говоря, температура характеризует лишь термодинамически равновесное состояние. Однако понятием температуры часто пользуются при рассмотрении неравновесных систем. Единица измерения температуры предполагает построение шкалы температур на основе воспроизведения ряда равновесных состояний - основных реперных (постоянных) точек, которым приписаны определенные значения температур, и создания интерполяционных приборов, реализующих шкалу между этими точками. Термодинамическую температуру обозначают символом  $T$ . Ее единица измерения - Кельвин (символ К) определена как  $1/273,16$  часть термодинамической температуры тройной точки воды. Термодинамическую температуру выражают также через температуру Цельсия (символ  $t$ ), которая определена соотношением  $t = T - 273,15$ . Единица температуры Цельсия - градус Цельсия (символ  $^{\circ}\text{C}$ ). Количественно цена делений шкал - градус Цельсия и Кельвина равны.

**Стационарным режимом** называется тепловой режим, при котором температурное поле не изменяется во времени.

**Нестационарным режимом** называется такое тепловое состояние, при котором температурное поле изменяется во времени.

**Плотность теплового потока** обозначается символом  $q$  и определяет удельный тепловой поток, проходящий через единицу площади поверхности теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>.

**Мощность внутренних источников теплоты** обозначается символом  $q_V$  с единицей измерения в Вт/м<sup>3</sup> и представляет собой количество теплоты, выделяемое внутренними источниками в единице объема среды в единицу времени. Среда в общем случае может быть твердой, жидкой или газообразной.

**Коэффициент теплопроводности** - величина, численно равная плотности теплового потока, проходящего через изотермическую поверхность теплообмена при температурном градиенте, равном единице:  $\lambda = q/\text{grad } T$  [Вт/(м·К)]. Коэффициент теплопроводности (в последнее время принято название - теплопроводность) определяется уравнением Фурье

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T,$$

где  $q$  - плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  - теплопроводность, Вт/(м·К);  $\text{grad } T$  - градиент температуры, К/м.

Уравнение Фурье справедливо для небольших значений градиента температуры (когда отклонение системы от равновесного состояния мало) и в случае достаточно плотной среды, когда средняя длина свободного пробега частиц, участвующих в теплопереносе, мала по сравнению с геометрическими размерами системы.

Теплопроводность  $\lambda$  зависит от агрегатного состояния вещества, его состава, чистоты, температуры, давления и других характеристик. Так для большинства веществ теплопроводность жидкой фазы в 10 раз больше, чем теплопроводность газообразной фазы, а для твердого тела она значительно выше, чем для жидкости около точки плавления (за исключением жидких висмута, олова и теллура).

На практике часто встречаются случаи, когда теплопроводность внутри тела и вблизи его границы различна. Это различие обусловлено как изменением условий протекания процессов теплопереноса, так и различием структуры и состава вещества внутри тела и в поверхностных слоях (в результате термообработки, наклепа и т.д.). Такое неоднозначное поведение удельной характеристики вещества - теплопроводности, приводит к необходимости использования в математических уравнениях среднего коэффициента теплопроводности

$$\bar{\lambda} = \int_{t_1}^{t_2} \lambda \cdot dt / (t_2 - t_1),$$

где  $t_1$  и  $t_2$  - характерные температуры в конкретной задаче, °С.

Следует иметь в виду, что на теплопроводность могут оказывать существенное влияние внешние факторы, например облучение, изменение магнитного поля, давления или плотности. В полупрозрачных средах теплопроводность сопровождается радиационным переносом. Наблюдаемая экспериментально **эффективная теплопроводность** таких сред есть сумма собственно теплопроводности и радиационного теплопереноса. Вклад радиационной составляющей сложного теплопереноса увеличивается с повышением температуры и становится существенным при температурах, соответствующих нескольким сотням градусов Цельсия.

Погрешность приводимых в литературе справочных величин по теплопроводности меняется в зависимости от состояния вещества, области температур (как правило, погрешность увеличивается при низких и высоких температурах) и давлений (увеличивается с повышением давлений). В основном погрешность значений коэффициентов теплопроводности составляет 10 - 20%. Для ряда веществ, изученных наилучшим образом, погрешность справочных данных лежит в пределах 1 - 2%. Поэтому особенно важно при использовании справочных данных обращать внимание на условия, при которых получены эти характеристики.

При решении большинства технических задач зависимости коэффициента теплопроводности от температуры можно приблизительно выразить линейной функцией вида

$$\lambda(t) = \lambda_0 (1 + b \cdot t),$$

где  $\lambda_0$  - коэффициент теплопроводности при температуре 0 °С;  $b$  - постоянная величина, зависящая от природы материала, определяемая опытным путем, имеет размерность  $K^{-1}$  и приводится в справочной литературе. Среднеинтегральный коэффициент теплопроводности, в соответствии с выражением (1.1) может определяться по формуле

$$\bar{\lambda} = \lambda_0 [1 + 0,5 \cdot b(t_1 + t_2)].$$

**Коэффициент температуропроводности** обозначается символом  $a$  и имеет размерность  $m^2/c$  - это величина, численно равная отношению

коэффициента теплопроводности  $\lambda$  к произведению удельной теплоемкости  $c$ , Дж/(кг·К), и плотности среды  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>

$$\alpha = \lambda / (c \cdot \rho).$$

Коэффициент температуропроводности характеризует теплоинерционные свойства среды, т. е. определяет временную удельную скорость изменения температуры в конкретном материале.

Практически любые расчеты тепловых условий работы электротехнического и теплотехнического оборудования не обходятся без рассмотрения процессов теплопроводности. Понятие теплопроводности является определяющим при вычислении предельных токовых нагрузок проводников как неизолированных, так и с электроизоляцией, проводов электропередачи и контактной сети транспортных устройств. Кроме этих широко распространенных случаев электротехнических устройств, понятие теплопроводности является определяющим при расчетах радиаторов охлаждения силовых полупроводниковых приборов, тепловых полей статора и ротора электромеханических преобразователей (электрических машин) и т.д. В электротехнологических установках, выполняющих функции преобразования электрической энергии в тепловую с последующим использованием тепловой энергии для осуществления широкого класса технологических процессов, тепловые расчеты конструкции и рабочего пространства являются центральными и основными как для обеспечения надежности работы электротехнической части оборудования, так и для гарантированного поддержания рабочих технологических температур. Поэтому тепловые задачи в такого типа установках являются столь же определяющими работоспособность оборудования, как и расчеты электротехнические, обеспечивающие создание систем ввода электрической энергии в рабочее пространство электротехнологических установок.

### **1.2.2 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, чтобы отделить рабочее пространство от окружающей среды и уменьшить тепловые потери.

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

### 1.2.2.1 Огнеупорные материалы

Из огнеупорных материалов изготавливают внутренние части стен и детали рабочих камер печей.

Обозначения в марках огнеупорных изделий.

Марки формованных изделий начинаются с обозначения группы материала, марки остальных изделий с букв: П - порошки, С - смеси, З - заполнители, М - массы, М - мертели.

В марках изделий материалы соответственно группам обозначаются буквами:

Д - диначесый,

Ш - шамотный,

ШК - шамотно-каолиновый,

ШП - шпинельный,

В - высокоглиноземистый,

МКР - муллитово-кремнеземистый,

МЛ - муллитовый,

МК - муллитово-корундовый,

К - корундовый,

М - магнезитовый,

П - перлитовый,

ППШ - периклазошпинельный,

ПХ - периклазохромитовый,

ХМ - хромомагнезитовый,

Ц - цирконистый,

БК - баделлентокорундовый,

К - карбидкремниевый,

Т - тальковый,

ПИ - периклазоизвестковый,

К - кордеиритовый,

И - иттриевый

В конце может стоять обозначение валификационной группы по пористости (табл. 1.4), технологии изготовления, тонкости помола.

По технологии изготовления

С, Сп – спеченный

П, Пл – плавленный

Л - литой

По тонкости помола

К – крупный

С - Т - тонкий средний

Кроме того, могут быть приведены дополнительные обозначения:

Б - бетон,

Г - глина,

И - для индукционных печей,

В - для вакуумных печей,

Ф - фосфатная связка,

Н - набивная масса,

А - алюмосиликатная смесь,

Т - тигель,

К - картон,

В - вата,

Б - бумага,

П - плиты,  
М - маты.

Таблица 1.4

## Группы формованных огнеупоров по пористости

Группа	Сокращенное обозначение группы	Пористость, %	
		открытая	общая
Особоплотные	-	До 3	-
Высокоплотные	ВП	Свыше 3 до 10	-
Повышенноплотные	п	Свыше 10 до 16	-
Уплотненные	У	Свыше 16 до 20	-
Среднеплотные	с	Свыше 20 до 30	-
Низкоплотные	л	Свыше 30	Менее 45
Высокопористые	л	-	От 45 до 75
Ультрапористые	л	-	Свыше 75

Примечание: огнеупоры с общей пористостью менее 45 % принято объединять под общим названием плотные, от 45 % и выше – легковесные.

На рис. 1.29 приведены условные обозначения огнеупорных и теплоизоляционных материалов.

К огнеупорным материалам предъявляются требования, описанные в 1.2.2.1.1-1.2.2.7.

### 12.2.1.1 Достаточная огнеупорность

Огнеупорность - способность материала противостоять действию высоких температур, не расплавляясь. Огнеупорность материалов определяется путем измерения температуры «падения» образца материала при определенных условиях нагревания. Образец материала в виде трехгранной усеченной пирамиды с определенными размерами помещают в печь с окислительной или нейтральной атмосферой и нагревают по определенному режиму. Температура, соответствующая моменту, когда вершина конуса склоняется к основанию, принимается за огнеупорность. Огнеупорность несколько ниже температуры плавления.

Изделия делят на *огнеупорные* (1580 — 1770°C), *высокоогнеупорные* (1770 — 2000°C) и *высшей огнеупорности* (выше 2000°C). Материалы с огнеупорностью ниже 1580°C считаются *неогнеупорными*.



Обычно огнеупоры применяются при температуре, которая значительно ниже их огнеупорности (температура применения огнеупорных материалов приведена в табл. 1.5).

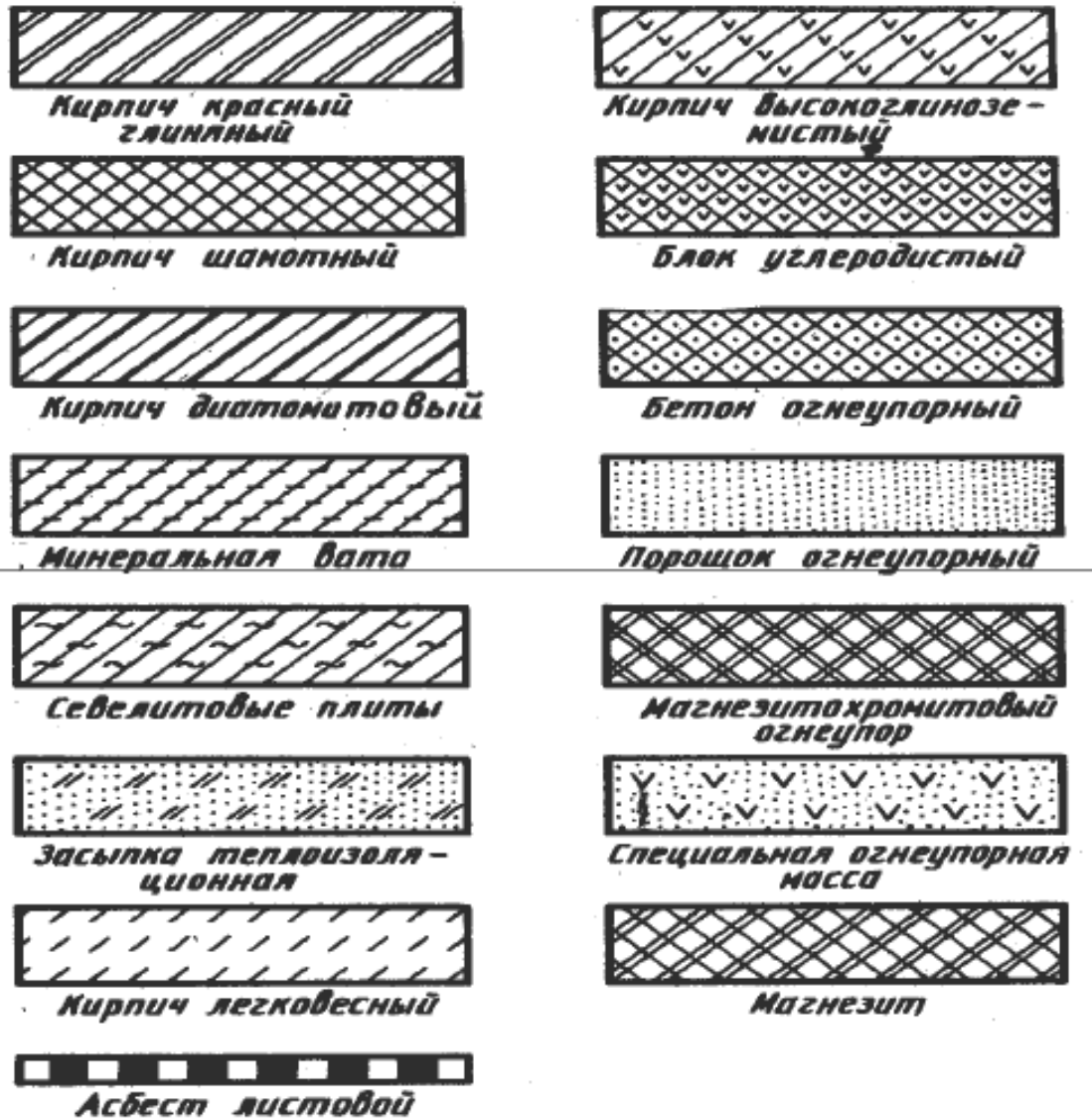


Рис. 1.29. Условные обозначения огнеупорных и теплоизоляционных материалов

Теплоизоляционные материалы (кроме легковесных огнеупоров и керамических волокон) имеют огнеупорность ниже 1580°C.

Таблица 1.5

Характеристики огнеупорных изделий

Наименование огнеупора	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Огнеупорность, °С	Допускаемая температура применения, °С
Алюмосиликатные			

Шамотный кирпич	1800 -1900	1670-1730	1350-1450
Полуокислый огнеупорный кирпич	1850 -1950	1610-1710	1350-1450
Наименование огнеупора	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Огнеупорность, °С	Допускаемая температура
Силлиманитовые и муллитовые изделия	2200 - 2400	1780-1850	1650
Изделия из плавленного муллита	2200 - 2400	1800-1850	1750
<i>Глиноземистые</i>			
Корундовые (алундовые) изделия	2600 - 2900	1800 - 2000	1600-1700
Изделия из рекристаллизованного корунда	2750 - 3850	2000	1900
<i>Кремнеземистые</i>			
Динасовый кирпич	1900 -1950	1700-1720	1700
<i>Магнезиальные</i>			
Магнезитовый кирпич	2600 - 2800	2000	1650-1700
Плавленный магнезитовый кирпич	2700-2800	2800	1850
Хромомагнезитовый кирпич	2800 - 2900	2000	1700
Термостойкий хромомагнезитовый кирпич	2750-2850	2300	1750
<i>Магнезиитошпинелидные</i>			
Хромитовый кирпич	3000 - 3200	1850 -1900	1650-1700
<i>Карбидкремниевые</i>			
Карборундовые изделия (карбофракс)	2300 - 2600	2000 - 2200	1400-1500
<i>Цирконистые</i>			
Циркониевые изделия	3300	2600	2000
Цирконовые изделия	3200 - 3300	2000	1900
<i>Прочие</i>			
Строительный (красный) кирпич	1400 -1600	1300	300 - 400
<i>Угольные изделия</i>			
Угольные изделия	1500 -1600	3000	2000
Графитовые изделия	1600	3000	2000
Окись бериллия	—	2600	2000

Таблица 1.6

Наименование огнеупора	Удельная теплоемкость $10^3 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	Коэффициент теплопроводности $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	Термостойкость
<i>Алюмосиликатные</i>			
Шамотный кирпич	$0,879 + 0,23 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	$0,837 + 0,582 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	Удовлетворительная
Полукислый огнеупорный кирпич	$0,879 + 0,23 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	$0,872 + 0,532 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	Недостаточная
Силлиманитовые и муллитовые изделия	$0,837 + 0,251 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	$1,686 - 0,233 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	Удовлетворительная
Изделия из плавленного муллита	$1,047 + 0,251 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	_____	Хорошая
<i>Глиноземистые</i>			
Корундовые (алундовые) изделия	$0,795 + 0,419 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	$2,09 + 1,861 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	Удовлетворительная
Изделия из рекристаллизованного корунда	_____	29,1 (100° C) 5,82(1000° C)	Недостаточная
<i>Кремнеземистые</i>			
Динасовый кирпич	$0,837 + 0,251 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	$0,930 + 0,698 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	Недостаточная
<i>Магнезиальные</i>			
Магнезитовый кирпич	$1,047 + 0,293 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	$4,65 - 1,745 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	Недостаточная
Плавленый магнезитовый кирпич	_____	_____	Удовлетворительная
Хромомагнезитовый кирпич	_____	$1,861 - 2,09(0 - 700^\circ \text{C})$	Недостаточная
Термостойкий хромомагнезитовый кирпич	_____	$4,07 - 1,105 \cdot 10^{-3} t_{\text{cp}}$	Хорошая

<i>Магнезиитошпинелидные</i>			
Хромитовый кирпич	$0,837 + 0,293 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	$1,279 + 0,407 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	Удовлетворительная
Наименование огнеупора	Удельная теплоемкость	Коэффициент теплопроводности	Термостойкость
<i>Карбидкремниевые</i>			
Карборундовые изделия (карбофракс)	$0,963 + 0,147 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	$2,09 - 10,47 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	Удовлетворительная
<i>Цирконистые</i>			
Циркониевые изделия	$0,544 + 0,126 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	$1,303 + 0,640 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	Удовлетворительная
Цирконовые изделия	$0,628 + 0,126 \cdot 10^{-3} t_{cp}$		Хорошая
<i>Прочие</i>			
Строительный (красный) кирпич	0,92	$0,814 + 0,465 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	Недостаточная
Угольные изделия	0,837	$23,3 + 34,9 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	Хорошая
Графитовые изделия	1,256	$162,7 - 40,7 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	Хорошая
Окись бериллия	$1,256 + 0,523 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	$1,861 - 3,72(20^\circ C)$	Хорошая
Окись тория	$0,251(25^\circ C)$	Очень низкий	Недостаточная

### 1.2.2.1.2 Достаточная механическая прочность при высоких температурах

Прочностные свойства керамических материалов оцениваются пределами временной прочности при сжатии, изгибе, скручивании, растяжении, реже при сдвиге. Обычно значения этих величин заметно превышают те реальные напряжения, которые может испытывать материал в работе.

Прочность огнеупорных материалов определяется деформацией при постоянной сжимающей нагрузке 20 кПа (для плотных огнеупоров). При

этом определяется пластическая деформация образца и регистрируются температуры, соответствующие началу сжатия, а также 4 и 40 % сжатия.

Практически нагрузка вертикальных стен печей достигает 5-10 кПа. В сводах печей нагрузка на огнеупор выше, но не превышает испытательной.

Предельная температура применения ненагруженного огнеупора лежит между температурой начала размягчения и 4 %-го сжатия.

Таблица 1.7

Основные данные пористых огнеупорных изделий (легковесов)

Наименование огнеупора	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Огнеупорность,	Допускаемая температура	Коэффициент теплопроводности Вт/(м·°С)
Легковесные шамоты				
ШЛА-1,3	1300	1730	1400	$0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} t_{cp}$
ШЛ-1,0	1000	1670	1300	$0,291 + 0,256 \cdot 10^{-3} t_{cp}$
ШЛ-0,9	900	1740	1270	$0,279 + 0,233 \cdot 10^{-3} t_{cp}$
ШТЛ-0,4	270-330	1710-730	1550	$0,0582 + 0,1745 \cdot 10^{-3} t_{cp}$
ШТЛ-0,6	600	1630	1150	$0,1047 + 0,1454 \cdot 10^{-3} t_{cp}$
Динасовый легковес ДЛ-1,2	1200	1670	1550	$0,547 + 0,299 \cdot 10^{-3} t_{cp}$
Корундовый легковес КЛ-1,3	1300	1900	1500	$0,837 - 0,349 \cdot 10^{-3} t_{cp}$

Примечание: для легковесов на базе шамота удельная теплоемкость может приниматься равной  $880 + 0,23 t_{cp}$  Дж/(кг·°С).

### 1.2.2.1.3 Достаточная термостойкость

Термостойкость — способность материала выдерживать, не разрушаясь, резкие колебания температуры. Термостойкость огнеупоров определяется путем одностороннего нагрева образцов до 1300°С и охлаждения в проточной воде (5 - 25 °С), причем норма устанавливается по количеству теплосмен, выдерживаемых образцом до потери 20 % массы. В отдельных случаях образцы нагревают до более низкой (или более высокой) температуры и охлаждают на воздухе (так называемые воздушные

теплосмены). Для одного и того же материала термостойкость изделий может зависеть от их формы и размера (более мелкие изделия более термостойки), структуры (более термостойки изделия с зернистой структурой), условий нагрева.

#### **1.2.2.1.4 Сопротивляемость химическим воздействиям при нормальных и высоких температурах**

Химическая стойкость материала определяется его способностью противостоять растворяющему или разрушающему действию жидких, твердых или газообразных веществ. Материалы, применяемые в электропечах, должны противостоять разрушающему воздействию газов, расплавов, истирающих агентов, не должны взаимодействовать с нагревательными элементами печей или сами оказывать на них вредное разрушающее влияние.

Химическая стойкость связана с химическим составом материалов и их плотностью (проницаемостью).

#### **1.2.2.1.5 Достаточно малые теплопроводность и теплоемкость**

От огнеупорных материалов требуется малая теплопроводность, так как они отделяют зону наибольших температур от окружающей среды.

Теплопроводность зависит не только от температуры, но и от кажущейся (средней) плотности. С ростом плотности теплопроводность, как правило, растет. Теплопроводность зависит от характера пористости и теплопроводности газовой среды, в которой эксплуатируются огнеупоры, особенно для материалов с высокой пористостью. На теплопроводность керамического материала оказывает также влияние давление газовой среды — снижение давления ведет к уменьшению теплопроводности и, наоборот, повышение давления повышает теплопроводность (особенно у высокопористых материалов).

Малая теплоемкость огнеупоров снижает аккумулярованную футеровкой теплоту и тем самым уменьшает затраты электроэнергии, особенно у печей периодического действия.

Теплоемкость не зависит от структуры и незначительно зависит от температуры.

#### **1.2.2.1.6 Малая электрическая проводимость и достаточная электрическая прочность при низких и высоких температурах**

Эти свойства необходимы потому, что огнеупорные материалы служат естественным изолятором, разделяющим и изолирующим токонесущие части друг от друга.

Значения электрической проводимости зависят от температуры и структуры материала. Для уменьшения поверхностной проводимости материал должен иметь минимум открытых пор, поверхность которых адсорбирует пары воды, газы, пыль и другие загрязнения.

Электрическая прочность материала связана с его структурой и температурой — в местах перегрева может возникнуть электротепловой пробой. Иногда имеет место электрохимический пробой — в случае, когда в керамическом материале при высокой температуре происходят химические явления (например, восстановление), способствующие местному снижению его электрического сопротивления, например в печах с цементационной атмосферой.

#### **1.2.2.1.7 Низкая стоимость, технологичность изготовления**

Указанным требованиям в большой степени отвечают окислы различных элементов.

Основой огнеупорных материалов являются три огнеупорных окисла: кремнезем  $\text{SiO}_2$ , глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и окись магния  $\text{MgO}$ .

Огнеупорные материалы применяются в виде сплошных и пористых кирпичей и фасонных изделий. Наиболее часто применяются кирпичи размером 113x65x230 мм.

Огнеупорные материалы применяются также в виде порошка, набивных масс и обмазок, а также в виде огнеупорных бетонов.

Основные свойства огнеупорных материалов приведены в табл. 2 и 3.

Наибольшее распространение в электропечестроении получила группа алюмосиликатных огнеупоров.

Алюмосиликатные огнеупоры (шамотные, муллитокремнеземистые, сил-лиманитовые, муллитовые, корундомуллитовые) имеют нейтральную химическую природу и содержат 28 — 45 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шамотных, 45 — 62 % в муллитокремнеземистых, 62 — 72 % в муллитовых, 72 — 90 % в корундомуллитовых материалах.

Среди этой группы материалов наиболее распространены шамотные (плотные и легковесные).

*Шамотные* материалы используются в воздушной атмосфере, при применении контролируемых атмосфер использование этих материалов ограничено.

Высокоглиноземистые огнеупорные материалы (муллитокремнеземисто-го, муллитового и корундомуллитового составов) могут применяться в различных атмосферах, в том числе контролируемых.

Огнеупорность шамотных изделий — в пределах 1600 — 1750°С.

Шамотные материалы могут служить в условиях воздействия кислых и основных шлаков, расплавов солей. Эти материалы применяются для футеровки электропечей, работающих в воздушной (слабоокислительной) атмосфере.

Изделия с пористостью более 45 % и пониженной средней плотностью (400 — 1400 кг/м<sup>3</sup>) относятся к легковесным. Их используют для наружной или внутренней теплоизоляции электропечей. Легковесные изделия не должны подвергаться действию расплавленных шлаков, металлов, стекла, золы, они могут также применяться в качестве промежуточной теплоизоляции в плавильных или высокотемпературных печах. Некоторые из этих материалов могут применяться в защитных углеродсодержащих атмосферах.

*Муллитокремнеземистые и муллитовые изделия* (плотные и легковесные) обладают огнеупорностью не ниже 1700°С. Эти изделия в качестве основной кристаллической фазы содержат муллит, связка между зернами муллита — стекло с различным содержанием кремнезема. Материалы достаточно стойки к действию металлов, шлаков, расплавов и газов, содержат небольшое количество вредных примесей (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и щелочей), их целесообразно применять в механически нагруженном слое футеровки.

Легковесные (высокопористые) материалы не должны подвергаться действию расплавов металлов, шлаков и стекол.

Огнеупорность материалов — более 1800°С. Эти материалы в основном плотные и применяются для футеровки механически нагруженного слоя футеровки электропечей. Материалы такого типа обладают большой механической прочностью. Они могут работать в контакте с расплавами, нагретыми металлами и газами.

*Корундовые* огнеупоры, относящиеся к группе глиноземистых, содержат более 90 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и небольшое количество примесей (окислы кремния, железа, щелочей), имеют огнеупорность более 2000°С. Эти материалы устойчивы к действию практически всех металлов (в нагретом или расплавленном состоянии), шлаков, большинства газов, восстановительных реагентов и вакуума. Корундовые изделия механически очень прочны. Из корунда изготавливают огнеупорные изделия, которые имеют достаточную термостойкость, а также корундовую керамику более мелких и сложных фасонов. Добавка к корунду некоторых окислов (TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> и др.) позволяет регулировать технические свойства изделий. Изделия из плотного корунда применяются в электропечах: высоко температурных, вакуумных, водородных, плавильных, нагревательных, для химико-термической обработки и др. Температура применения корундовых материалов близка к их огнеупорности (1900 — 1950°С). Корундовые огнеупоры выпускаются плотных и легковесных разновидностей.



Группа кремнеземистых огнеупоров включает динасовые и кварцевые огнеупоры.

*Динасовые* огнеупорные изделия содержат не менее 93 %  $\text{SiO}_2$ . Футеровка из этих изделий является кислой, т. е. устойчивой к кислым шлакам, стеклам и реагентам, и характеризуется огнеупорностью не ниже  $1690^\circ\text{C}$ . Главные области их применения: стекловаренные электропечи, своды электропечей, а также коксовые, стекловаренные газовые печи и регенераторы мартеновских печей. Динас может применяться в обжигательных печах, где температуры слишком высоки для применения шамотных изделий. Изделия, содержащие 93 % и более кремнезема, отличаются высокой температурой деформации ( $1600 - 1650^\circ\text{C}$ ), что способствует их использованию в сводах печей, а также дополнительным ростом размеров при работе.

Легковесный динас не взаимодействует при  $1450^\circ\text{C}$  с пеношамотом, полуокислыми, каолиновыми, высокоглиноземистыми, хромомagneзитовыми, магнезитовыми и форстеритовыми огнеупорными материалами. Он применяется для сводов с большим пролетом при  $1450^\circ\text{C}$ , в том числе для печей периодического действия.

Важным свойством динаса является то, что в отличие от остальных огнеупорных материалов, у которых механическая прочность снижается с повышением температуры, динас сохраняет высокую механическую прочность до температуры плавления. Недостатком этого материала является низкая термостойкость.

Большая группа так называемых *магнезиальных* огнеупоров имеет в своем составе периклаз (окись магния  $\text{MgO}$ ), обладающий значительной устойчивостью к агрессивному воздействию металлов, окислов железа и основных металлургических шлаков. Магнезиальные изделия отличаются высокой огнеупорностью (выше  $2000^\circ\text{C}$ ).

Магнезиальные изделия применяют для подов и стен электросталеплавильных печей, миксеров и других агрегатов. Эти изделия характеризуются малой термической стойкостью и разрушаются при резких температурных перепадах. Для повышения термической стойкости в их состав вводят некоторое количество (5-8 %) глинозема ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Еще более термостойкие изделия получают при введении в состав материалов хромита ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

*Магнезиошпинелидную* группу образуют периклазохромитовые, хроми-топериклазовые, хромитовые и периклазошпинелидные огнеупоры.

Хромитопериклазовые (хромомagneзитовые) изделия применяют для электросталеплавильных печей. Периклазохромитовые изделия, обладающие высокой шлакоустойчивостью и хорошей термостойкостью, используются в сводах сталеплавильных, медеплавильных, нагревательных и других печей.

Особо высокой термостойкостью отличаются плотные магнетитохромитовые изделия с пористостью 16 % и ниже.

Материалы этой группы не используются в электропечах с контролируемыми газовыми атмосферами, так как входящий в их состав хромит подвергается восстановлению. Указанные материалы выпускаются только плотных разновидностей.

В ряде случаев в электропечах сопротивления применяются карбидкремниевые (карборундовые) изделия. К ним относятся изделия с содержанием карбида кремния ( $\text{SiC}$ ) более 70 %. Карбидкремниевые огнеупоры имеют огнеупорность выше  $1850^\circ\text{C}$ , высокие теплопроводность и электрическую проводимость, термостойкость, стойкость к абразивному воздействию, не смачиваются некоторыми металлами, обладают высокой механической прочностью в холодном и нагретом состояниях. Материалы, содержащие большое количество карбида или нитрида кремния, кислотоупорны и стойки к высокотемпературной деформации, но разрушаются восстановителями, в том числе основными шлаками и щелочами, окисляются на воздухе при температуре выше  $1450^\circ\text{C}$ . Эти материалы применяются в воздушной или инертной атмосфере - там, где требуются большие износостойкость, теплопроводность и термостойкость изделий, они могут применяться в контакте с материалами алюмосиликатной группы, с которыми карбид кремния не взаимодействует.

Определенное применение для высокотемпературных печей нашли огнеупоры цирконистой группы (бакелитовые, цирконовые).

В состав этих огнеупоров входят двуокись циркония ( $\text{ZrO}_2$ ) или силикат циркония (циркон -  $\text{ZrSiO}_4$ ). Материалы этого типа обладают высокой огнеупорностью (выше  $2000^\circ\text{C}$ ), они химически устойчивы и мало теплопроводны. Цирконовые изделия сохраняют постоянство объема при высоких температурах, имеют стойкость против деформаций при высоких температурах, термостойки, стойки к воздействию каменноугольных и коксовых шлаков, шлаков и расплавов черных и цветных металлов, расплавленных хлоридов, фосфорнокислого натрия, шлаков закалочных печей с соляной ванной. Цирконовые изделия разрушаются фтором, фосфорным ангидридом, стекольным расплавом, окислами железа и мартеновскими шлаками. Огнеупоры на основе двуокиси циркония с добавками муллита или корунда (бакоровые, муллитоциркониевые), полученные литьем из расплава, химически стойки, особенно против действия стекол. Муллитоциркониевые изделия стойки также к действию окислов железа. Чистая двуокись циркония (без добавок других окислов) применяется в качестве высокотемпературной теплоизоляции.

На основе  $\text{ZrO}_2$  промышленностью выпускаются плавнелитые огнеупоры: бакор-33, бакор повышенной чистоты, муллитоциркониевые,

циркониевые огнеупоры, стабилизированные окисью кальция или окисью иттрия.

В отдельных случаях в качестве огнеупоров применяются угольные и графитовые изделия, например для футеровки руднотермических печей. Из указанных материалов изготавливаются тигли. Материалы термостойки, механически прочны, имеют высокую теплопроводность и электрическую проводимость; они не могут работать в окислительной атмосфере.

Для специальных высокотемпературных печей нашли применение изделия из окислов редких металлов - окиси тория, окиси бериллия, а также нитриды бора, карбиды бора, хрома, ванадия, вольфрама, молибдена.

### **1.2.2.2 Огнеупорные растворы, бетоны, набивные массы и обмазки**

Огнеупорные растворы - мертели - используются для заполнения швов огнеупорного слоя футеровки. Требования к готовому шву по огнеупорности, механической прочности и другим свойствам должны быть такими же, как и к основному огнеупорному материалу. Для шамотных мертелей применяются тонкомолотые смеси шамота с огнеупорной глиной. В случае работы раствора при температурах ниже  $1000^{\circ}\text{C}$  для лучшего сцепления с кирпичом и большей прочности добавляется жидкое стекло.

Имеются различные классы шамотных мертелей, предназначенных для использования на соответствующих уровнях температуры.

Для диасовых растворов применяются смеси из молотого кварцита, боя диасовых кирпичей и огнеупорной глины; в раствор добавляется жидкое стекло.

Огнеупорные массы — бетоны, набивные массы — служат для изготовления целых монолитных частей футеровок.

Имеются огнеупорные бетоны со связующими - гидравлически твердеющим глиноземистым цементом, портландцементом или жидким стеклом, и заполнителями - шамотным порошком, хромитом или хромомagneзитом, для легковесных бетонов в качестве заполнителя используется молотый пористый порошок. Эти бетоны применяются в печах с максимальной рабочей температурой до  $1300^{\circ}\text{C}$ . Имеются хромистые бетоны, применяющиеся до  $1500^{\circ}\text{C}$ .

Технология приготовления огнеупорных бетонов такая же, как и обычных строительных бетонов.

Набивные массы используются, как правило, в дуговых и индукционных плавильных печах. При их изготовлении используются смоляные связки, которые коксуются и затвердевают при температурах

выше 500°C, а в случае использования жидкого стекла - при нормальной температуре.

### 1.2.3 Теплоизоляционные материалы

К теплоизоляционным материалам, которые предназначены для уменьшения тепловых потерь электропечи, предъявляются следующие требования: малая теплопроводность, малая удельная теплоемкость, определенная огнеупорность, определенная механическая прочность, дешевизна и доступность.

Теплоизоляционные материалы изготавливаются в виде жестких и полужестких изделий - кирпичей, плит, скорлуп, сегментов, матов; в виде мягких и полумягких изделий - ваты, войлока, ткани, картона, бумаги и т. п., или в виде засыпок - кускового дробленого материала.

Пористая (и как частный ее случай - ячеистая) структура материала образуется при вспучивании материала. Для этой цели могут быть использованы выгорающие (органические) добавки, пористые заполнители, введение пены, вспучивание при термообработке, введение газообразователей (газообразование при нагреве или при химическом взаимодействии). Пористые материалы изготавливаются обычно в виде жестких и полужестких формованных и неформованных (мастики, бетоны) изделий или в виде пористых засыпок.

Волокнистые материалы изготавливаются из стеклообразных поликристаллических или монокристаллических волокон. Стеклообразные волокна получают из расплавов природных (горные породы, минералы) или искусственных (стекла, смеси, шлаки и др.) материалов путем вытягивания нитей, или воздушным, или паровым раздувом расплава.

В качестве теплоизоляционного материала используются диатомит и трепел, представляющие собой скопление скелетов мельчайших водорослей. Эти материалы имеют малую среднюю плотность и теплопроводность. Они применяются в виде засыпки, порошка или из них изготавливают кирпичи.

Диатомитовые кирпичи могут применяться до 900°C. Они изготавливаются со средней плотностью 500, 600 и 700 кг/м<sup>3</sup>.

Большое количество теплоизоляционных материалов изготавливается на базе асбеста, представляющего собой минерал волокнистого строения. Волокна очень прочны на растяжение, но легко перетираются.

Распушенный асбест используется в виде теплоизоляционной засыпки и называется асбеститом. В таком виде асбест может работать до 600°C.

Вообще температура плавления асбеста  $1500^{\circ}\text{C}$ , но при  $700^{\circ}\text{C}$  он теряет свои теплоизоляционные свойства, рассыпаясь вследствие удаления из него воды.

Из асбеста склеиванием волокон белой глиной и дальнейшим прессованием получают асбестовый картон и бумагу, из него получают также асбестовых шнур.

Известны материалы, в которые асбест входит как составная часть. Это асбозурит, новоасбозурит (кроме асбеста в их состав входят диатомит или тренол, шиферные отходы), асбослюда, асбозонолит (кроме асбеста в их состав входят диатомит, слюда и обожженная слюда - зонолит). Из этих материалов изготавливают изделия плотностью  $700 - 750 \text{ кг/м}^3$ , их теплопроводность относительно высока, они применяются до  $250 - 300^{\circ}$ .

Более эффективными являются теплоизоляционные асбомагнезиальные материалы, например, состоящий из 15 % распушенного асбеста и 85 % смеси двойной углекислой соли кальция и магния. Из этих материалов изготавливают плиты, сегменты, но они непрочны, достаточно дороги, применяются до  $350 - 500^{\circ}\text{C}$ .

Более дешевыми являются известковотрепельные запарные массы, в состав которых входят диатомит или трепел, известь, асбест. Благодаря наличию извести и выпариванию воды получается пористая структура плотностью  $350 - 400 \text{ кг/м}^3$ . Температура их применения ограничивается  $600^{\circ}\text{C}$ . К этой же группе изделий можно отнести асбестоцементные, асбовермикулитовые, зонолитовые плиты, имеющие достаточно низкий коэффициент теплопроводности и высокую температуру применения (до  $1100^{\circ}\text{C}$ ).

Перлитовые материалы получают вспучиванием при температуре до  $1000^{\circ}\text{C}$  природного материала перлита. Например, перлиталь - это вспученный перлит и огнеупорная глина. Перлитовые материалы используются в виде засыпок, кирпичей, блоков. Плотность их — от 300 до  $500 \text{ кг/м}^3$ , температура применения  $900^{\circ}\text{C}$ .

Широкое применение получили волокнистые материалы, которые обладают эластичностью, трещиностойкостью и термостойкостью, значительной прочностью, малой плотностью и малой теплопроводностью.

Температура длительного применения волокнистых материалов определяется составом волокон.

С применением волокон того или иного состава изготавливаются следующие теплоизоляционные изделия: рулонированный войлок, маты, плиты, скорлупы, цилиндры, ткань, шнур, картон, бумага и т. п. Применение изделий, содержащих волокно, позволяет существенно снизить материалоемкость футеровки, упростить ее конструкцию, снизить тепловые потери. Химическая устойчивость волокнистой теплоизоляции зависит от

состава волокна и связки. Так, минеральное, кремнеземистое и шлаковое волокна рекомендуется применять только в окислительной или нейтральной атмосфере, каолиновое и высокоглиноземистое - в окислительной и восстановительной атмосфере, оксидное (глиноземистое, циркониевое) - практически в любой (кроме фтора) атмосфере или в вакууме. Керамические алюмосиликатные и оксидные волокна стойки к действию воды, водяного пара и масел, негигроскопичны (влажность их не более 0,2 %), стойки к большинству минеральных кислот и щелочей (кроме плавиковой, фосфорной и сильных щелочей), не смачиваются расплавами цветных металлов и их сплавов, имеют хорошую фильтрующую способность, биостойки. Температура применения волокон на воздухе: минерального волокна 750, шлакового 600, стеклянного 400, кремнеземистого 1000 - 1100, каолинового 1150, высокоглиноземистого с добавкой окиси хрома 1450, цуллитового 1450, циркониевого - до 2000°C.

#### 1.2.4 Жаропрочные материалы

Ряд деталей печей, находящихся в рабочем пространстве, т. е. в зоне высоких температур, испытывает большие механические нагрузки. Это подовые плиты, тигли, муфели, различные экраны, загрузочно-разгрузочные устройства, транспортирующие устройства, крепления нагревателей и т. д.

К материалам, из которых изготавливаются эти детали, предъявляются определенные требования:

1. Достаточная жаростойкость (окалиностойкость). Под жаростойкостью понимается способность материалов сопротивляться коррозионному воздействию газов при высоких температурах;

2. Достаточная жаропрочность. Жаропрочность характеризуется сопротивлением ползучести, определяющейся пределом ползучести  $\sigma_n$ , т. е. тем напряжением, которое вызывает заданную деформацию за срок службы детали при рабочей температуре, и длительной прочностью, определяющейся пределом длительной прочности  $\sigma_{дп}$ , т. е. напряжением, при котором в результате ползучести материал разрушается за определенное время при данной температуре;

3. Достаточная технологичность. Материал должен волочиться, кататься, свариваться, подвергаться механической обработке;

4. Достаточная дешевизна и недефицитность. В зависимости от свойств стали и сплавы, применяемые в печестроении, подразделяют на следующие группы:

5. Коррозионностойкие (нержавеющие), к которым относятся стали

и сплавы, обладающие стойкостью против электрохимической коррозии (атмосферной, почвенной, щелочной, кислотной, солевой, морской и др.);

6 Окалиностойкие (жаростойкие), к которым относятся стали и сплавы, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 550°C, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии;

7. Жаропрочные, к которым относятся стали и сплавы, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной окалиностойкостью.

Самыми распространенными в электропечестроении являются хромоникелевые стали и сплавы. Эти металлы имеют высокие жаростойкость и жаропрочность, хорошо обрабатываются.

До 800°C целесообразно применять стали с содержанием хрома около 18 %, а никеля 9-10 %. Это стали 08X18H10, 12X18H9, 17X18H9 и 12X18H9T, которые отличаются друг от друга содержанием углерода, а также титана.

Для 1000 - 1100°C применяются стали 20X23H18, 20X25H20C2. На эти же температуры имеются литейные стали 40X24H12CЛ и 20X25H19C2Л.

Для 1100 - 1200°C применяются высоколегированные сплавы ХН77ТЮ, ХН60Ю, ХН70Ю и Х28Н48В5Л.

Теплопроводность хромоникелевых сталей и сплавов ниже, чем хромистых и углеродистых сталей: она, так же как теплоемкость, зависит от температуры.

Эти стали и сплавы хорошо свариваются и обрабатываются. Они нашли широкое применение при изготовлении деталей печей, работающих при высоких температурах и механических нагрузках. Недостатком их в сравнении с хромистыми сталями является большой температурный коэффициент линейного расширения, т. е. склонность к короблению, а также значительно большая стоимость.

Наряду с жаропрочными сталями и сплавами некоторое применение нашли более дешевые жаропрочные чугуны с содержанием хрома до 10 %, никеля - до 20 % и кремния 2 - 3 %.. Эти чугуны могут работать до 800°C, не коробясь. Увеличение в составе чугуна хрома до 25 —30 % дает возможность работать до 1000°C в ненагруженном состоянии.

Кроме того, имеются хромоалюминиевые чугуны, которые можно, например, использовать при изготовлении подовых плит, работающих до 900°C.

Для увеличения жаростойкости сталей используется их алитирование, т. е. насыщение поверхности алюминием, что позволяет применять простые и малолегированные стали при достаточно высоких температурах в деталях, имеющих малые нагрузки.

В высокотемпературных печах с окислительной атмосферой при 1000 — 1350°С применяются карборундовые детали. Карборунд имеет достаточную теплопроводность, близкую к теплопроводности стали, но значительно меньшую прочность. Из карборунда изготавливают на пример, подовые плиты, направляющие толкательных печей.

В высокотемпературных вакуумных печах и в печах с контролируемыми атмосферами для изготовления жаропрочных деталей применяются графит, молибден, вольфрам. Из этих материалов делают экраны, различные крепежные детали.

### **1.2.5 Материалы для нагревательных элементов электропечей сопротивления**

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

К этим материалам предъявляются следующие требования:

1. Достаточная жаростойкость (окалиностойкость).
2. Достаточная жаропрочность - механическая прочность при высоких температурах, необходимая для того, чтобы нагреватели могли поддерживать сами себя.

3. Большое удельное электрическое сопротивление. Чем меньше удельное электрическое сопротивление, тем больше длина нагревателя и меньше его поперечное сечение. Сечение нагревателя должно быть достаточно большим для обеспечения необходимого срока службы. Длинный нагреватель не всегда возможно разместить в печи. Таким образом, желательно, чтобы материалы нагревательных элементов имели высокое значение удельного электрического сопротивления.

4. Малый температурный коэффициент сопротивления. Данное требование должно выполняться для того, чтобы мощность, выделяемая нагревателями в горячем и холодном состояниях, была одинаковой или отличалась незначительно. Если температурный коэффициент сопротивления велик, для включения печи в холодном состоянии приходится использовать трансформаторы, дающие в начальный момент пониженное напряжение.

5. Постоянство электрических свойств. Некоторые материалы, например карборунд, с течением времени стареют, т. е. увеличивают



электрическое сопротивление, что усложняет условия их эксплуатации. Требуется трансформаторы с большим количеством ступеней и диапазоном напряжений.

6. 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 железохромоалюми-ниевые сплавы. Свойства и характеристики этих сплавов представлены в [22].

Двойные сплавы состоят из никеля и хрома (хромоникелевые сплавы), тройные - из никеля, хрома и железа (железохромоникелевые сплавы). Тройные сплавы - дальнейшее развитие хромоникелевых сталей, так как Х23Н18, Х15Н60-Н применяются примерно до 1000°C.

Двойные сплавы - это, например, Х20Н80-Н. Они 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 крипоустойчивы, пластичны, хорошо обрабатываются, свариваются.

Хромоникелевые сплавы имеют удовлетворительные электротехнические свойства, не стареют, немагнитны. Основной их недостаток — высокая стоимость и дефицитность, в первую очередь никеля. Поэтому были созданы желе зохромоалюминиевые сплавы, содержащие железо, хром и до 5 % алюминия. Эти сплавы могут быть более жаростойкими, чем хромоникелевые, т. е. могут работать до 1400°C (например, сплав Х23Ю5Т). Однако эти сплавы достаточно хрупки и непрочны, особенно после пребывания при температуре, большей 1000°C. Поэтому после работы нагревателя в печи его 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 является также их взаимодействие с шамотной футеровкой и окислами железа. В местах соприкосновения этих сплавов с футеровкой при температуре эксплуатации выше 1000°C 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°C); X23Ю5 (1200°C); X27Ю5Т (1300°C) и X23Ю5Т (1400°C).

В последнее время разработаны сплавы типа X15Н60Ю3 и X27Н70Ю3, т. е. с добавлением 3 % алюминия, что значительно улучшило жаростойкость сплава, а наличие никеля практически исключило имеющиеся у железохромо-алюминиевых сплавов недостатки.

Сплавы X15Н60Ю3, X27Н60Ю3 не взаимодействуют с шамотом и окислами железа, достаточно хорошо обрабатываются, механически прочны, нехрупки.

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

Для печей с защитной атмосферой и вакуумных 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 до 1700°C, а в защитной атмосфере - до 2200°C. Температура применения в вакууме ниже, что объясняется испарением молибдена. Нагреватели из вольфрама могут работать до 3000°C.

В отдельных случаях применяются нагреватели из ниобия и тантала.

Нагревательные элементы большинства промышленных печей выполняются либо из ленты, либо из проволоки (рис. 1.30 – 1.34). Обычно для изготовления нагревателей промышленных печей применяется проволока диаметром от 3 до 7 мм. Однако для печей с рабочей температурой 1000° С и выше следует брать проволоку диаметром менее 5 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 чересчур 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.

Практика установила вполне определенные, рекомендуемые соотношения между диаметром проволоки, шагом и диаметром спирали для проволоки от 3 до 7 мм диаметром. Эти соотношения следующие:  $h \geq 2d$  и

$D = (6 \div 8)d$  для нихрома и  $D = (4 \div 6)d$  - для менее прочных железохромоалюминиевых сплавов.

Здесь  $T$  - шаг спирали,  $D$  – диаметр спирали,  $d$  — диаметр проволоки.

Для более тонких проволок отношение диаметров спирали и проволоки, а также шаг спирали обычно берутся больше. Значительно распространены спиральные нагреватели на керамических трубках. Такие нагреватели с точки зрения излучения и размещения мощности на стенках печи практически почти эквивалентны свободно излучающим спиральям и, наоборот, они существенно эффективнее, чем спирали в пазах и полочках.

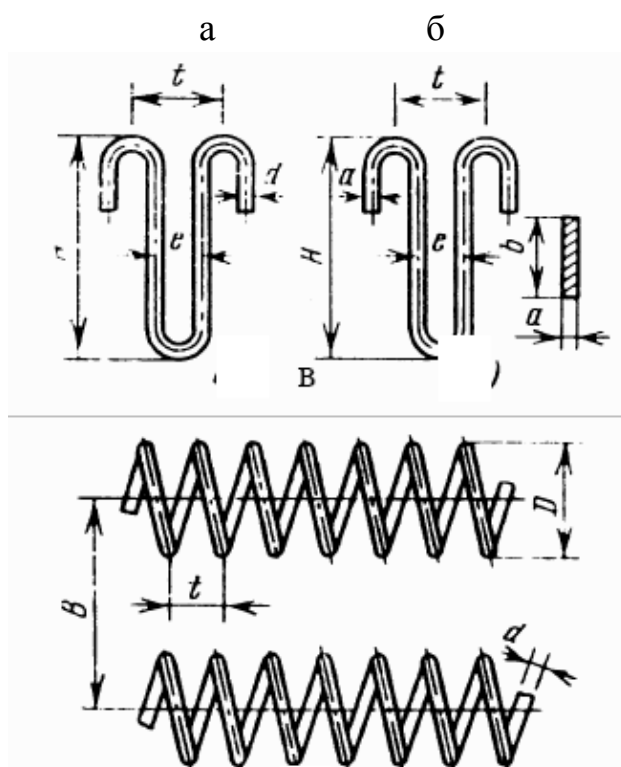


Рис. 1.30. Эскизы проволочных и ленточных нагревателей с обозначением основных  
 а – проволочный зигзагообразный;  
 б – то же ленточный;  
 в – спиральный

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 1,5 – 2 диаметра спирали. Обычно для изготовления нагревателей промышленных печей применяется проволока диаметром от 3 до 7 мм.

Однако для печей с рабочей температурой  $1000^{\circ}\text{C}$  и выше следует брать проволоку диаметром менее 5 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 чересчур 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.

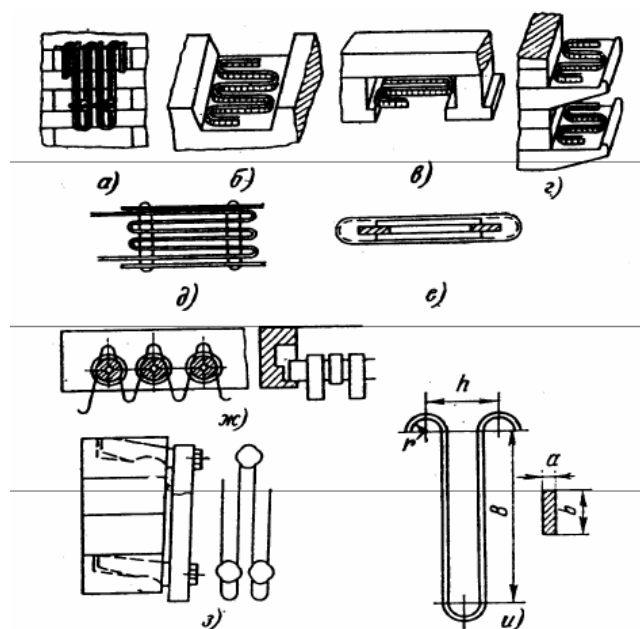


Рис. 1.31 – Конструкции ленточных нагревателей:

а - ленточные зигзагообразные нагреватели на боковой стенке на металлических крючках; б - ленточный зигзагообразный нагреватель в поду; в - то же в своде; г - то же на керамических полочках; д - выемной высокотемпературный рамочный элемент; е - низкотемпературный рамочный элемент; ж - нагреватель «плоская волна» на керамических трубках; з - ленточный зигзагообразный нагреватель на выемных крючках; и - условное обозначение размеров ленточного зигзагообразного нагревателя

Практика установила вполне определенные, рекомендуемые соотношения между диаметром проволоки, шагом и диаметром спирали для проволоки от 3 до 7 мм диаметром. Эти соотношения следующие:  $h \geq 2d$  и

$D = (6 \div 8)d$  для нихрома и  $D = (4 \div 6)d$  - для менее прочных железохромоалюминиевых сплавов. Здесь  $T$  - шаг спирали,  $D$  - диаметр спирали,  $d$  - диаметр проволоки.

Для более тонких проволок отношение диаметров спирали и проволоки, а также шаг спирали обычно берутся больше. Значительно распространены спиральные нагреватели на керамических трубках. Такие нагреватели с точки зрения излучения и размещения мощности на стенках печи практически 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 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.

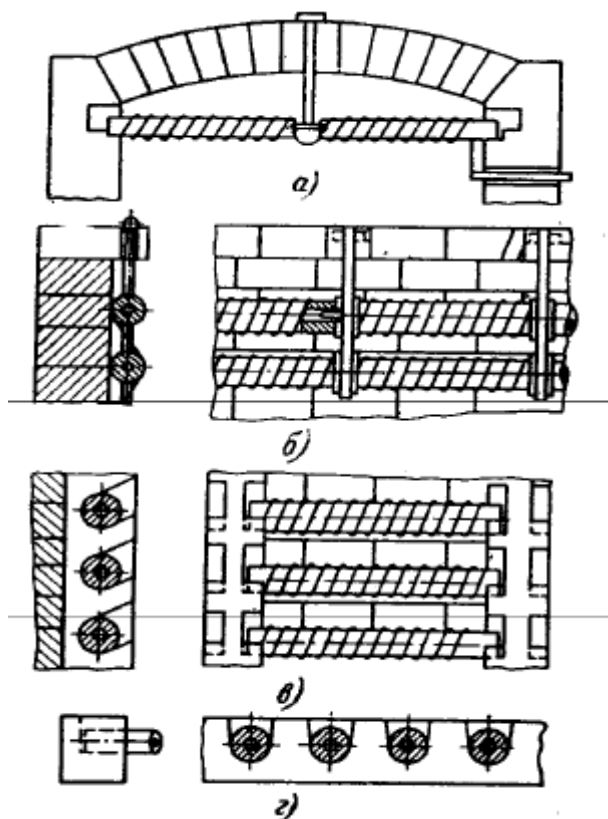


Рис. 1.32– . Конструкции проволочных спиральных нагревателей на керамических трубках:

а - сводовые нагреватели; б - трубки на боковых стенках, крепление на жароупорных подвесках; в - то же в пазах керамических столбиков; г - трубки в поду

Чем гуще ленточные зигзагообразные нагреватели, тем более длинный нагреватель можно разместить в печи, но тем больше взаимозащитное экранирование витков, тем хуже используется поверхность ленты. Поэтому установились принятые размеры ленточных зигзагообразных нагревателей, обеспечивающие достаточную их прочность и малое взаимозащитное экранирование. Наиболее употребительное отношение ширины ленты к ее толщине равно 10.

Для температур на нагревателе до  $1000^{\circ}\text{C}$  в промышленных печах применяют ленту размером не менее  $1 \times 10$  мм, при более высоких температурах - не менее  $2 \times 20$  мм.

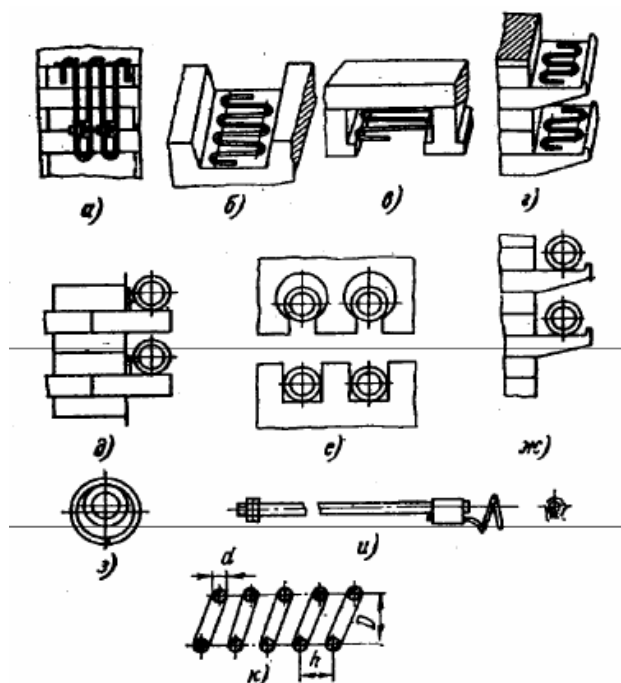


Рис. 1.33 – Проволочные нагреватели:

а - проволочный зигзагообразный нагреватель на боковой стенке на металлических крючках; б - проволочный зигзагообразный нагреватель в поду; в - то же в своде; г - то же на керамических полочках; д - проволочная спираль на выступающих кирпичах боковой стены с привязкой к крючкам; е - проволочная спираль в сводовых камнях и в пазах пода; ж - проволочная спираль на керамических полочках; з - проволочная спираль на керамической трубке; и - вывод проволочного нагревателя; к - условное обозначение размеров проволочного нагревателя

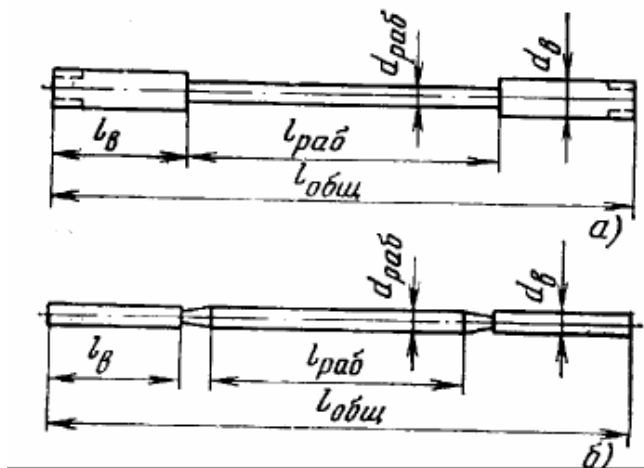


Рис. 1.34 -- Эскизы карборундовых нагревателей  
а – целый нагреватель;  
б – составной нагреватель

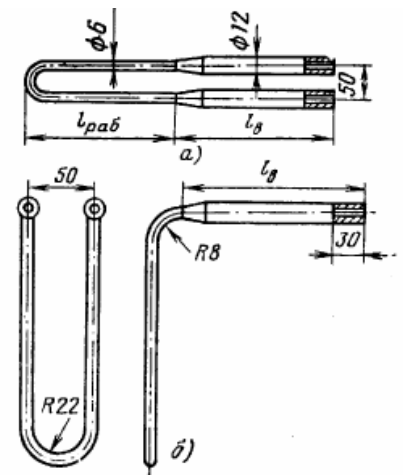


Рис. 1.35 – Эскизы нагревателей из дисилицида молибдена  
а - с прямыми выводами;  
б - с выводами, отогнутыми под углом  $90^\circ$

В ЭПС с номинальной температурой  $1350^\circ\text{C}$  применяются карборундовые нагреватели (SiC) (рис. 1.34), а в ЭПС с номинальной температурой  $1700^\circ\text{C}$  - нагреватели, изготовленные из дисилицида молибдена (MoSi<sub>2</sub>) (рис. 1.35) и хромит лантана (рис. 1.36).



Рис. 1.36 – Электронагреватель хромитлантановый спиральный

Обозначение в марках стали и сплавов.

Две первые цифры марки указывают содержание углерода в сотых долях процента.

Буквы за цифрами означают: С - кремний, Х - хром, Н - никель, Ю - алюминий, Т - титан, Г - марганец, М - молибден, К - кобальт, В - вольфрам, Ц - цирконий, Р - бор, А - азот.

Цифры, стоящие после букв, указывают примерное содержание легирующего элемента в процентах. Отсутствие цифр указывает, что содержание этого элемента не превышает 1,5 %.

В конце буква А означает высококачественная (ый), Н - для нагревательного элемента, Л - литая (ой).



### **1.3 Рациональная эксплуатация электрических печей сопротивления.**

Стоимость процессов нагрева или плавления материалов или изделий в электрических печах сопротивления во многих производствах является весьма существенной составляющей стоимости выпускаемой продукции. Печи сопротивления являются крупным потребителем электроэнергии, а на многих заводах даже одним из основных, поэтому организация рациональной эксплуатации таких печей имеет существенное значение.

Снижение себестоимости проводимых в электрических печах процессов нагрева может быть осуществлено в первую очередь в результате:

- а) повышения производительности печи;
- б) повышения надежности работы печей, снижения количества и длительности простоев, вызванных авариями печей;
- в) снижения удельного расхода электроэнергии.

Ввиду того, что проводимые в электрических печах процессы являются весьма энергоемкими, главным путем уменьшения себестоимости процесса нагрева является снижение удельного расхода электроэнергии, и способы, позволяющие его достигнуть, являются основными для повышения эффективности работы электропечей сопротивления. Однако отделить их от двух других путей, указанных выше, очень трудно, так как все они тесно связаны друг с другом. Так, повышение производительности печи приводит к экономии электроэнергии; повышение стойкости и срока службы нагревателей приводит как к повышению надежности работы печи, так и к увеличению производительности труда и снижению удельного расхода энергии (за счет уменьшения числа простоев на ремонт); автоматизация температурного режима печи опять-таки приводит как к сокращению эксплуатационного персонала (обслуживание каждой бригадой большего числа печей), так и к повышению надежности работы и к экономии энергии. Поэтому представляется целесообразным совместное рассмотрение всех этих путей, ведущих к рациональной эксплуатации электрических печей сопротивления. Для этой цели необходимо рассмотреть следующие мероприятия:

- 1) обеспечение надежности работы электротермического оборудования;
- 2) повышение производительности печей;
- 3) уменьшение тепловых потерь печей;
- 4) уменьшение потерь на аккумуляцию тепла;
- 5) использование тепла нагретых изделий и тары.

Надежность работы всякой электрической печи сопротивления определяется главным образом стойкостью ее нагревательных элементов и жароупорных деталей. Правильный расчет нагревательных элементов и

правильная их эксплуатация, в первую очередь работа их при рекомендуемых, а не максимально допустимых температурах, и правильный выбор их сечений обеспечат устойчивую работу нагревателей в течение нескольких лет. Аналогично этому правильный выбор марки стали, соответствующей по своим свойствам условиям работы жароупорных деталей, позволит также обеспечить длительную надежную работу печи. Например, жароупорные муфели имеют срок службы, в несколько раз больший по сравнению с муфелями из углеродистой стали. При высоких температурах следует всегда при этом предпочесть литые детали, имеющие большую стойкость. Например, в конвейерных печах на 850-900°C срок службы литых звеньев конвейера составляет 2-3 года против 6 мес. Для штампованных звеньев при увеличенной лишь на 50-100% массе. Производительность электрических печей сопротивления очень сильно влияет на их к.п.д. и удельный расход энергии. Потребляемая электропечью из сети энергия расходуется на полезное тепло (нагрев изделий) и на тепловые потери. Полезно используемое тепло пропорционально производительности печи, тогда как тепловые потери последней в большей своей части являются постоянными (мощность холостого хода). При снижении производительности печи ее тепловые потери распределяются на меньшее количество изделий и ее к.п.д. падает, а удельный расход энергии возрастает. В табл. 1.8 даны к.п.д. и удельный расход энергии (в процентах к расходу энергии при номинальной нагрузке) в зависимости от производительности печи для случаев, когда мощность постоянных тепловых потерь составляет 25 и 50% мощности печи.

Увеличение производительности электропечи сопротивления возможно лишь тогда, когда она обладает известным запасом мощности. Наличие такого запаса может быть проверено сравнением фактической производительности печи с максимально возможной.

В течение периода нагрева мощность печи не остается постоянной, так как в конце процесса вступает в действие терморегулятор и снижает ее среднюю мощность. Для процессов, не требующих длительной выдержки, таких как закалка, нормализация, отпуск, нагрев под штамповку и ковку, этот процесс регулирования начинается обычно после того, как прошло 2/3 периода нагрева, причем постепенно средняя мощность печи снижается от номинального значения до значения мощности холостого хода. Поэтому средняя мощность печи за цикл может быть приравнена примерно 85% ее максимального значения. Это же значение средней мощности может быть сохранено и для методических многозонных печей.

Часть средней мощности печи пойдет на нагрев изделий, а часть – на покрытие тепловых потерь. Поэтому максимальная часовая производительность печи, кг/ч, может быть определена из следующего выражения

$$g_{\max} = \frac{0,85P_{\text{печи}} - P_{\text{пот}}}{B}; \quad (1.1)$$

здесь  $P_{\text{печи}}$  – паспортная мощность печи, может быть проверена по показанию ваттметра или амперметра и вольтметра;

$P_{\text{пот}}$  – мощность тепловых потерь печи, берется из ее паспорта или определяется опытным путем по показаниям счетчика при опыте холостого хода печи как  $P_{\text{пот}} = W_{\text{сч}}/\tau$ ;

$B$  – теоретический расход энергии, кВт·ч/кг, необходимый для нагрева изделий до температуры, требуемой технологическим процессом.

При наличии жароупорной тары (поддоны, муфели, горшки и тому подобное) ее теплосодержание, отнесенное к 1 кг массы изделий, включается в значение  $B$ .

Минимальный удельный расход энергии, кВт·ч/кг, может быть определен делением часового расхода энергии на часовую производительность печи:

$$A_{\min} = \frac{0,85P_{\text{печи}}}{g_{\max}} = \frac{0,85P_{\text{печи}} B}{0,85P_{\text{печи}} - P_{\text{пот}}}. \quad (1.2)$$

Таблица 1.8

Влияние производительности печи на ее энергетические показатели

Показатель	Производительность печи, %				
	50	70	100	150	200
Тепловые потери печи 25%					
Коэффициент полезного действия	0,60	0,69	0,75	0,83	0,875
Удельный расход энергии, %.	1,25	0,83	1,00	1,60	2,50
Тепловые потери печи 50%					
Коэффициент полезного действия	0,33	0,43	0,50	0,60	0,67
Удельный расход энергии, %.	1,50	1,165	1,00	1,33	1,50

**Пример.** Печь Н-60 работает на нагреве стальных изделий под закалку. Температура нагрева 820°C, теоретический расход энергии при этой температуре  $B=0,156$ кВт·ч/кг, мощность печи 60 кВт, ее потери холостого хода 13 кВт.

$$g_{\max} = \frac{0,85 \cdot 60 - 13}{0,156} = 244 \text{ кг/ч};$$

$$A_{\min} = \frac{0,85 \cdot 60}{244} = 0,209 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}.$$

Мощность печей в эксплуатации часто оказывается меньше номинальной либо вследствие понижения напряжения в питающей сети, либо из-за старения нагревательных элементов. Показатели работы печей в этом случае резко ухудшаются.

Так, при снижении напряжения сети на 10% мощность печи Н-60 снизится на 19%, до  $60 \cdot 0,81 = 48,5$  кВт, поэтому ее максимальная часовая производительность упадет до

$$\frac{0,85 \cdot 48,5 - 13}{0,156} = 181 \text{ кг/ч},$$

а минимальный удельный расход энергии возрастет до

$$\frac{0,85 \cdot 48,5}{181} = 0,229 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}.$$

Поэтому причины снижения мощности печи необходимо устранять, в первом случае, приняв меры к повышению подаваемого к печи напряжения до номинального значения (переключением отводов питающего трансформатора или усилением сети), во втором случае, заменив нагреватели на новые, даже если они и не перегорели.

Выражения (1.1) и (1.2) относятся к печам, работающим непрерывно, круглосуточно. Если же печь работает в две или одну смену в сутки, то в эти выражения следует внести коррективы. При этом следует рассмотреть три варианта работы печи.

При первом варианте печь отключается на все время простоя, следовательно, при двухсменной работе она будет включена на 16 ч, а 8 ч будет остывать, при односменной работе она будет под током 8 ч, а 16 ч будет отключена. В обоих этих случаях необходимо, очевидно, за время работы скомпенсировать то количество тепла, которое было потеряно за время простоя. Исследование ряда кривых остывания садочных печей показало, что при мощности тепловых потерь в 25 % номинальной мощности печь через 8 ч остывает в среднем до 78% своей номинальной температуры, через 16 ч – до 62%. Считаем, что количество отдаваемого остывающей печью тепла пропорционально ее температуре, получаем, что в данном случае средняя мощность тепловых потерь за 8 ч простоя составляет 89% их

номинального значения, а за 16 ч – 81%. Отсюда полезная энергия, отдаваемая изделиям при двухсменной работе, будет равна

$$(0,85P_{\text{печи}} - P_{\text{пот}})16 - 0,89P_{\text{пот}} \cdot 8,$$

а максимальная часовая производительность

$$g_{\text{макс}} = \frac{(0,85P_{\text{печи}} - P_{\text{пот}})16 - 0,89P_{\text{пот}} \cdot 8}{16B} = \frac{0,85P_{\text{печи}} - 1,44P_{\text{пот}}}{B} \quad (1.3)$$

и при односменной работе будем иметь аналогично

$$g_{\text{макс}} = \frac{(0,85P_{\text{печи}} - P_{\text{пот}})8 - 0,81P_{\text{пот}} \cdot 16}{8B} = \frac{0,85P_{\text{печи}} - 2,6P_{\text{пот}}}{B}. \quad (1.4)$$

Минимальный удельный расход энергии по-прежнему может быть определен из выражения

$$A_{\text{мин}} = \frac{0,85P_{\text{печи}}}{g_{\text{макс}}}.$$

В большинстве случаев, особенно при односменной работе, печь включается до начала смены с тем, чтобы к началу последней была достигнута рабочая температура. Можно принять, что при таком предварительном разогреве восстанавливается 75% тепла, потерянного печью в период остывания, а остальные 25% - в период ее работы. При этом максимальная часовая производительность печи будет равна при двухсменной работе

$$g = \frac{0,85P_{\text{печи}} - 1,11P_{\text{пот}}}{B} \quad (5)$$

и при односменной работе

$$g = \frac{0,85P_{\text{печи}} - 1,4P_{\text{пот}}}{B}. \quad (6)$$

Удельный расход энергии при этом определяется тем количеством энергии, которое будет израсходовано как за период работы печи, так и за период ее разогрева. Для двухсменной работы он будет равен:

$$A_{\text{мин}} = \frac{6 \cdot 0,85P_{\text{печи}} + 0,89P_{\text{пот}} \cdot 0,75 \cdot 8}{16g_{\text{макс}}} = \frac{0,85P_{\text{печи}} + 0,33P_{\text{пот}}}{g_{\text{макс}}} \quad (7)$$

а для односменной работы

$$A_{\text{мин}} = \frac{8 \cdot 0,85P_{\text{печи}} + 0,81P_{\text{пот}} \cdot 0,75 \cdot 16}{8g_{\text{макс}}} = \frac{0,85P_{\text{печи}} + 1,2P_{\text{пот}}}{g_{\text{макс}}}. \quad (8)$$

При третьем варианте печь вообще не отключается в период простоя между сменами. В этом случае часовая производительность печи (отнесенная к ее часам работы) останется такой же, как и при круглосуточной работе, а удельный расход энергии будет равен при двухсменной работе

$$A_{\text{мин}} = \frac{0,85P_{\text{печи}} + 0,5P_{\text{пот}}}{g_{\text{макс}}} \quad (9)$$

и при односменной работе

$$A_{\text{мин}} = \frac{0,85P_{\text{печи}} + 2P_{\text{пот}}}{g_{\text{макс}}}. \quad (10)$$

В табл. 1.10 даны показатели работы печи Н – 60 при нагреве стальных изделий до температуры 820°С при различных режимах работы (в скобках даны значения в процентах соответствующих значений при круглосуточной работе).

Из табл. 1.10 видно, что первый вариант неприемлем, так как он дает наивысший удельный расход энергии. Что же касается второго и третьего вариантов, то они равноценны по расходу электроэнергии, но третий вариант дает несколько большую часовую производительность печи. Одновременно таблица наглядно показывает, насколько простои ухудшают показатели работы печей.

Совершенно очевидно, что печь должна работать круглосуточно, ибо простои ее связаны с большими потерями энергии. Поэтому недопустимо пользоваться электропечами для регулирования нагрузки предприятия, так как такое регулирование, снижая пик нагрузки в период максимума, в конечном счете приводит к значительному перерасходу электроэнергии. Также необходимо тщательно подготавливаться к операциям загрузки и выгрузки печей, с тем, чтобы свести их длительность до минимума, и своевременно проводить предупредительный ремонт нагревателей, футеровки и механизмов печей во избежание аварийных простоев.

Таблица 1.10

Энергетические показатели печи Н – 60 при различных режимах работы

Режим работы	Двухсменная работа		Односменная работа	
	Максимальная часовая производительность, кг/ч	Минимальный удельный расход энергии, кВт·ч/кг	Максимальная часовая производительность, кг/ч	Минимальный удельный расход энергии, кВт·ч/кг
При простое печь отключена	207 (85)	0,246 (118)	110 (45)	0,463 (221)
Печь разогревается перед началом работы	234 (96)	0,236 (112)	211 (86,5)	0,316 (151)
Печь не отключается на время простоя	244 (100)	0,236 (112)	244 (100)	0,316 (151)

Полученные выражения (1) – (10) действительны для процессов с малым временем выдержки. Если же последнее велико, то, обозначив отношение времени нагрева изделий  $\tau_n$  к времени всего цикла  $\tau_{цикл}$  через  $K$ , получим:

$$g'_{\max} = g_{\max} \frac{\tau_n}{\tau_{цикл}} = g_{\max} K \quad (11)$$

$$A'_{\min} = A_{\min} + \frac{P_{пот}}{g_{\max}} \frac{1-K}{K}. \quad (12)$$

Для вышеуказанного примера работы печи Н – 60 будем иметь при  $K=0,5$

$$g'_{\max} = 244 \cdot 0,5 = 122 \text{ кг/ч};$$

$$A'_{\min} = 0,209 + \frac{13}{244} \cdot \frac{1-0,5}{0,5} = 0,262 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}.$$

Разумеется, все вышеизложенное не может быть применено ко всем печам, принятые цифровые допущения могут довольно сильно варьировать у

печей различных типов, однако изложенная методика может быть применена ко всем садочным печам, и дать в каждом конкретном случае ответ о целесообразности того или иного метода включения печей.

В действующей печи с автоматическим регулированием температуры легко опытным путем приближенно определить, близка ли фактическая производительность к максимальной по работе автоматического регулятора. Если во второй половине нагрева в печи происходят частые отключения и период отключенного состояния велик (50-70% общего времени), то печь используется недостаточно, ее производительность может быть увеличена. Наоборот, если период отключенного состояния печи невелик, а в печи периодического действия отключения наступают лишь в конце периода нагрева, то производительность ее близка к максимальной и без увеличения мощности не может быть повышена.

Если окажется, что фактическая часовая производительность печи меньше максимальной, определенной по (1) – (12), то следует принять меры к ее увеличению. Это можно сделать, либо сократив время пребывания изделия в печи (сокращение времени нагрева для печи периодического действия, увеличение скорости перемещения изделий в методической печи), либо увеличив загрузку пода печи. Разумеется, для этого необходимо иметь возможность увеличить производительность печи, например отключением части работающих печей. Сокращение времени пребывания изделий в печи, т.е. ускорение их нагрева, может быть достигнуто лишь путем повышения температуры в печи (изменением задания терморегулятора) и лишь тогда, когда это допустимо с точки зрения стойкости нагревательных элементов. При этом при нагреве массивных изделий температурные перепады в них должны быть просчитаны и согласованы с технологами.. Конечные температурные перепады могут быть снижены путем уменьшения температурного задания терморегулятора в конце процесса нагрева до первоначального (рис. 1.37). При этом в печах периодического действия необходимо дважды в течение цикла менять температуру уставки терморегулятора. В методических многозонных печах это может быть достигнуто намного проще, путем установки регуляторов первых зон на максимально допустимую нагревателями температуру, а последней зоны – на температуру, заданную технологическим процессом.

Увеличение загрузки пода печи может дать эффект лишь в том случае, если оно будет получено за счет более аккуратной, равномерной укладки изделий, но не за счет увеличения толщины слоя их в направлении теплового потока. Увеличение толщины слоя деталей на поду печи приведет при нагреве «тонких» изделий, к пропорциональному увеличению времени нагрева, и производительность печи останется без изменения.

При нагреве «массивных» изделий повышение толщины их слоя вызовет увеличение времени нагрева, пропорциональное квадрату этого



повышения, и производительность печи не только не возрастет, но даже уменьшится. Поэтому увеличивать загрузку пода следует весьма осторожно, проверяя полученный эффект по изменению производительности печи.

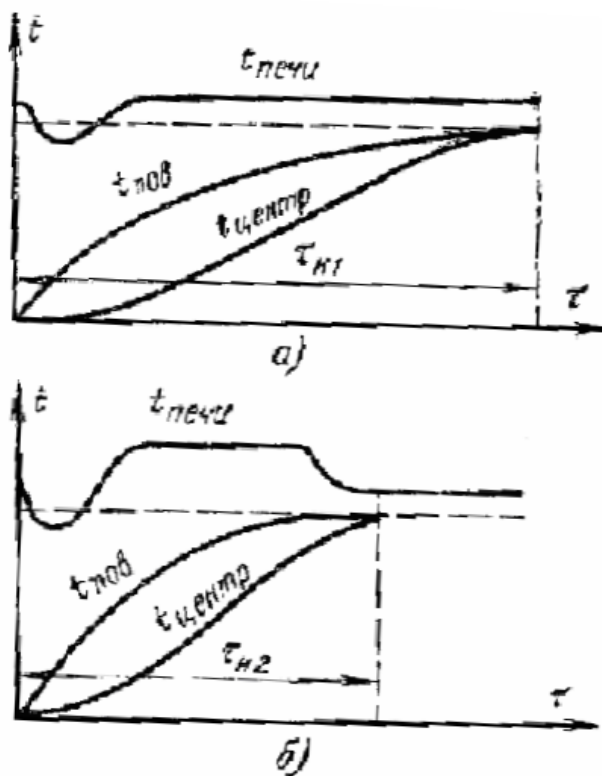


Рис. 1.37. Форсирование нагрева в печах периодического действия путем изменения задания терморегулятора.  
а – нефорсированный режим; б – скоростной режим.

Большое повышение производительности печи может дать увеличение толщины слоя изделий на поду при проведении процессов, в которых значительную часть цикла занимает выдержка при постоянной температуре. В этом случае, несмотря на получение увеличения времени нагрева, производительность печи в конечном счете может оказаться больше первоначальной, так как время выдержки при этом не изменится.

В низкотемпературных печах с принудительной циркуляцией атмосферы можно более смело увеличивать загрузку пода для получения повышенной производительности, так как в этих печах теплопередача осуществляется в основном не излучением, а конвекцией. Следует лишь так укладывать изделия, чтобы они свободно обдувались горячим воздухом. Тогда увеличение числа загруженных изделий не приведет к увеличению времени их нагрева, так как пропорционально числу изделий увеличится, и

их тепловоспринимающая поверхность и поэтому увеличение производительности печи будет пропорционально увеличению загрузки.

Когда производительность печи соответствует ее мощности и мощность используется полностью, может стать вопрос о целесообразности увеличения мощности печи. Такое повышение мощности может оказаться эффективным для изделий, не требующих длительной выдержки, т.е. при закалке, нормализации и отпуске, а также при нагреве заготовок под ковку или штамповку. При этом для печей периодического действия увеличение производительности и снижение удельного расхода электроэнергии будут иметь место также за счет сокращения времени разогрева печи.

Мощность печей может быть увеличена путем перерасчета и переделки нагревательных элементов на большую мощность. При этом должны быть проверены также питающие кабели и коммутационная аппаратура. Увеличивать мощность возможно в ряде случаев, так как многие стандартные печи имеют недостаточную мощность.

Проведенные для камерной печи мощностью 75 кВт, работающей непрерывно на нагреве стальных деталей до 850°C, расчеты показали, что повышение ее мощности в 1,5 раза дает увеличение часовой производительности на 86%, повышение к. п. д. на 20% и снижение удельного расхода энергии на 16,7% (табл. 1.11).

Проведенные на ряде предприятий опыты по увеличению мощности камерных печей подтвердили реальность этих цифр.

Паспортные данные выпускаемых в настоящее время печей сопротивления, особенно стандартных, показывают, что они имеют большие потери холостого хода, достигающие 20 – 30% номинальной мощности печей, вследствие чего к. п. д. этих печей не может быть выше 70 – 80%.

Таблица 1.11

Влияние мощности печи на ее энергетические показатели

Мощность печи, кВт	Производительность, кг/ч	Коэффициент полезного действия, %	Удельный расход энергии, кВт·ч/т
75	250	62,5	240
112,5	450	75	200

В действительности к. п. д. печей в эксплуатации значительно ниже по следующим причинам:

1. Тепловые потери печей, как показали многочисленные испытания, во многих случаях существенно выше паспортных. Объясняется это постепенным ухудшением свойств теплоизоляционных материалов в эксплуатации, а также заменой их при ремонте печи менее качественными.

2. Мощность холостого хода, указанная в паспорте печи, фиксирует не все ее тепловые потери; например, ею не учитываются потери на излучение через открытую дверцу или крышку при загрузке и выгрузке, потери на нагрев тары (поддоны), потери аккумулированного кладкой тепла в печах периодического действия.

3. Печи не все время работают при полной мощности, часть цикла (а иногда и весь цикл) они периодически включаются и отключаются терморегулятором, кроме того, они отключаются, как правило, на время загрузки и выгрузки. Поэтому средняя мощность печи за цикл составляет 75 – 90% ее номинальной мощности, а так как энергия тепловых потерь рассеивается в течение всего цикла, то значение этих потерь надо относить не к номинальной, а к средней мощности печи.

Все вышеизложенное приводит к тому, что к. п. д. печей сопротивления достигает в действительности 45 – 65% и что поэтому за счет снижения тепловых потерь можно добиться больших результатов по уменьшению удельных расходов энергии.

Тепловые потери, а, следовательно, и удельный расход энергии в значительной степени зависят от состояния тепловой изоляции печи. В среднем можно считать, что каждый кубический метр высококачественной тепловой изоляции в электрической печи дает по сравнению с низкокачественной от 5000 до 10000 кВт·ч экономии электроэнергии в год. Стоимость этой сэкономленной за год энергии будет больше стоимости теплоизоляции повышенного качества, и последняя, следовательно, окупится менее чем за 1 год. Поэтому при эксплуатации электрических печей не следует экономить на стоимости тепловой изоляции и ни в коем случае недопустимо применять суррогатные теплоизоляционные материалы, такие, как шлак, песок, мраморная крошка, кирпичный бой, шамотный порошок и т. п. Наоборот, по возможности необходимо при ремонте электропечей заменять имеющуюся в них изоляцию более совершенной.

Температура наружной поверхности кожуха электрической печи в работе должна быть равна 40 - 45°C и во всяком случае не должна превосходить 60°C. Такие температуры кожуха печи обеспечивают хорошие условия работы для обслуживающего персонала и сравнительно небольшие тепловые потери, Последние не должны превышать 300 – 400 Вт/м<sup>2</sup>. В табл. 1.12 даны значения удельных тепловых потерь стенки кожуха электрической печи в зависимости от ее температуры и состояния поверхности при температуре окружающего воздуха 10°C.

Таблица 1.12

Удельные тепловые потери стенки кожуха электропечи

Температура кожуха, °С	3	4	5	6	8	1	1
	0	0	0	0	0	00	50

Кирпичная стена, окрашенный металлический кожух, кВт/м <sup>2</sup>	0,2	0	0	0	0	1	2,4
Кожух, окрашенный алюминиевой краской, кВт/м <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	1	1
	,155	,25	,36	,47	,73	,0	,8

Пользуясь этой таблицей, можно легко определить фактические тепловые потери действующей печи. Для этого надо ее поверхность разбить на отдельные участки и замерить температуру этих участков при помощи поверхностной термопары. Температура окружающего воздуха может быть замерены ртутным термометром.

Такого рода замеры не только позволяют определить суммарные тепловые потери печи, но и выяснить участки, где вследствие неудовлетворительного состояния теплоизоляции наблюдается более высокая температура кожуха, и наметить меры для устранения этих местных перегревов.

При окраске кожуха печи алюминиевой краской температурные перепады в ее кладке изменятся и температуры наружных поверхностей увеличатся. Это увеличение, однако, не скомпенсирует полностью экономии, которая получится от снижения коэффициента лучеиспускания стен печи вследствие их окраски, и в результате тепловые потери все же снизятся на 2-3%. Поэтому окраска наружных стенок электрических печей алюминиевой краской должна производиться в обязательном порядке.

Следует тщательно следить за уплотнением выводов печи, запасных отверстий для термопар, гляделок и т.п. Всякого рода неплотности и отверстия в футеровке вызывают значительные увеличения тепловых потерь. Загрузочные и разгрузочные отверстия печи без нужды не должны оставаться открытыми, дверцы печи следует хорошо уплотнять. В методических печах, у которых загрузочные или разгрузочные отверстия открыты во время работы, следует следить, чтобы их размеры соответствовали габаритам входящих или выходящих деталей, и устраивать в этих отверстиях асбестовые ширмочки.

Влияние всякого рода отверстий и неплотностей в печи на ее тепловые потери хорошо иллюстрирует табл. 1.13.

Таблица 1.13

Тепловые потери печи через открытые отверстия	
Потери	Температура печи, °С

	600	700	800	900	1000
На излучение печи через окна, кВт/м <sup>2</sup>	17	26	36	55	75
На излучение через небольшие отверстия, кВт/м <sup>2</sup>	5	7,8	10,5	16,5	22,5

Для окон коэффициент диафрагмирования принят равным 0,5, для небольших отверстий 0,15.

Сравнение табл. 1.12 с табл. 1.13 показывает, что 1 см<sup>2</sup> отверстия соответствует по потерям 40-50 см<sup>2</sup> кладки печи, а 1 см открытого окна – даже 100-120 см<sup>2</sup> футеровки.

Всякого рода металлические скрепы, подвески свода, направляющие и другие аналогичные жароупорные детали, пронизывающие кладку печи, обуславливают повышенные тепловые потери, В среднем эти потери примерно в 30-40 раз превосходят тепловые потери теплоизолированной стены той же поверхности и поэтому такого рода детали следует применять лишь в весьма ограниченном количестве.

Большая масса, а следовательно, и большая аккумулирующая способность кладки печи могут явиться существенным источником повышения удельного расхода энергии. В первую очередь это относится к печам, работающим периодически, которые полностью остывают после каждого цикла работы. В таких печах все тепло, накопленное кладкой за время простоя, целиком рассеивается и, следовательно, полностью должно быть покрыто в период нагрева печи. Для таких печей крайне желательно свести до минимума аккумулируемое кладкой тепло за счет применения более легких и более эффективных огнеупорных и теплоизоляционных материалов. Наибольшее значение имеет тепло, аккумулируемое огнеупорной частью футеровки, поэтому его и требуется уменьшить в первую очередь.

Одним из наиболее эффективных методов является создание вместо сплошного огнеупорного слоя каркаса из столбиков, служащих для закрепления нагревателей, с заполнением промежутков ультралегковесным кирпичом, материалом со средней плотностью около 300-400 кг/м<sup>3</sup>, недостаточно прочным для крепления на нем нагревателей, но выдерживающим до 1100°С. Масса такой кладки, а следовательно, и ее аккумулирующая способность могут быть снижены в 2-2,5 раза по сравнению с обычной, и поэтому ее следует особенно рекомендовать для печей периодического действия.

Уменьшение аккумулирующей способности футеровки печей может быть достигнуто также при помощи экранной теплоизоляции. В печах с такой изоляцией слой теплоизоляционного материала заменяется рядом

экранов, выполненных из материала с малым коэффициентом лучеиспускания, например из листов алюминия или оклеенных с обеих сторон алюминиевой фольгой листов асбеста. В такого рода слоях из экранов передача тепла излучением уменьшается довольно значительно, передача теплопроводностью будет невелика из-за малого коэффициента теплопроводности воздуха, а передача конвекцией в узких промежутках между экранами также не может достигнуть существенного значения.

Для того, чтобы оценить качество такой экранной теплоизоляции и выявить область ее рационального применения, были проведены расчеты теплового сопротивления стенки толщиной в 250 мм, состоящей из наружного и внутреннего кожухов и расположенных между ними на расстоянии 25 мм друг от друга девяти экранов. Расчеты были сделаны для температурного перепада в стене в  $100^\circ\text{C}$  при различных граничных температурах ( $100-0^\circ\text{C}$ ,  $200-100^\circ\text{C}$ ,  $300-200^\circ\text{C}$  и т.д.) и для экранов с относительными коэффициентами лучеиспускания  $\epsilon=0,8$ ,  $0,4$ ,  $0,2$  и  $0,1$ , причем для простоты принималось, что коэффициенты лучеиспускания кожухов и экранов равны.

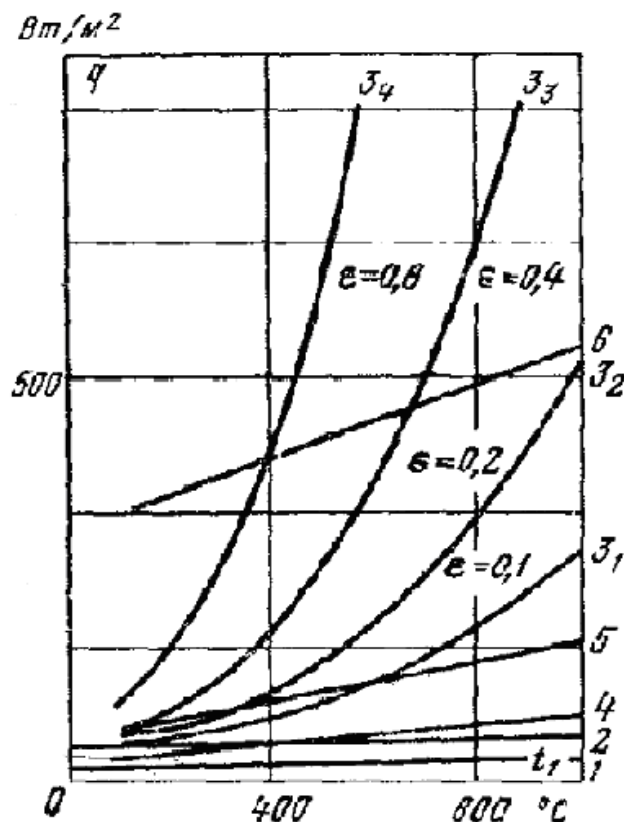


Рис. 1.38. Сравнение тепловых потерь через слои из различных теплоизоляционных материалов и через экранную теплоизоляцию.

Результаты расчетов показаны на рис. 1.38, где дана зависимость удельных теплопотерь  $q$  от температуры более горячей стенки. Кривая 1 представляет собой теплопотери через воздух теплопроводностью, кривая 2 дает сумму потерь теплопроводностью и конвекцией, а кривые 3 – результирующие потери, включающие теплопроводность, конвекцию и излучение, причем кривая  $3_1$  относится к экранам с относительным коэффициентом лучеиспускания  $\varepsilon=0,1$ , кривая  $3_2$  – к экранам с  $\varepsilon=0,2$ , кривая  $3_3$  – к экранам с  $\varepsilon=0,4$ , и, наконец, кривая  $3_4$  – к экранам с  $\varepsilon=0,8$ . Как видим, потери излучением, а следовательно, и результирующие тепловые потери стены с экранной изоляцией растут очень резко с увеличением температур на границах стены.

На том же рис. 1.38 показаны удельные тепловые потери стены такой же толщины, выполненной из различных материалов, причем кривая 4 относится к заполнению стены шлаковой ватой со средней плотностью  $200 \text{ кг/м}^3$  (один из лучших теплоизоляторов) кривая 5 – к стене, выложенной из диатомитового кирпича со средней плотностью  $600 \text{ кг/м}^3$ , и кривая 6 – к стене, выложенной из шамотного кирпича.

Из рассмотрения кривых (рис. 1.38) можно сделать выводы:

1. Экранная теплоизоляция может быть экономно применена, как правило, лишь при низких температурах; при температурах свыше  $400 - 500^\circ\text{C}$  потери на излучение становятся настолько велики, что она не может конкурировать с обычными теплоизоляционными материалами.

2. Даже при низких температурах экранная изоляция может конкурировать лишь с теплоизоляцией невысокого качества (диатомитовый кирпич  $\rho=600 \text{ кгс/м}^3$ ) при условии, если для экранов взят материал с высокими отражательными свойствами, например алюминиевая фольга. Известно, однако, что коэффициент отражения таких материалов с течением времени, особенно при нагреве, уменьшается, а их лучеиспускательная способность увеличивается. Поэтому с точки зрения уменьшения тепловых потерь печи в стационарном режиме применение экранной изоляции не может быть признано целесообразным.

Несколько иначе обстоит дело с печами периодического действия, так как в этом случае существенное значение приобретают нестационарные процессы. Возьмем тот же пример – стену толщиной в  $250 \text{ мм}$ , состоящую из девяти экранов, выполненных или из листового алюминия толщиной в  $1 \text{ мм}$  или из листового асбеста толщиной в  $2 \text{ мм}$ , оклеенного с обеих сторон фольгой, и сравним ее массу и теплосодержание с такой же примерно эквивалентной по тепловому сопротивлению стеной, выполненной из различных теплоизоляционных материалов. Результаты сравнения дает табл. 1.14.

Таблица 1.14

## Аккумулирующая способность теплоизоляционных материалов

Показатель	Экраны из алюминия	Экраны из асбеста	Шлаковая вата		Пенодиатомовый кирпич, $\rho=0,4$	Ультралегковес, $\rho=0,35$	Асбоцементные плиты, $\rho=0,25$
			$\rho=0,2$	$\rho=0,4$			
Масса 1 м <sup>2</sup> , кг	24,0	16,0	5,0	1,00	100,92,1	87,5	6,2,5
Теплоемкость 1 м <sup>2</sup> , 10 <sup>3</sup> Дж/°С	23,4	15,7	5,2,3	1,04,7		83,7	6,0,7

Из табл. 1.14 следует, что даже наилучшие теплоизоляционные материалы обладают аккумулирующей способностью, превосходящей в несколько раз аккумулирующую способность экранной изоляции. Следует, однако, иметь в виду, что во всякой печи, в том числе выполненной с экранной изоляцией, внутренняя часть кладки должна быть сконструирована из огнеупорного кирпича, так как от нее требуется известная механическая прочность, на ней должны быть размещены нагреватели, нагреваемые детали, жароупорная тара. Если учесть аккумулирующую способность такого огнеупорного слоя, то окажется, что введение экранной изоляции снижает теплосодержание печи по сравнению с хорошей теплоизоляцией лишь на 11-15%, а по сравнению с плохой – на 33-37%.

Крепежные детали экранной теплоизоляции увеличивают примерно вдвое ее теплосодержание, а также увеличивают ее конструктивную сложность и дороговизну, в связи с этим развитие средне- и высокотемпературных печей (за исключением вакуумных) с малой аккумулятивной способностью должно идти в направлении применения высококачественной теплоизоляции типа шлаковой ваты со средней плотностью 200-250 кг/м<sup>3</sup> (свод, стены) и ультралегковеса или пенодиатомового кирпича (под печи), а не по линии экранной теплоизоляции, которая может найти некоторое применение лишь в низкотемпературных, а также в вакуумных высокотемпературных печах, особенно малоинерционных, в которых ставить другие виды теплоизоляции нерационально или даже невозможно.

Тепло остывающих изделий, нагреваемых в электрических печах сопротивления, может быть использовано в тех случаях, когда допустимо медленное охлаждение изделий после нагрева, т. е. в первую очередь при отжиге.



Естественно, что при этом усложняются конструктивные решения и удорожается печь, кроме того, требуются дополнительные площади. Поэтому рекуперация целесообразна, когда замедленное остывание изделий требуется технологическим процессом, что обуславливает удлинение печи за счет пристройки камеры охлаждения.

Передача тепла от охлаждаемых «горячих» изделий к подогреваемым «холодным» может быть осуществлена следующими путями:

1. При нагреве изделий в садочных печах путем использования специальных рекуперативных камер или колодцев, в которые поочередно помещаются остывающие и подогреваемые изделия. Остывающие изделия будут передавать свое тепло стенкам камеры, нагревая их, а затем при загрузке в нее холодных изделий последние будут подогреваться, поглощая накопленное стенками тепло.

Для осуществления интенсивной теплопередачи от изделий к стенкам камеры и наоборот необходимо в течение всего цикла сохранять достаточный перепад температур между теплоизлучающими и тепловоспринимающими поверхностями. Поэтому средняя температура стен камеры должна лежать посередине между средними значениями температур остывающих и подогреваемых изделий. Кроме того, для того чтобы стены камеры являлись в максимальной степени эффективным аккумулятором тепла, необходимо, чтобы они имели большую аккумулирующую способность и значительную теплопроводность. Наиболее целесообразно было бы выполнение их из металла, например из литых чугунных блоков, хорошо теплоизолированных снаружи, тогда падающий на поверхность стен камеры тепловой поток от остывающей садки будет успевать проникать в глубь блоков и изменение температуры на внутренней поверхности последних будет минимальным.

Время пребывания садки в печи должно быть увязано с временем ее пребывания в камере рекуперации, так как иначе стены последней будут дополнительно остывать, снижая долю используемого тепла остывающей садки. Следовательно, для эффективности работы такой системы рекуперации необходимо обеспечить четкий ритм движения изделий.

Расчеты и проведенные опыты показывают, что таким путем можно сэкономить от 20 до 25% тепла остывающих деталей.

2. Процесс теплопередачи от остывающих изделий к подогреваемым может быть существенно ускорен, если исключить промежуточное звено – стенку камеры. В этом случае необходимо устройство специальных двойных рекуперативных камер или колодцев, в которые и загружаются одновременно охлаждаемые и подогреваемые детали. Теплопередача от горячих изделий к холодным может осуществляться излучением и конвекцией, при этом целесообразно применять принудительную циркуляцию атмосферы.

Для уменьшения тепловых потерь камеры рекуперации необходимо снабдить ее высокоэффективной теплоизоляцией. Кроме того, желательно обеспечить максимально полное ее использование во времени, для чего необходимо, чтобы периоды пребывания изделий в печи и в камере рекуперации были равными или кратными друг другу. В первом случае число камер рекуперации должно быть равно числу печей, во втором – кратным ему.

При данном методе рекуперации температурный напор между теплоотдающими и тепловоспринимающими поверхностями почти в 2 раза превышает значения температурного перепада при первом методе, поэтому в данном случае оказывается возможным получить больший подогрев изделий за счет тепла остывающих, что позволяет поднять долю используемого тепла остывающих изделий до 30 – 35%.

3. При нагреве изделий в методических печах использование тепла остывающих изделий может дать максимальный эффект. Передача тепла от горячих изделий к холодным может быть осуществлена непосредственно в самой печи как лучистым, так и конвективным теплообменом. Благодаря тому что горячие и холодные изделия находятся в пределах самой печи, в непосредственной близости, потери тепла сокращаются до минимума. Применение принципа противотока, встречного движения остывающих и подогреваемых изделий обеспечивает постоянный, достаточно высокий температурный перепад между ними в течение всего времени рекуперации, а следовательно, и высокую степень использования тепла остывающих изделий.

Конструктивно рекуперативные методические печи с противотоком могут выполняться самым различным способом, в виде конвейерных, толкательных, протяжных, рольганговых печей, печей с шагающим или пульсирующим подом.

На рис. 1.39 даны схемы протяжных рекуперативных печей с противотоком для ленты: входящая ветвь ленты пробегает в камере рекуперации рядом с выходящей нагретой ветвью, отнимая тепло у последней.

На рис. 1.40 показаны два варианта толкательной двухрядной рекуперативной печи для отжига ленты в рулонах. Последние установлены на поддонах, каждый из которых движется в противоположном направлении, осуществляя противоток. Существенным преимуществом таких рекуперативных толкательных печей является отсутствие холостого возврата поддонов. В обычных толкательных печах с односторонним движением нагреваемых изделий оказывается необходимым установить вдоль печи специальный рольганг для возврата холостых поддонов с разгрузочного конца печи к загрузочному. В толкательных рекуперативных агрегатах, работающих по принципу противотока, нет необходимости в таких

рольгангах, так как вышедшие из печи поддоны после разгрузки подаются ко второму пути, загружаются и вновь направляются в печь.

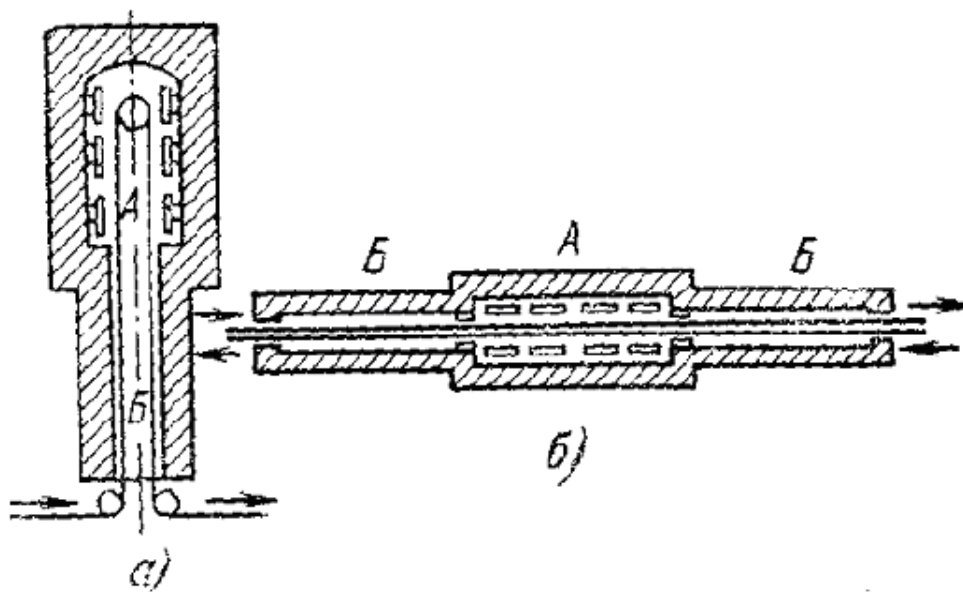


Рис. 1.39. Схемы протяжных рекуперативных печей с противотоком.  
а – вертикальная; б – горизонтальная печь; А – камера нагрева; Б – камера рекуперации.

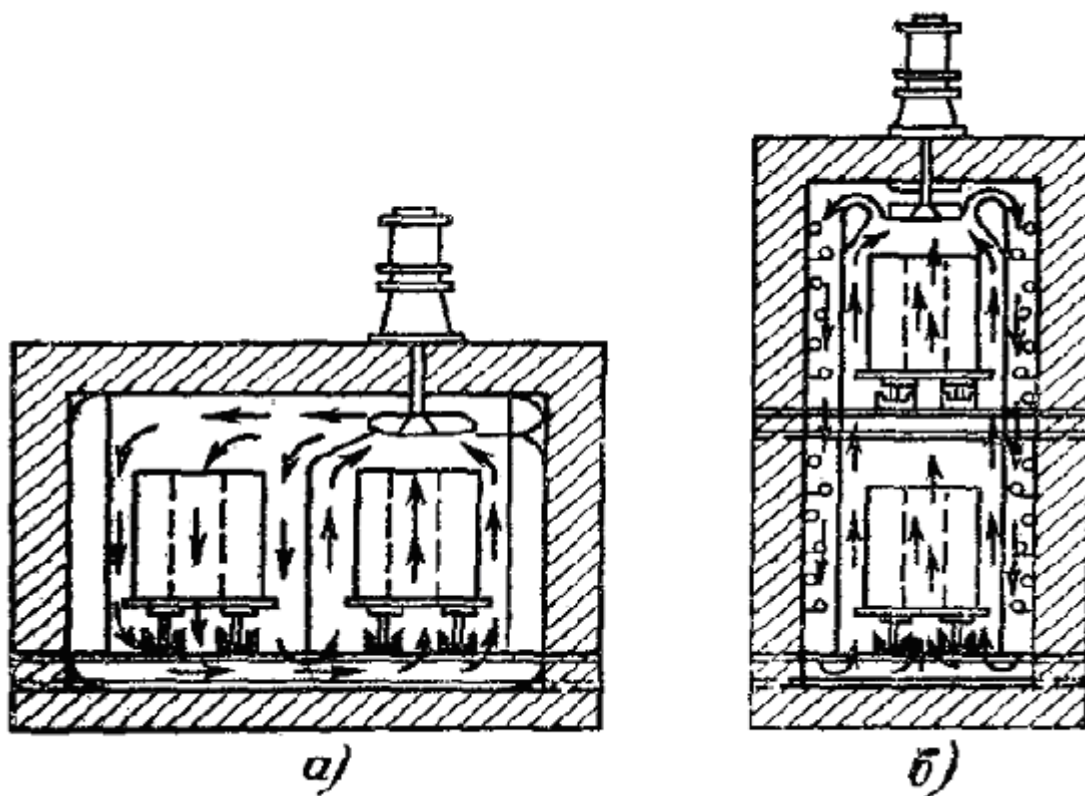


Рис. 1.40. Схема толкательной рекуперативной печи для отжига ленты в рулонах.

а – горизонтальное расположение потоков рулонов; б – двухэтажная печь.

На рис. 1.41 показаны графики температур изделий при их нагреве в методической рекуперативной печи, работающей по принципу противотока. Холодные изделия поступают в печь с двух сторон в камеры рекуперации, зона окончательного нагрева находится в середине печи. В каждой камере рекуперации остывающие изделия, снижая температуру с  $t_3$  до  $t_4$ , отдают свое тепло подогреваемым изделиям, подымая их температуру с  $t_1$  до  $t_2$ , и одновременно покрывают тепловые потери камеры. В зоне окончательного нагрева изделия догреваются до заданной температуры  $t_3$  и проходят выдержку при этой температуре, после чего они поступают во вторую камеру рекуперации, где и отдают накопленное тепло встречным изделиям. Так как весь процесс нагрева и охлаждения изделий происходит в самой печи, то отпадает необходимость переноса их из печи в камеру рекуперации, а следовательно, отпадают и соответствующие тепловые потери. Кроме того, благодаря противотоку подогреваемые изделия по мере возрастания их температуры встречаются со все более горячими изделиями, поэтому температурный напор по длине камеры рекуперации существенно не изменяется и это позволяет подогреть в ней изделия до более высокой температуры. Температура остывающих изделий может быть снижена в пределах печи очень сильно, однако чем больше будет доля рекуперированного тепла, тем больше будет длина печи. А так как при низких температурах теплопередача существенно замедляется, то имеет смысл ограничиться температурой выдачи изделий около  $200 - 250^\circ\text{C}$ , поместив за камерами рекуперации дополнительные камеры охлаждения, если изделия нельзя выводить прямо на воздух при таких температурах.

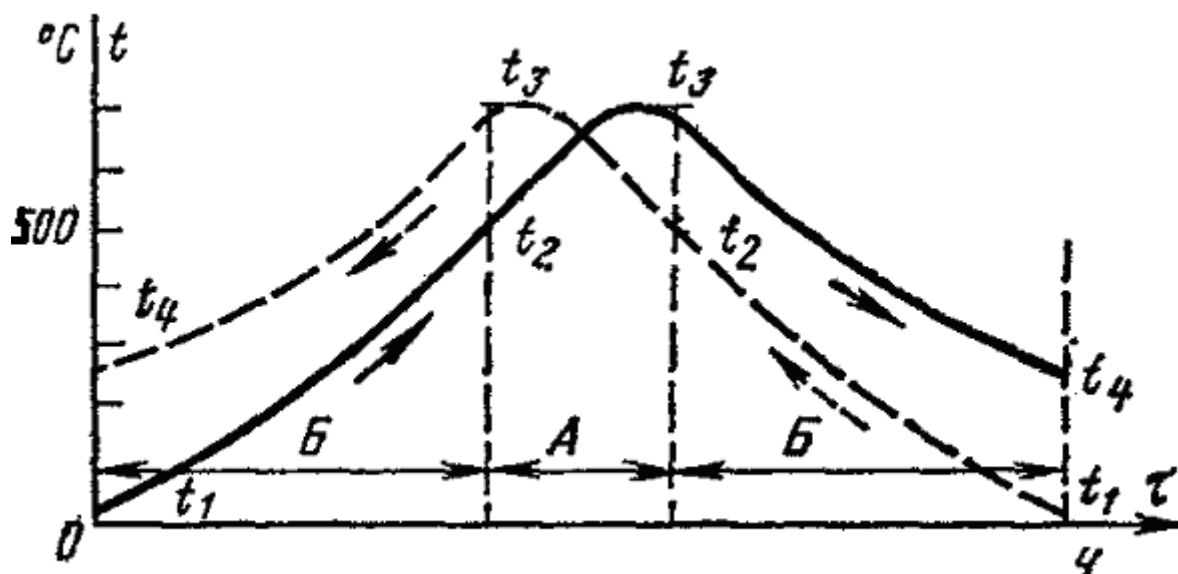


Рис. 1.41. Кривая распределения температур вдоль двухрядной толкательной печи с противотоком.

А – зона окончательного нагрева; Б – зоны рекуперации.

Так как операции отжига обычно проводятся при температурах примерно  $700^{\circ}\text{C}$  или более низких, то для улучшения теплоотдачи и сокращения длины печи имеет смысл применить принудительную циркуляцию печной атмосферы при сравнительно больших скоростях ее движения, около 10 – 15 м/с. В этом случае приходится устанавливать (рис. 4) довольно мощные вентиляторы, расход энергии этими вентиляторами может оказаться весьма значительным. Однако в отличие от камер охлаждения обычных однородных печей здесь большая часть потребляемой вентиляторами энергии, идущая на преодоление трения крыльчатки о воздух и на создание движения последнего, утилизируется, так как она в конечном счете идет на дополнительный подогрев воздуха.

В начале работы печи камеры рекуперации бывают холодные и имеют повышенные тепловые потери, кроме того, в них отсутствуют горячие детали. Поэтому после пуска печи в течение некоторого времени необходимо снизить скорость перемещения садки настолько, чтобы первые ее партии успели нагреться до нужной температуры в зоне окончательного нагрева. Такую пониженную скорость движения изделий следует сохранить, пока из печи не выйдут первые остывшие изделия. Лучше, однако, если в камерах рекуперации будут установлены пусковые нагреватели, включаемые лишь на время разогрева печи.

Методические рекуперативные печи, работающие по принципу противотока, являются наиболее эффективными с точки зрения использования тепла остывающих деталей. Проведенные разработки протяжных и толкательных печей для отжига стальной и алюминиевой ленты, а также данные эксплуатации таких печей показали, что в таких печах может быть утилизировано более 50% тепла остывающих изделий и что удельный расход энергии может быть снижен на 30 – 40% по сравнению с аналогичными нерекуперативными печами.

## **2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

### **2.1 Область применения и классификация. Основные параметры и режимы работы**

В блоке электротермического оборудования передачи тепловой энергии по методу сопротивления группа электрические печи сопротивления

достаточно распространена. Классификация электрических печей сопротивления (ЭПС) представлена на блок-схемах (рис. 2.1, 2.2, 2.3).



Рис. 2.1. Классификация электрических печей сопротивления

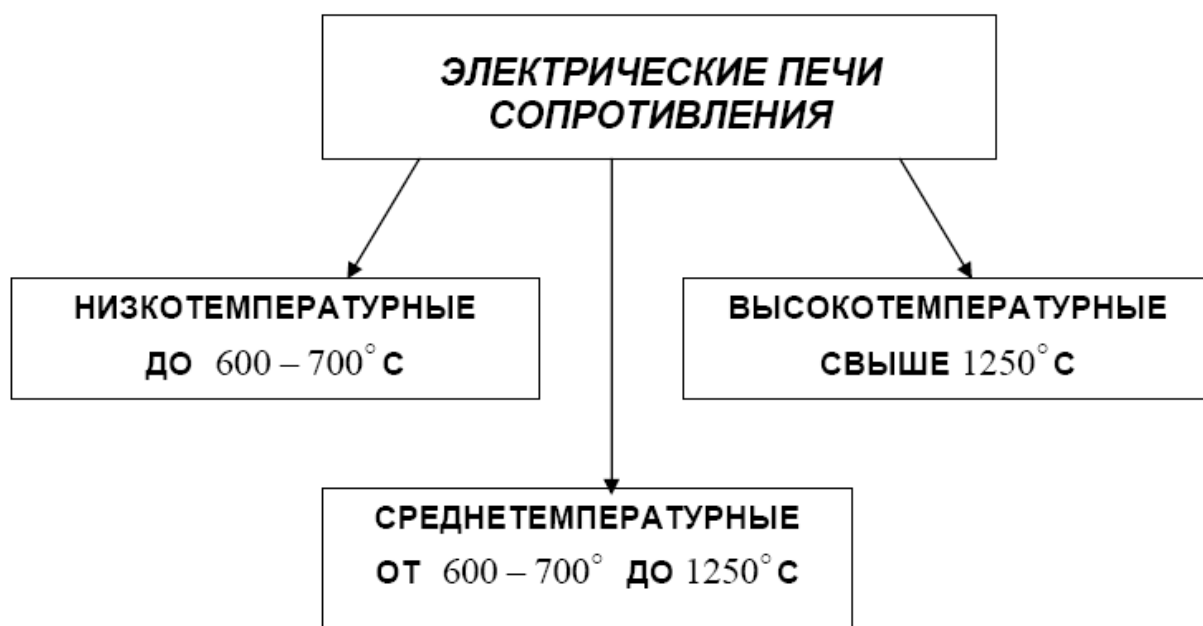


Рис. 2.2. Классификация электрических печей сопротивления

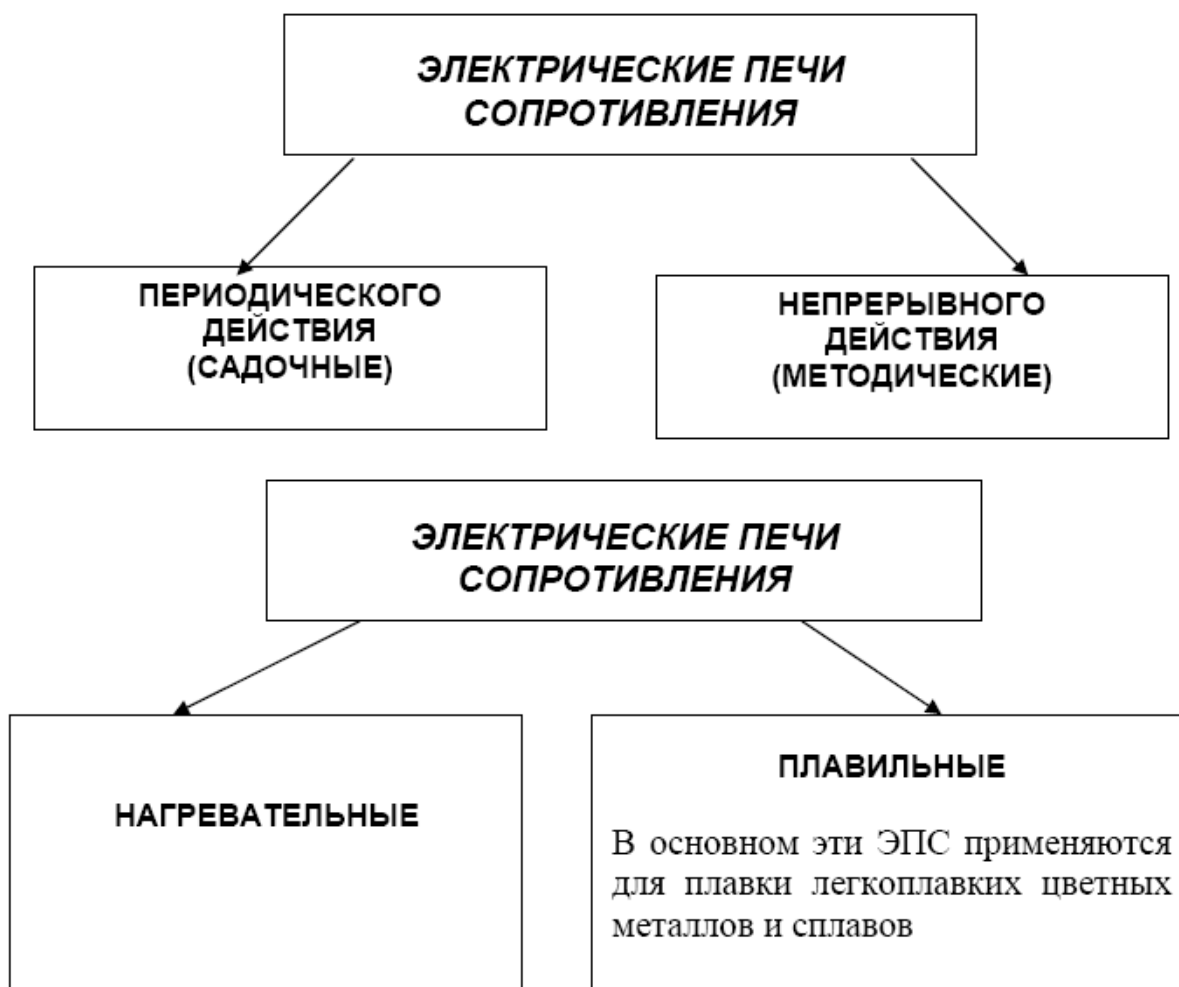


Рис. 2.3. Классификация электрических печей сопротивления

### 2.1.1. Основные виды ЭПС периодического действия

Основные виды ЭПС периодического действия, являющиеся наиболее распространенными, показаны на рис. 2.4, 2.5.

В ЭПС периодического действия изделия загружаются в рабочее пространство и нагреваются в нем, не перемещаясь. Температуры различных точек рабочего пространства в ЭПС периодического действия в каждый момент времени одинаковы или имеют определенные значения, однако могут изменяться во времени.

Широкое распространение электропечей периодического действия (садовых электропечей) обусловлено сравнительной простотой их конструкции, относительно невысокой стоимостью и постоянно увеличивающимся объемом проведения общепромышленных процессов термической обработки в условиях мелкосерийного производства, ремонтно-восстановительных, инструментальных участков.

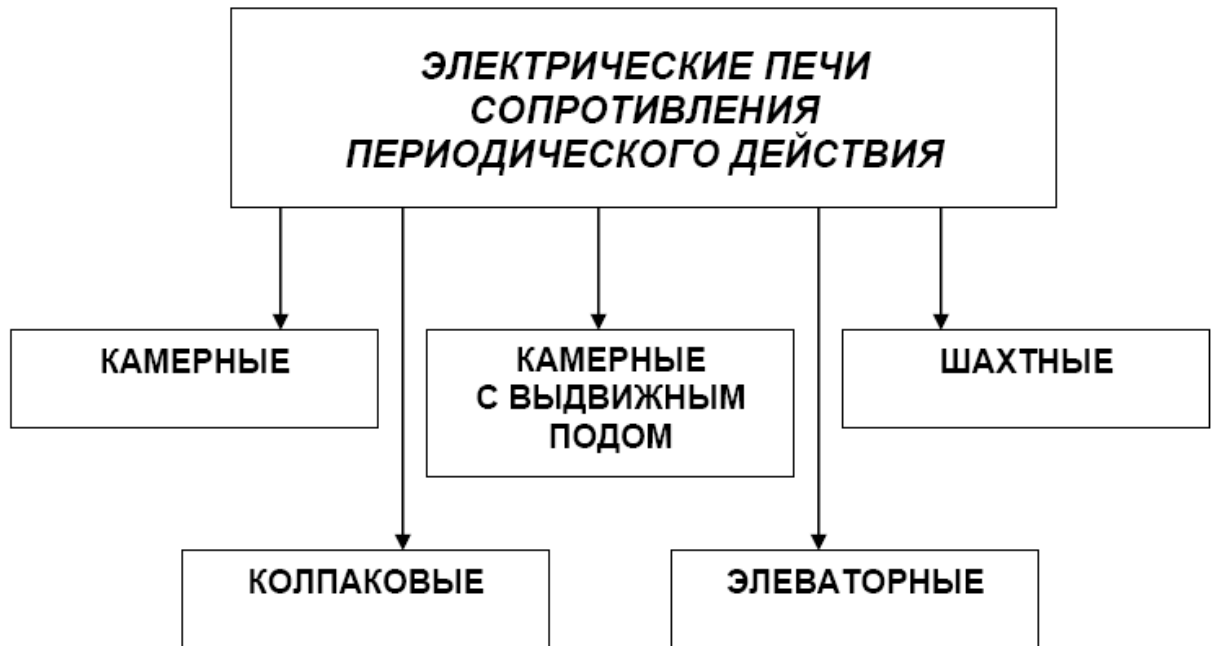


Рис. 2.4. Основные виды электрических печей сопротивления (наиболее распространенные)

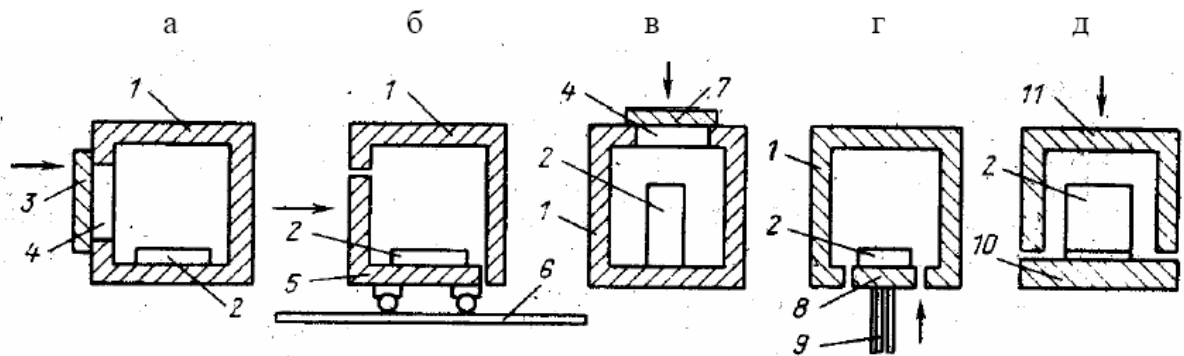


Рис. 4.5. Схема печей периодического действия:  
а - камерная с загрузкой через окно; б - камерная с выдвижным подом;  
в - шахтная; г - элеваторная; д - колпаковая;

1 - каркас печи с футеровкой; 2 - нагреваемые тела (загрузка); 3 - дверца;  
4 - загрузочный проем (окно); 5 - выдвижной под; 6 - рельс; 7 - крышка;  
8 - опускающийся под; 9 - механизм опускания; 10 - стенд; 11 - съемный колпак

Стрелкой показано направление движения загрузки при подаче ее в рабочее пространство печи



В отличие от электропечей непрерывного действия электропечи периодического действия предназначаются для обработки часто меняющейся номенклатуры изделий в условиях, когда одна и та же печь нередко применяется для различных видов термообработки, отличающихся уровнем и режимом изменения температуры, продолжительностью процесса, составом атмосферы и другими параметрами.

Конструктивное выполнение электропечей общепромышленного назначения имеет целью применение их для наиболее распространенных видов термической обработки, в частности обработки металлов и сплавов. Виды термообработки сталей и цветных металлов определяются типом фазовых и структурных превращений в металле; в их классификации учитывается собственно термическая и химико-термическая обработка. К термической относятся отжиг, закалка, старение, отпуск. При химико-термической обработке изменяется химический состав поверхностного слоя деталей, что обеспечивает необходимое изменение свойств. Цементация, нитроцементация, азотирование, борирование – наиболее распространенные виды химико-термической обработки металлов. Кроме того, электропечи данной группы используются для сушки, обжига керамики, пайки и других технологических процессов.

Диапазоны параметров общепромышленных печей – номинальная температура от 250 до 1500°C; размеры и масса обрабатываемых садок соответственно от 300 мм до 3 м и от 80 кг до 10т – отличают общепромышленные электропечи, с одной стороны, от лабораторных и других специальных электропечей, с другой стороны, от крупногабаритных садочных электропечей, предназначенных для многотоннажных изделий (например, в металлургической промышленности или тяжелом машиностроении); атмосфера в рабочем объеме печи – воздушная или специальная контролируемая, в том числе защитная.

В промышленных ЭПС могут осуществляться три группы процессов, связанных с нагреванием металла, при проведении которых целесообразно применение контролируемых атмосфер: термическая обработка изделий, химико-термическая обработка изделий и специальные технологические процессы.

При термической обработке посредством нагрева до определенной температуры и последующего охлаждения производят желаемое изменение строения металла с целью получения нужных свойств. При высокой температуре происходит взаимодействие поверхности металла с атмосферой электропечи и, в первую очередь, окисление. При обработке сталей одновременно происходит обезуглероживание поверхности. Интенсивность

этих двух процессов зависит от температуры, состава обрабатываемой стали и состава атмосферы печи.

Отдельные составляющие контролируемых атмосфер по-разному воздействуют на сталь. Так,  $H_2$  обезуглероживает поверхность стальных изделий,  $CO_2$  окисляет ее,  $H_2O$  и  $O_2$  окисляют и обезуглероживают, а  $CO$  и  $CH_4$  науглероживают. Зная законы взаимодействия этих газов между собой и с поверхностью обрабатываемого металла, можно подобрать при заданной температуре термической обработки такой состав атмосферы, при котором реакции «окисление - восстановление» и «обезуглероживание - науглероживание» протекают с одинаковой скоростью в обе стороны, т.е. практически не изменяют состав металла. В этом случае атмосфера нейтральна - она не воздействует на поверхность металла и не изменяет ее (такие атмосферы называют обычно защитными).

При химико-термической обработке производят поверхностное насыщение стали соответствующим элементом (углеродом, азотом, бором и др.) путем его диффузии из внешней среды при высокой температуре. Химико-термическая обработка заключается в нагреве изделия до заданной температуры в среде, легко выделяющей диффундирующий элемент в атомарном состоянии, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении. В отличие от термической химико-термическая обработка меняет не только структуру, но и химический состав поверхностных слоев металла, что позволяет в более широких пределах изменять его свойства. Наиболее широкое распространение в промышленности нашли три вида химико-термической обработки: цементация, азотирование и нитроцементация.

*Цементацией* называется процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом. Целью цементации является получение твердой и износостойкой поверхности, что достигается обогащением поверхностного слоя углеродом до концентрации 0,8 – 1,0% и последующей закалкой с низким отпускком. Цементации обычно подвергаются низкоуглеродистые стали с содержанием углерода 0,10–0,20%.

*Азотированием* называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом при нагреве ее в аммиаке. Азотирование повышает твердость поверхностного слоя, его износостойкость и сопротивление коррозии в таких средах, как влажная атмосфера, вода, пар и т.д., а также при температурах до 600 – 650° С. Азотирование проводят в атмосфере аммиака, который при нагреве диссоциирует. Степень диссоциации (отношение числа распавшихся молекул к общему их числу)

составляет 15 – 20% при 500 – 520° С и возрастает до 40 – 50% при 600 – 650° С. Азотированию подвергают среднеуглеродистые легированные стали.

*Нитроцементация* - процесс совместного насыщения поверхности стали углеродом и азотом с целью повышения твердости и износостойкости изделий. Нитроцементации обычно подвергают стали с содержанием углерода 0,2–0,4%.

Специальными технологическими процессами, при проведении которых используются контролируемые атмосферы, являются пайка и спекание черных и цветных металлов.

*Наиболее распространенными из садочных электропечей* являются *камерные* и *шахтные* электропечи на номинальные температуры примерно от 600 до 1000° С с объемами рабочего пространства 0,1 – 0,3 м<sup>3</sup>. Они составляют более половины парка электропечей периодического действия (ЭПД) общепромышленного назначения. В связи с расширением видов обрабатываемых изделий и технологий термообработки номенклатура конструкций общепромышленных ЭПД постоянно пополняется.

Области применения общепромышленных ЭПД для различных технологий по печам разных типов представлены в табл. 2.1.

Обычно парк ЭПД термического участка включает ряд электропечей различных типов. При необходимости использования нескольких однородных печей одинакового назначения следует произвести технико-экономическую оценку целесообразности применения для данного случая электропечи непрерывного действия с подсчетом эксплуатационных затрат по термообработке.

Электрические печи сопротивления состоят из следующих основных частей [18, 19, 23]:

1. Футеровка печи, состоящая из огнеупорной и теплоизоляционной части;
2. Каркас печи;
3. Жароупорные детали для поддержания или перемещения нагреваемых изделий в печи;
4. Нагревательные элементы и их крепление.

Как указывалось ранее, один из наиболее распространенных видов общепромышленных электропечей периодического действия - камерные электропечи (рис. 2.6, 2.7), что объясняется тем, что они разнообразны по конструкции и назначению, удобны в использовании, просты в обслуживании. Выпускают более двух десятков типоразмеров камерных общепромышленных печей с большим диапазоном размеров рабочего пространства на номинальные рабочие температуры от 300 до 1500° С.

Камерные печи - агрегаты и комплексы - применяются в мелко- и среднесерийном производстве, обычно имеющем широкую номенклатуру деталей, обрабатываемых сравнительно небольшими партиями, что требует более или менее частого изменения температурного и газового режимов.

Камерные ЭПС, как правило, немеханизированы. Для этих печей характерны высокий удельный расход электроэнергии и высокий расход контролируемого газа.

Камерные электропечи являются простейшими по конструкции и вместе с тем наиболее универсальными. Рабочее пространство электропечи представляет собой горизонтальную камеру, ограниченную футеровкой, состоящей из огнеупорного и теплоизоляционного слоев.

Таблица 2.1

## Применение общепромышленных ЭПД

Электропечи	Технологические процессы
Камерные с металлическими нагревателями:	
низкотемпературные	Отпуск, сушка, старение
среднетемпературные	Отпуск, отжиг, закалка, цементация, нитроцементация, пайка, спекание, нагрев под пластическую деформацию металла
с неметаллическими нагревателями	Отжиг, закалка, нагрев под ковку, обжиг керамики, спекание
Шахтные безмуфельные	Отпуск, старение, отжиг, закалка
Шахтные муфельные	Цементация, нитроцементация, азотирование
С выдвижным	
низкотемпературные	Отпуск, старение, сушка
среднетемпературные	Отжиг, обжиг
Колпаковые	Отпуск, отжиг, спекание, обжиг
Элеваторные	Отжиг, спекание

Электропечь имеет внешний металлический кожух, выполненный из листовой или профильной стали. Нагреваемые изделия загружаются и выгружаются через отверстие в передней стенке ЭПС; имеется футерованная дверца, закрывающая загрузочное отверстие. Нагревательные элементы могут быть расположены на поду, своде, боковых стенках, реже на задней торцевой стенке и дверце. Делается это для увеличения равномерности температуры в рабочем пространстве.

Для размещения изделий, как правило, имеется подовая плита, выполненная из жароупорного металла или карборунда. Электропечи небольших размеров устанавливаются на ножках, большие - непосредственно на полу. Дверцы камерных ЭПС, как правило, выполняются подъемными с ручным или ножным приводом у небольших ЭПС и электромеханическим приводом у крупных.

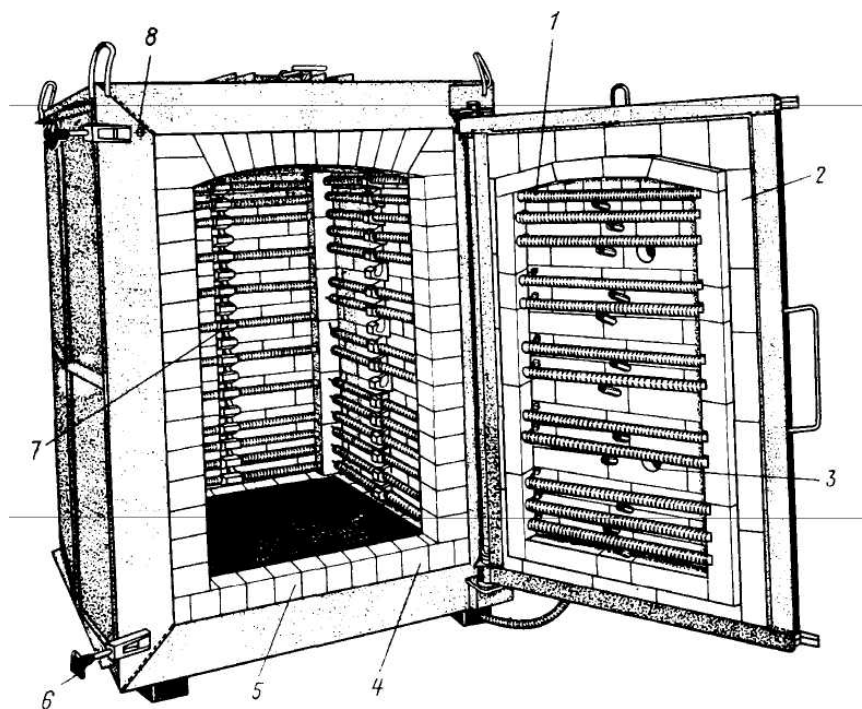


Рис. 2.6. Камерная электропечь на 1260°:

- 1 - спиральные проволочные нагреватели на керамических трубках;
- 2 - обмуровка дверцы; 3 - смотровые отверстия; 4 - обрамление дверного проема;
- 5 - под; 6 - рукоятки винтовых прижимов дверцы в закрытом положении;
- 7 - керамические фасонные опоры трубок с нагревателями;
- 8 - упор-ограничитель хода дверцы

В ряде камерных ЭПС для увеличения скорости нагрева и улучшения равномерности температур в рабочем пространстве применяются

вентиляторы. В нагревательных ЭПС печные вентиляторы применяют до температуры 750°C, в печах для химико-термической обработки - до 1000°C.

Камерные электропечи включаются непосредственно в электрическую сеть на напряжение 220 и 380 В или через понижающие трансформаторы.

Электропечи с нагревательными элементами из карборунда (рис. 2.8) комплектуются многоступенчатыми понижающими трансформаторами, что позволяет при старении нагревателей, когда повышается их сопротивление, соответственно повышать напряжение и тем самым сохранять необходимую мощность ЭПС. Электропечи с нагревателями из дисилицида молибдена (рис. 2.9, 2.10) должны комплектоваться понижающими трансформаторами, имеющими большой диапазон изменения коэффициента трансформации, в связи с большим различием удельного электрического сопротивления дисилицида молибдена в горячем и в холодном состояниях.

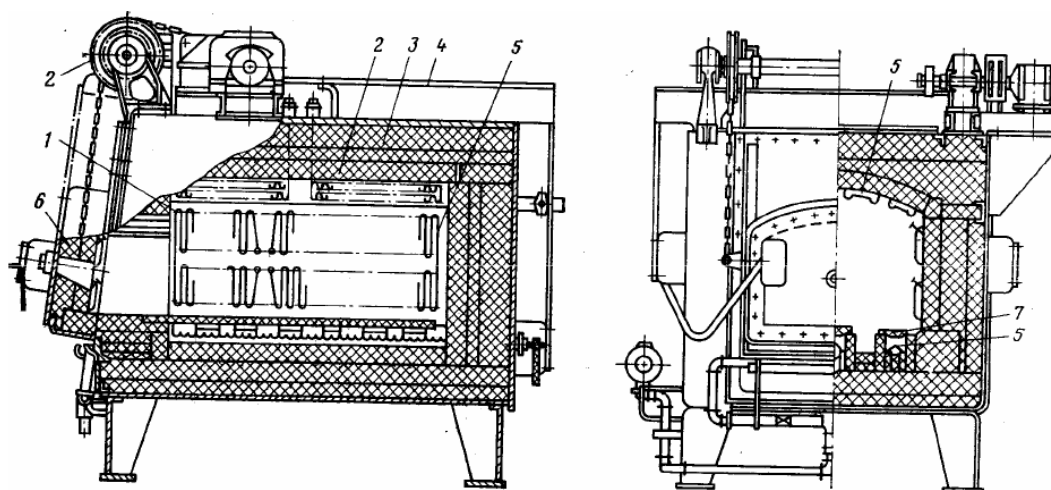


Рис. 2.7. Камерная электропечь:

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

В конструкциях камерных ЭПС, предназначенных для работы с контролируемой атмосферой, предусматривается «пламенная завеса», принцип действия которой заключается в том, что в расположенную под входным отверстием трубу, имеющую по длине ряд отверстий или прорезь, подается горючий газ. Этот газ, сгорая, своим пламенем отсекает рабочее пространство печи от атмосферы помещения, в котором находится ЭПС.

При открывании дверцы количество горючего газа, подаваемое в трубку, увеличивается.

Основные конструктивные решения общих для всех камерных электропечей узлов - теплоизоляции (футеровки), нагревателей, дверцы,

системы регулирования температуры и атмосферы - определяются главным образом уровнем номинальной температуры печи, а также спецификой, связанной с назначением печи.

Определенным недостатком камерных ЭПС являются трудности их герметизации из-за наличия вертикальных щелей между дверцей и обрамлением отверстия в передней торцевой стенке.

*Шахтные электропечи* являются второй по распространенности группой ЭПС периодического действия. Печи этого типа сравнительно небольших размеров рабочего пространства (диаметром примерно от 600 до 1000 мм) используются для тех же целей, что и камерные электропечи широкого назначения - для термической обработки различных изделий и деталей во многих отраслях промышленности.

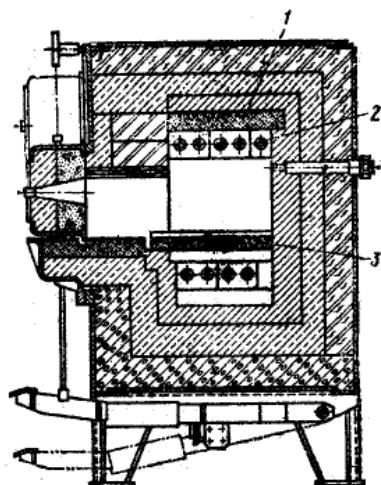


Рис. 2.8. Электропечь с карборундовыми нагревателями:  
1 - свод печи;  
2 - карборундовые нагреватели;  
3 - под печи

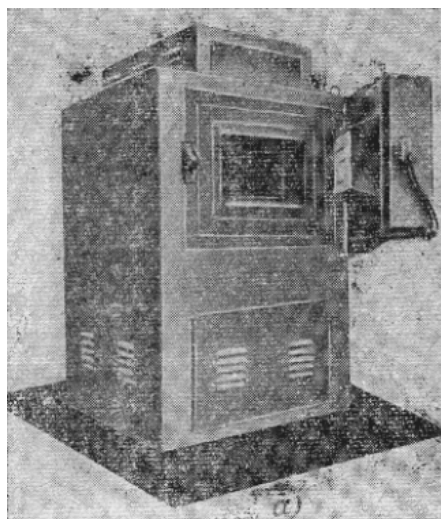


Рис. 2.9. Внешний вид камерной высокотемпературной печи с нагревателями из дисилицида молибдена

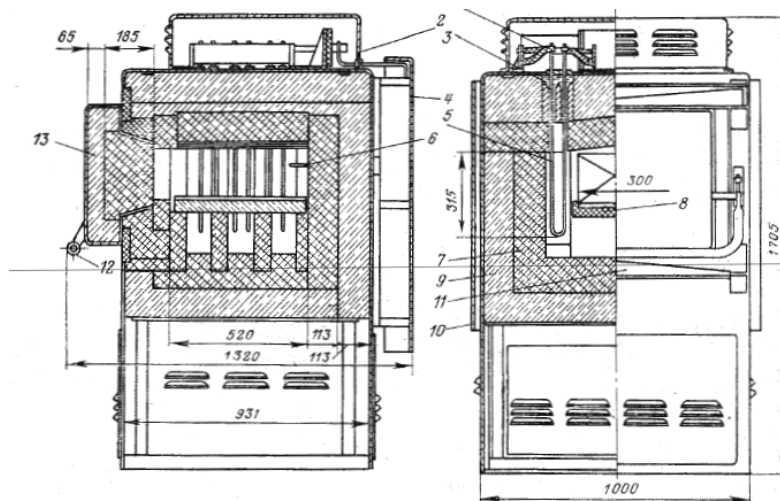


Рис. 2.10. Общий вид камерной высокотемпературной печи с нагревателями из дисилицида молибдена:

- 1- токоподвод; 2 - защитный кожух выводов; 3 - асбестовое уплотнение;  
 4 - кожух; 5 - нагреватель; 6 - термоизоляция; 7 - огнеупорный слой;  
 8 - карборундовая подовая плита; 9 - теплоизоляция; 10-экран;  
 11- кронштейн дверцы; 12 - ручка дверцы; 13 – дверца

Печи этого типа сравнительно небольших размеров рабочего пространства (диаметром примерно от 600 до 1000 мм) используются для тех же целей, что и камерные электропечи широкого назначения - для термической обработки различных изделий и деталей во многих отраслях промышленности. Шахтные печи незаменимы при термообработке длинномерных изделий, например валов, штанг, труб, инструмента типа протяжек и другого, обрабатываемых в вертикальном положении. Эти ЭПС, так же как и камерные, просты по конструкции и достаточно универсальны (рис. 2.11, 2.12). Шахтные печи представляют собой футерованную шахту цилиндрической формы. Для вертикальных топливных печей отношение высоты рабочего пространства к диаметру принимается не менее трех. Нагреваемые изделия загружают и выгружают через отверстие вверху шахты.



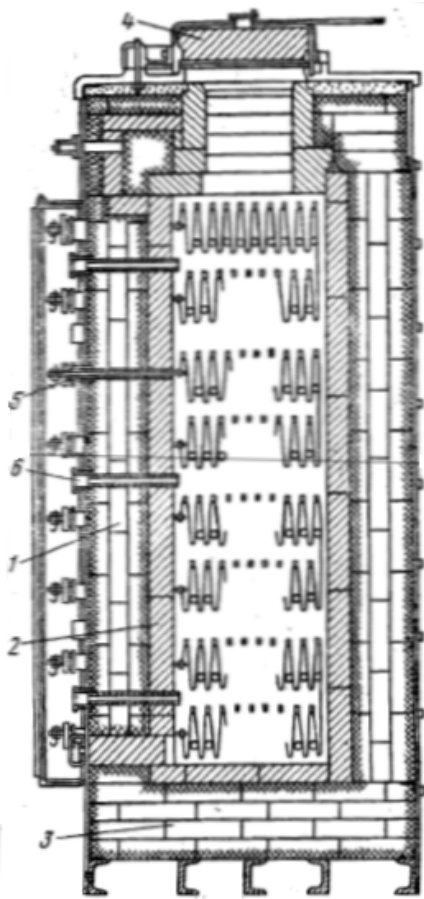


Рис. 2.11 Шахтная электропечь:  
1 - нагреватели; 2 огнеупорная  
кладка; 3 теплоизоляция; 4 крышка печи;  
5 вывод нагревателя; 6 -  
термопара

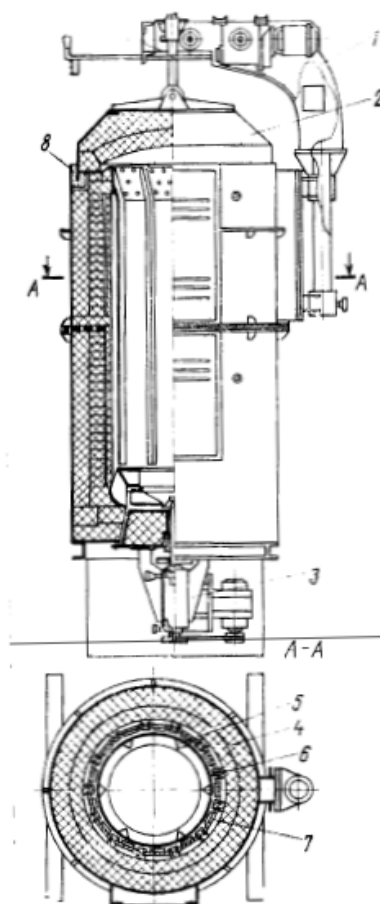


Рис. 2.12. Шахтная электропечь:  
1 - механизм подъема и поворота  
крышки; 2 - крышка;  
3 - вентилятор; 4 - футеровка;  
5 - направляющие; 6 - экран;  
7 - нагреватели; 8 - песочный  
затвор

К недостаткам шахтных печей можно отнести неравномерный нагрев по высоте печи (особенно изделий большой длины).

Шахтные ЭПС менее универсальны, чем камерные, но в ряде случаев имеют перед ними преимущества.

*Колпаковые электропечи* (рис. 2.13) представляют собой переносную цилиндрическую или прямоугольную камеру (колпак), открытую снизу, и несколько неподвижных зафутерованных стенов. Количество стенов на один колпак определяется соотношением времени охлаждения и времени нагрева изделий. Так, если они равны, то на один колпак требуется два стенов.

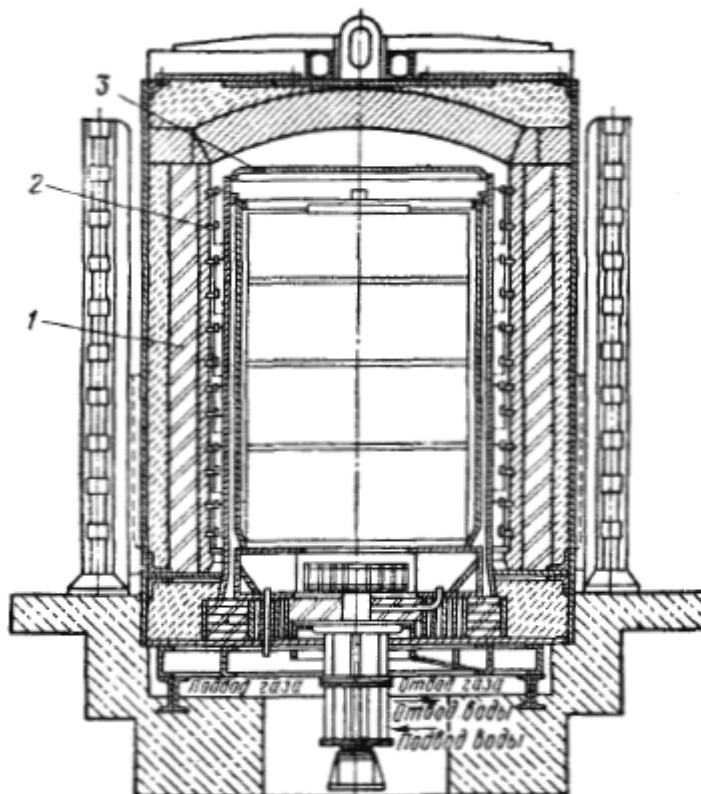


Рис. 2.13. Электрическая колпаковая печь:

1 - колпак; 2 - крючки с нагревателями; 3 - муфель

На рис. 2.13 показана колпаковая электропечь. Колпак 1 цилиндрической формы футерован нормальным шамотным и диатомитовым кирпичом. На крючках 2 повешены нагреватели из сплавов Х20Н80. Муфель 3 двойной газонепроницаемый сделан из листовой стали. Х23Н18. В муфель вводится защитный газ, состоящий на 0,5 %  $\text{CO}_2$ , 2 %  $\text{H}_2$  и остальное  $\text{N}_2$ .

Расход газа 2,5 м<sup>3</sup>. Масса садки 25 т. Рабочая температура 900°С. Мощность печи 380 кВт. Изделия при помощи цеховых кранов загружают на стенд, после чего также краном над изделиями на стенд устанавливают вначале жароупорный муфель, а за ним основной колпак, выполненный из металлического каркаса с огнеупорным и теплоизоляционным слоями футеровки.

Нагреватели располагаются на боковых стенках колпака и на стенде; реже для ускорения нагрева изделий, например бухт проволоки и лент, устанавливается вертикальный внутренний нагреватель. Электрическое напряжение подводится к стенду, а от него разъемными контактами – к нагревателям колпака.

К недостаткам шахтных печей можно отнести неравномерный нагрев по высоте печи (особенно изделий большой длины).

Шахтные ЭПС менее универсальны, чем камерные, но в ряде случаев имеют перед ними преимущества.

Элеваторные электропечи (рис. 2.14) представляют собой прямоугольную камеру, открытую снизу и установленную неподвижно на колоннах на определенной высоте над уровнем пола цеха.

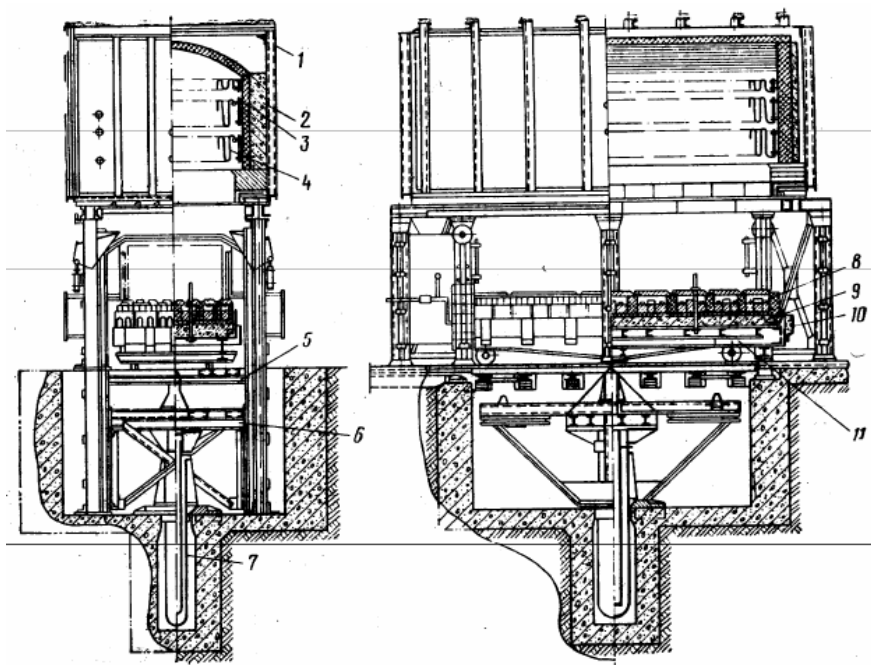


Рис. 2.14. Элеваторная электропечь:

- 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

Ниже электропечи расположен подъемный под, движение которого вверх осуществляется гидравлическим или электромеханическим приводом.

В случае применения гидравлического привода требуется сооружение глубокого приямка под печью для плунжера. Поэтому при большом рабочем ходе применяется электромеханический привод.

Подъемный под представляет собой тележку на катках, имеющую футеровку с огнеупорным и теплоизоляционным слоями. Вне ЭПС на тележку загружают изделия, тележка подъезжает под электропечь и поднимается к камере печи, после чего осуществляется нагрев загрузки. По окончании нагрева тележка с загрузкой опускается, откатывается из-под электропечи, и происходит охлаждение загрузки. При отжиге отливок из ковкого чугуна, например, не требуется медленное охлаждение и его можно производить на воздухе. В этом случае целесообразно для каждой ЭПС иметь две тележки.

Недостатком элеваторных электропечей является их конструктивная сложность и требование большой высоты цеха.

*Камерные электропечи с выдвижным подом* (рис. 2.15) применяют для термообработки тяжелых сварных, литых и кованных изделий.

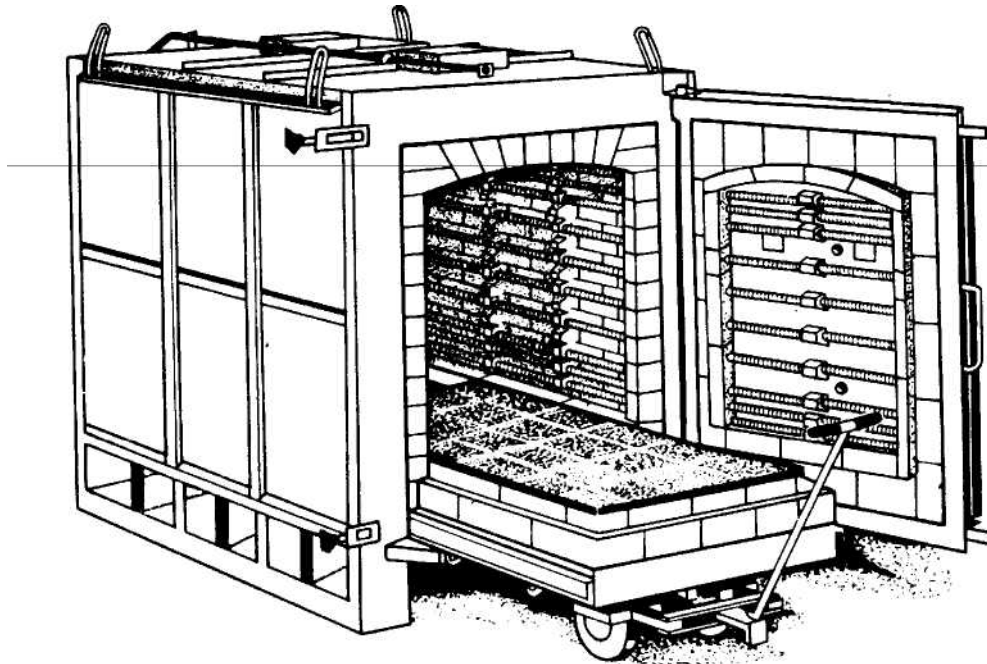


Рис. 2.15. Общий вид электропечи на  $1260^{\circ}\text{C}$  с выдвижным подом

В основном эти ЭПС используют там, где не требуется контролируемая атмосфера. Электропечи состоят из камеры без дна и, как правило, без передней стенки и передвигающейся на катках по рельсам тележки, на которой расположены подина и передняя стенка.

На тележку вне ЭПС загружают изделия, после чего тележка с загрузкой подъезжает под камеру, где происходит нагрев загрузки.

Электропитание нагревателей тележки осуществляется гибкими кабелями или «ножевыми» разъемными контактами.

При выкатке выдвижного пода из-под камеры нагретые стенки камеры излучают теплоту на фундамент, в связи с чем фундамент должен быть выложен огнеупорным кирпичом или изготовлен из жароупорного бетона.

Если охлаждение загрузки возможно вне ЭПС, то целесообразно применять две выкатные тележки на одну камеру. В то время как происходит нагрев загрузки на одной тележке, другая загрузка остывает на другой тележке, там же происходят разгрузка и погрузка изделий.

В этом случае потери теплоты резко сокращаются в сравнении с режимом, когда загрузка остывает вместе с печью.

Электропечи с выдвижным подом экономичны для термообработки крупных заготовок. Мощность этих печей достигает 5000 кВт.

Эти электропечи просты по конструкции, надежны в эксплуатации, достаточно универсальны по применению.

Недостатком камерных ЭПС с выдвижным подом является невысокая равномерность нагрева, а также повышенный удельный расход электроэнергии из-за трудности герметизации ЭПС и потерь аккумулярованной выдвижным подом теплоты.

### 2.1.2 Основные виды ЭПС непрерывного действия

Основные виды ЭПС периодического действия, являющиеся наиболее распространенными, показаны на рис.2.16.



Рис. 2.16. Основные виды электрических печей сопротивления (наиболее распространенные)

В ЭПС *непрерывного действия* изделия загружаются в печь и, непрерывно или периодически перемещаясь по длине электропечи, нагреваются и выходят с другого конца 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. Методические печи должны быть снабжены тем или иным приспособлением для перемещения деталей. Эти печи сложнее печей

периодического действия, но зато имеют значительно большую производительность при тех же габаритах и обеспечивают идентичность режима термообработки.

Эти ЭПС могут входить в состав единого, полностью механизированного агрегата. Например, объединяют закалочную и отпускную ЭПС вместе с закалочным баком, моечной машиной, сушильной ЭПС. 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.

Электропечь непрерывного действия с рабочей температурой до 700°C часто оборудуют вентиляторами. Нагреватели в электропечах устанавливают на своде, поду и боковых (реже торцевых) стенках. В основном конструкции ЭПС непрерывного действия определяются механизмом перемещения изделий по электропечи.

*Конвейерные* электропечи (рис. 2.17) [18 - 20] 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.

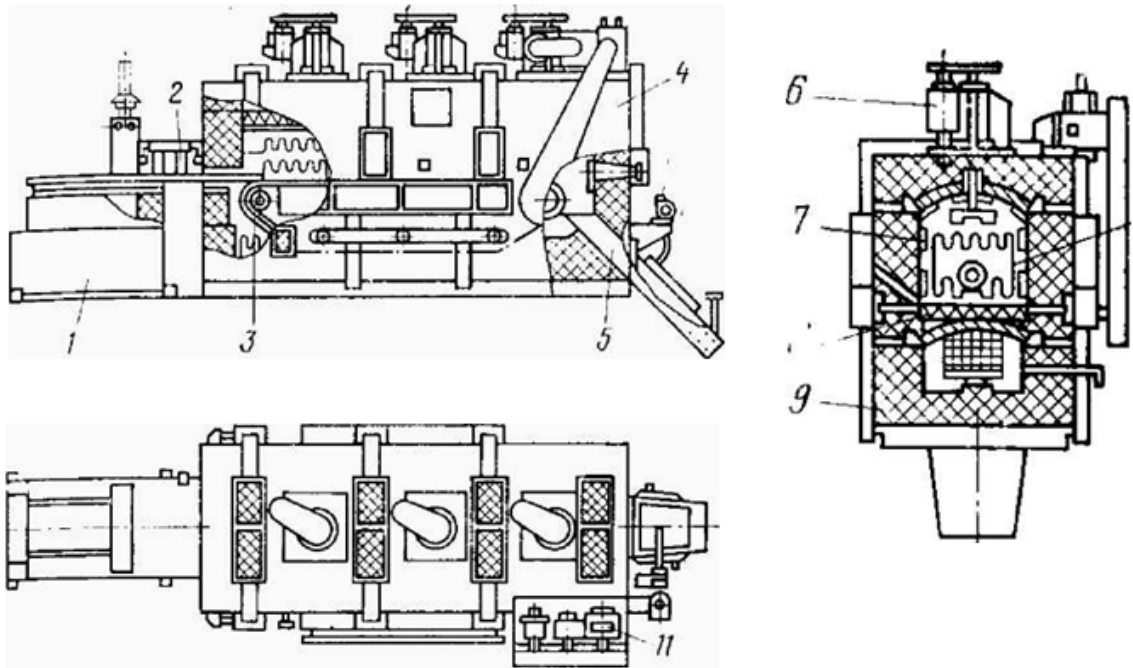


Рис. 2.17. Горизонтальная конвейерная электропечь  
с рабочей температурой 700°С:

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

Для перемещения изделий внутри рабочего пространства ЭПС применяется конвейер, натянутый между двумя валами, один из которых является ведущим, а другой – ведомым. Для вращения ведущего вала применяется электропривод.

Конвейер может быть полностью, вместе с обоими валами, расположен в камере ЭПС. Недостатками в этом случае являются тяжелые условия работы обоих валов конвейера, находящихся в зоне высоких температур, неудобство ремонта из-за плохой доступности, а также трудность загрузки изделий на горячий конвейер. Кроме того, в подобных конструкциях, как правило, валы охлаждаются водой, что приводит к значительным тепловым потерям.

Для нагрева и мелких, и крупных изделий до 1150°С могут быть использованы *толкательные* электропечи (рис. 2.18). На поду в этих ЭПС установлены жароупорные направляющие в виде труб, рельсов или роликового пода, вдоль которых перемещаются поддоны с нагреваемыми изделиями. Расположенный 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 приходят в движение все ранее загруженные в печь поддоны.

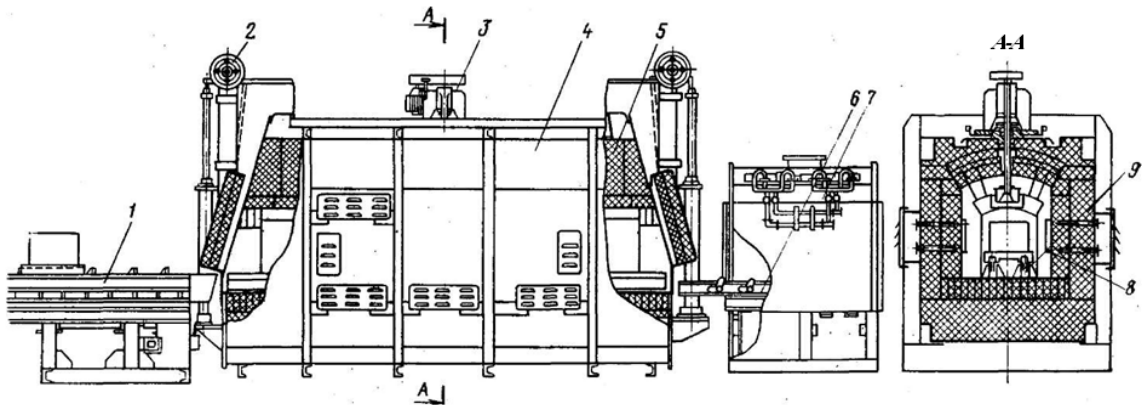


Рис. 2.18. Толкательная электропечь с камерой охлаждения:  
 1 - толкатель; 2 - дверца с механизмом подъема; 3 - вентилятор; 4 - кожух; 5 - футеровка; 6 - таскатель; 7 - камера охлаждения; 8 - нагреватели; 9 - рельсовый путь

После подхода к разгрузочному концу ЭПС 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.

*Недостатком этих ЭПС* является 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.

*Рольганговые* электропечи, передвижение изделий в которых осуществляется рольганговым подом (рис. 2.19), являются наиболее универсальными среди ЭПС непрерывного действия. В рольганговых печах могут быть обработаны изделия, разнообразные по форме и массе. Увеличение длины электропечи не сказывается на надежности ее работы. 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 поддонов.



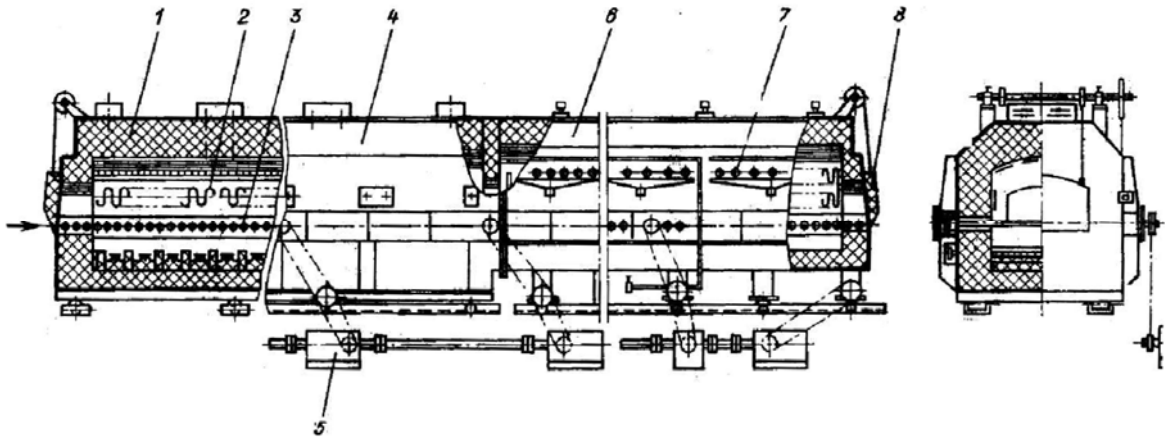


Рис. 2.19. Рольганговая электропечь:

1 - футеровка; 2 - нагреватель; 3 - рольганг; 4 - кожух; 5 - привод рольганга; 6 - камера охлаждения; 7 - система водоохлаждения; 8 - дверца

В карусельных электропечах (рис. 2.20) транспортирующим узлом служит под, выполненный в виде кольца. Под вращается, перемещая изделия в печном пространстве.

Карусельные ЭПС используются для низкотемпературного отпуска (до  $250^{\circ}\text{C}$ ) стальных изделий, для закалки (до  $850^{\circ}\text{C}$ ) мелких стальных изделий, для нагрева под закалку перед штамповкой (до  $1150^{\circ}\text{C}$ ) и для нагрева (до  $1250^{\circ}\text{C}$ ) под прокатку в металлургии. Эти ЭПС возможно применять на температуры до  $1300^{\circ}\text{C}$  при значительных массах загрузки благодаря тому, что механизмы 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.

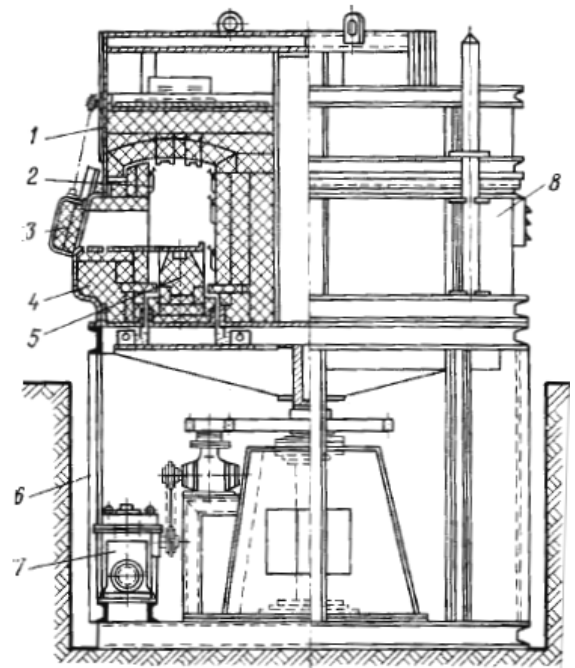


Рис. 2.20 Карусельная электропечь

1 - съемный свод; 2 - нагреватели; 3 - дверца; 4 - футеровка; 5 - вращающийся под; 6 - рама; 7 - привод механизма; 8 - кожух

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

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

*Барабанные* электропечи (рис. 2.21) предназначены в основном для обработки изделий с максимальным размером до 80 мм, а также для нагрева порошкообразных материалов.

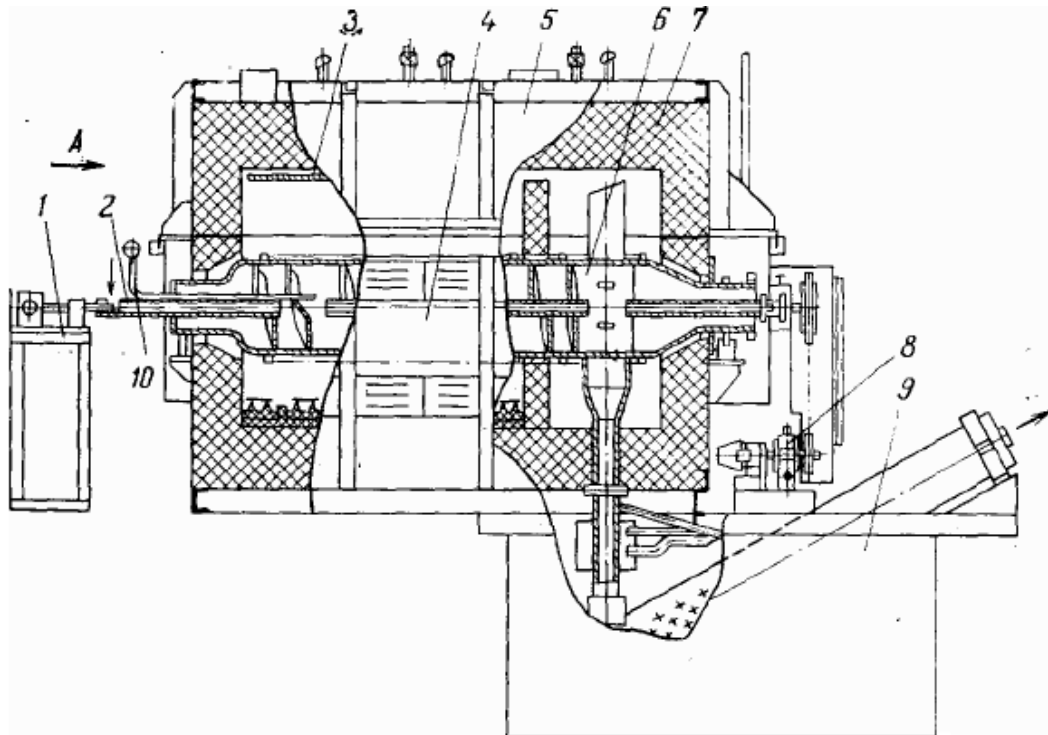


Рис. 2.21. Барабанная электропечь с контролируемой атмосферой  
1 – механизм загрузки; 2 – загрузочный патрубок; 3 – нагреватели; 4 – кожух; 5 – крышка; 6- муфель; 7 – футеровка; 8 – привод муфеля; 9 – закалочный бак

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  $1 - 5^\circ$  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 ЭПС наиболее целесообразно применять в условиях массового и крупносерийного производства, например при термообработке шариков, роликов, гаек, колец, осей и т.д.

Максимальная рабочая температура барабанных ЭПС 1000°C, на ограничена работоспособностью металлического муфеля.

*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.

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 горизонтальные и вертикальные.

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 проволоки или ленты (многоходность) через одну или несколько рядом стоящих ЭПС.

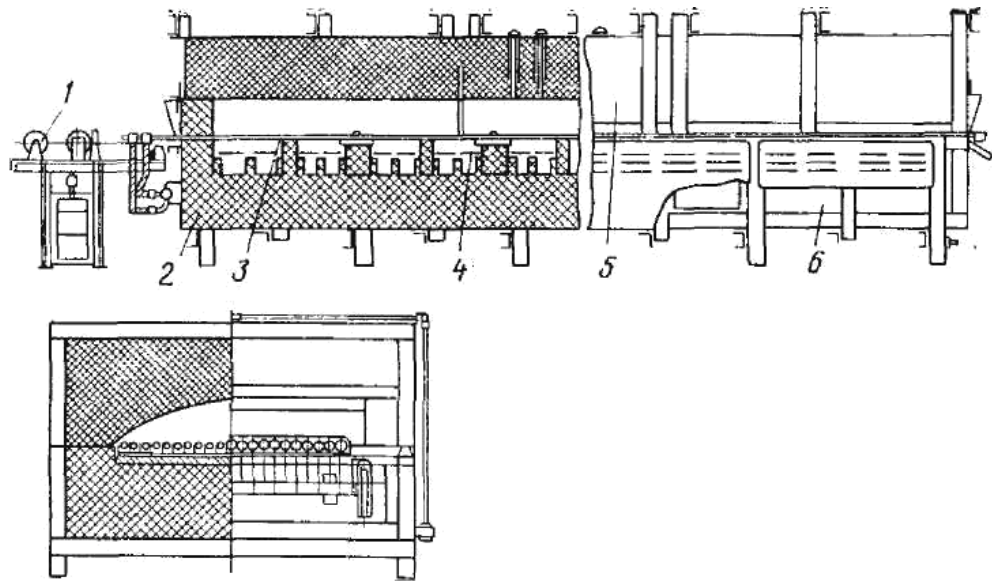


Рис. 2.22. Протяжная электропечь для термообработки проволоки:  
1 — ролики; 2 — футеровка; 3 — муфель; 4 — нагреватели;  
5 — крышка; 6 — кожух электропечи с ручьевым подом

Кроме термообработки проволоки, ленты и других изделий из черных и цветных металлов протяжные ЭПС нашли весьма широкое применение для сушки и полимеризации лаков или пластмасс.

*Ручьевые* электропечи (рис. 2.23) предназначены в основном для закалки стальных изделий массового производства, например колец подшипников, втулок, звеньев траков.

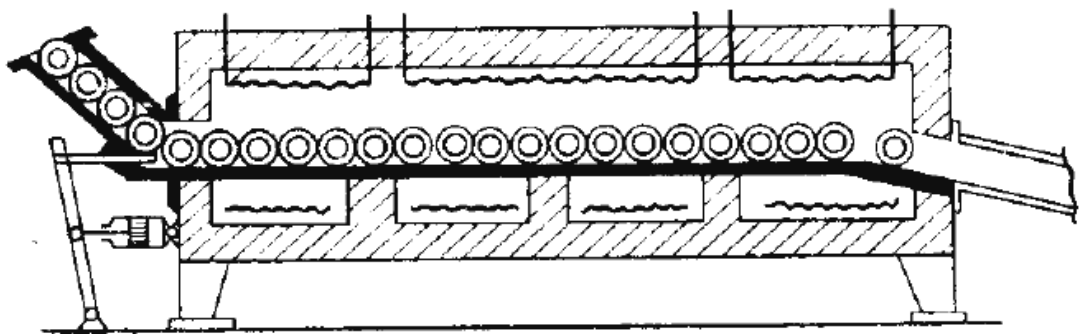


Рис 2.23. Схема электропечи с ручьевым подом

Основным преимуществом ручьевых ЭПС является отсутствие затрат теплоты на нагрев вспомогательных транспортирующих устройств; возможность поштучной механизированной выдачи изделий из печи, что позволяет согласовать работу ЭПС с подачей на закалочные прессы. Вследствие простой конструкции эти ЭПС весьма надежны в эксплуатации.

Недостатками ручьевых ЭПС являются возможность использования их только для изделий цилиндрической формы с размерами, соответствующими размерам ручья подовой плиты, а также трудности в освобождении печной камеры от обрабатываемых изделий при прекращении подачи их к ЭПС или остановках в работе. Как правило, освобождение производится специальными балластными деталями. Изделия в этих ЭПС располагаются в ручьях (желобах) подовой плиты и передвигаются (перекатываются) в них через рабочее пространство под действием толкающего механизма.

*Туннельные электропечи.* Главным преимуществом туннельных ЭПС (рис. 2.24) 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 весьма большую производительность.

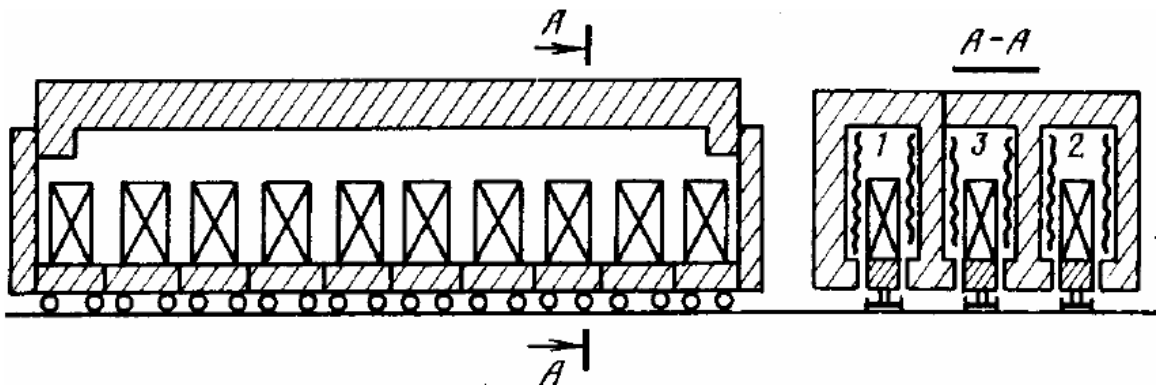


Рис. 2.24. Схема туннельной электропечи

Недостатком этих ЭПС является наличие футерованных тележек, которые обладают большой массой и, следовательно, требуют больших затрат на их нагрев; 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 до  $1300^{\circ}\text{C}$ , хотя в отдельных случаях используются для сушки при температуре до  $300^{\circ}\text{C}$  сварочных электродов.

Для улучшения технико-экономических показателей этих ЭПС 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.

## **2.2. Тепловые и электрические расчеты электрических печей сопротивления**

### **2.2.1 Тепловой расчет электрических печей сопротивления**

#### **2.2.1.1 Определение времени нагрева и остывания изделий в печах периодического действия**

Время, проводимое изделием в печи, в общем случае состоит из времени его нагрева до заданной температуры, времени выдержки при этой температуре и времени остывания. Во многих случаях изделие остывает вне печи, и это время, следовательно, не входит в цикл ее работы, время выдержки также иногда отсутствует или сводится к минимуму — к времени, необходимому для выравнивания температур в изделиях.

Температурный режим, а следовательно, и время нагрева, выдержки и остывания изделий, определяется технологическим процессом и, таким образом, должно быть задано конструктору печи технологами на основе имеющегося опыта нагрева аналогичных деталей в уже эксплуатирующихся печах. Часто, однако, эти данные являются весьма ориентировочными и требуют проверки; кроме того, иногда технологи ограничиваются тем, что задают лишь время выдержки и максимальные допустимые скорости нагрева и остывания изделий.

В электрических печах сопротивления косвенного действия, так же как и в пламенных, нагрев изделий происходит от поверхности внутрь. Если этот процесс идет слишком быстро, то перепад между температурами на поверхности изделия и внутри устанавливается чересчур большой, что вызывает значительные термические напряжения в материале и может, привести к его растрескиванию. При остывании отжигаемых изделий также необходимо, чтобы не было больших перепадов температур между внутренними и наружными частями изделий, и, кроме того, следует обеспечить нужное время для проходящих в материале при отжиге процессов. Именно исходя из этих соображений, технологи и дают максимально допустимые скорости нагрева и остывания изделий. Задача конструктора печи заключается в том, чтобы выбрать оптимальные скорости нагрева и остывания, которые не превосходили бы заданные максимально допустимые скорости, обеспечивали бы заданную производительность печи и в то же время обуславливали приемлемые мощности и размеры печей. Поэтому при проектировании электрических печей часто приходится уделять внимание и вопросу определения времени нагрева и остывания изделий.

Время нагрева определяется по-разному для тонких и массивных изделий. Теплотехнически тонким будем называть изделие, скорость нагрева которого практически не отличается от скорости нагрева изделия из

материала с бесконечно большой теплопроводностью, у которого внутренний перепад температур всегда близок к нулю; изделия, при расчете которых нельзя пренебречь внутренним перепадом температур, будем называть теплотехнически массивными.

Степень массивности тела зависит не только от его толщины, но и от его теплопроводности (чем больше коэффициент теплопроводности, тем меньше сопротивление распространению теплового потока внутри тела, тем меньше внутренние перепады температур), и от коэффициента теплоотдачи на его поверхности (от значения последнего зависит наружный перепад температур), а следовательно, и от температуры печи, определяющей собой коэффициент теплоотдачи. С учетом этого степень массивности тела может быть охарактеризована числом Био, выражающим собой отношение внутреннего термического сопротивления к внешнему

$$\left( Bi = \frac{\alpha}{\lambda} S = \frac{S/\lambda}{1/\alpha} \right).$$

При малых значениях числа Био наружный перепад температур намного больше внутреннего, изделие ведет себя как тонкое, при больших, наоборот, превалирует внутренний перепад и изделие ведет себя как массивное. Как показал Г. П. Иванцов, при значении числа Био  $Bi=2$  наступает равенство обоих перепадов, наружного и внутреннего, однако и при существенно меньших значениях  $Bi$  пренебречь внутренним сопротивлением тела при расчете времени нагрева нельзя. При  $Bi \ll 0,25$  мы имеем дело с практически тонкими изделиями, при  $Bi > 0,5$  — область массивных изделий, наконец, интервал  $0,25 < Bi < 0,5$  — переходная область, которую следовало бы отнести к области массивных изделий, но для которой можно пользоваться и выражениями для времени нагрева тонких изделий, так как ошибка получается очень небольшая.

### 2.2.1.2 Нагрев тонких изделий

На рис. 2.25 показаны графики нагрева изделий при постоянной температуре печи. Термин «температура печи» является условным, так как в действительности в камере печи температуры в отдельных точках различны. Так, можно говорить о температуре нагревателей, поверхности огнеупорной кладки, поверхности жароупорных деталей и т. д. Под температурой печи следует понимать некую среднюю температуру, которая с точки зрения нагрева изделий обусловит тот же эффект, что и вышеперечисленные нагретые части камеры печи. Такую температуру показала бы установленная около изделий термопара, если бы она была заэкранирована от последних и в то же время «видела» бы стены и свод печи. Эта температура и является

расчетной, задаваемой при нагреве. Если конец регулирующий режим печи термопары не находится очень близко к нагревателям, то ее показание не будет сильно отличаться от расчетной температуры печи. В противном случае персоналу приходится опытным путем находить уставку терморегулятора, которая должна обеспечить условия нагрева при расчетной температуре (обычно это увеличение сверх расчетной на 10—20 °С).

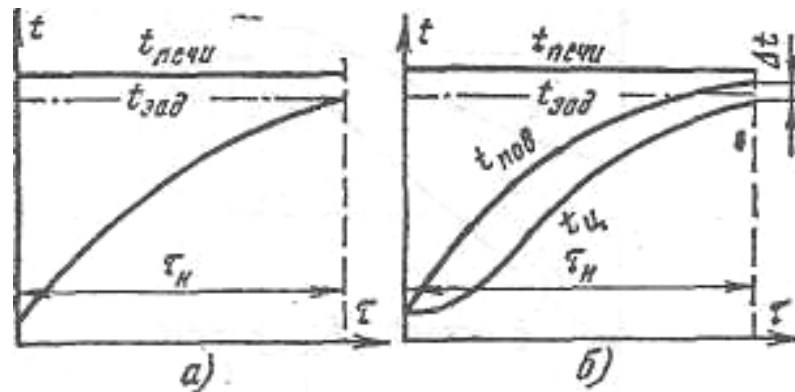


Рис. 2.25. График нагрева изделий в печи периодического действия при постоянной температуре печи.

а — тонкие изделия; б — массивные изделия

В действительности нагрев изделий в электрических печах сопротивления происходит с самого начала при постоянной температуре лишь в редких случаях, когда теплопринимающая способность изделий низка (длительный режим нагрева), или при существенном недоиспользовании печи, работающей в режиме, приближающемся к холостому ходу, а также при загрузке и разгрузке ее малыми порциями. Если же печь периодического действия загружается нормально и притом в один прием, то при этом происходит резкое снижение температуры в камере, что обуславливает довольно существенное увеличение времени нагрева изделий по сравнению с временем нагрева при постоянной температуре печи (рис. 2.26).

Поэтому в электрических печах периодического действия приходится разбивать нагрев на два этапа. Первый этап — от начала нагрева до достижения в камере печи заданной температуры — характеризуется тем, что вследствие низкой температуры садки она поглощает всю выделяющуюся в камере печи полезную мощность (мощность печи минус тепловые потери). В этот период температура печи меняется, она медленно поднимается к заданному значению, терморегулятор не работает, а так как при этом мощность печи остается постоянной (тепловые потери ее в первом предположении также можно считать постоянными), то, следовательно, мы будем иметь дело с режимом нагрева при постоянном тепловом потоке.



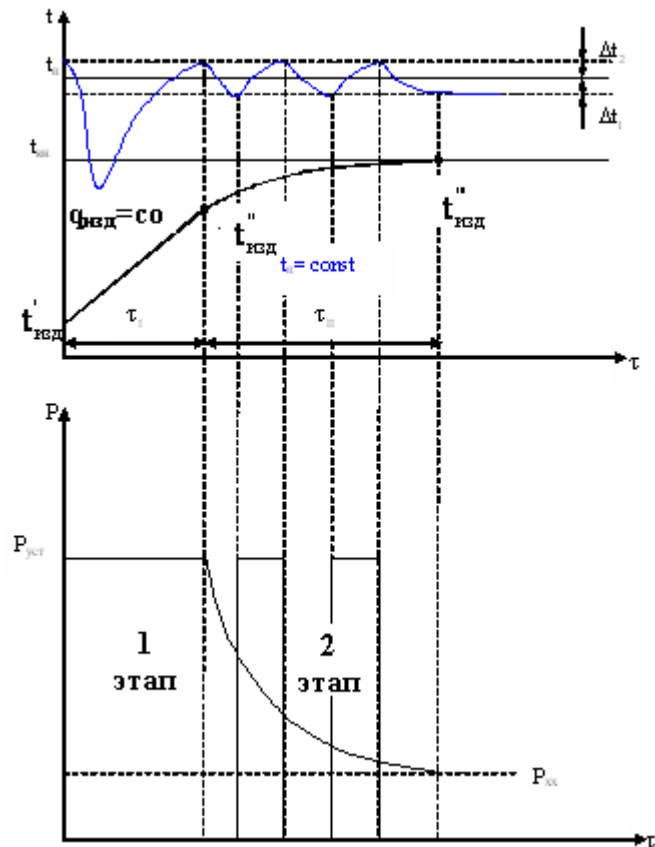


Рис. 2.26. График нагрева тонкого изделия в электрической печи периодического действия

Значение этого теплового потока легко определяется из формулы

$$q_{\text{п}} = (P_{\text{печи}} - P_{\text{пот}}) \frac{1}{F_{\text{изд}}},$$

где  $q_{\text{п}}$  — постоянный тепловой поток, воспринимаемый единицей поверхности нагреваемых изделий;

$P_{\text{печи}}$  — мощность печи;

$P_{\text{пот}}$  — мощность тепловых потерь печи;

$F_{\text{изд}}$  — тепловоспринимающая поверхность изделий.

Если речь идет о высокотемпературной печи, то влиянием естественной конвекции в ней можно пренебречь, и уравнение теплопередачи будет иметь вид:

$$q_{\text{изд}} = C_{\text{пр}} \cdot \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{изд}}''}{100} \right)^4 \right],$$

здесь  $T_{\text{печи}}$  и  $T_{\text{изд}}$  — текущие значения температур печи и изделия;  
 $C_{\text{пр}}$  — приведенный коэффициент лучеиспускания.

Так как изделие находится в камере печи и его поверхность обычно намного меньше поверхности стен последней, то с будет

$$C_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\epsilon_{\text{изд}}} + \frac{F_{\text{изд}}}{F_{\text{печи}}} \left( \frac{1}{\epsilon_{\text{печи}}} - 1 \right)}.$$

Степень черноты стен печной камеры и нагревателей близка к 0,9, как мы уже указывали,  $F_{\text{изд}}$  существенно меньше  $F_{\text{печи}}$ , поэтому во многих случаях с достаточной для практических целей точностью можно принять:

$$C_{\text{пр}} = 5,76\epsilon_{\text{изд}} = C_{\text{изд}}.$$

В тех же случаях, когда значения  $F_{\text{изд}}$  и  $F_{\text{печи}}$  близки друг к другу, приведенный коэффициент лучеиспускания равен:

$$C_{\text{пр}} = \frac{5,76}{1/\epsilon_{\text{изд}} + 1/\epsilon_{\text{печи}} - 1}.$$

Конец первого и начало второго этапа характеризуются достижением заданного значения температуры рабочего пространства. При этом для тонких изделий их температура может быть определена:

$$t'' = 100 \sqrt{\left( \frac{T'_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \frac{q_n}{C_{\text{пр}}}} - 273.$$

Количество тепла, воспринятое изделием за период первого этапа, будет равно:  $q_{\text{п}} F_{\text{изд}} \tau_1$ , где  $\tau_1$  — длительность первого этапа. Это тепло пойдет на нагрев изделий от начальной температуры  $t'_{\text{изд}}$  до  $t''_{\text{изд}}$ , поэтому можно написать:

$$q_{\text{п}} F_{\text{изд}} \tau_1 = Gc (t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}})$$

и, следовательно,

$$\tau_1 = \frac{Gc (t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}})}{q_{\text{п}} F_{\text{изд}}}; \quad (2.1)$$

здесь  $G$  — масса изделий;

$c$  — средняя удельная теплоемкость.

Для низкотемпературных печей и для печей с принудительной циркуляцией необходимо учитывать конвекцию, поэтому уравнение теплопередачи удобнее переписать в иной форме

$$q_{\Pi} = (\alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}})(t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}});$$

здесь  $\alpha_{\text{изл}}$  — коэффициент теплоотдачи излучением, может быть определен из

$$\alpha_{\text{изл}} = c_{\text{пр}} \frac{\left[ \left( \frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{печи}} - t_{\text{изд}}}$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{\text{конв}}$  может быть рассчитан в зависимости от характера конвекции, формы изделий и параметров среды. В печах с естественной конвекцией он меняется сравнительно мало и может быть в среднем принят равным  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Учитывая это для момента времени, соответствующего достижению температурой печи заданного значения  $T''_{\text{печи}}$ , будем иметь

$$q_{\text{изд}} = C_{\text{пр}} \cdot \left[ \left( \frac{T''_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T''_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right] + 10 \cdot (t''_{\text{печи}} - t''_{\text{изд}}) \quad (2.2)$$

Выражение (2.2) действительно, если поверхности изделий, воспринимающие тепло излучением и конвекцией, равны, что обычно имеет место для тонких изделий.

Из (2.2) может быть определена температура изделия в момент окончания регулярного режима  $T''_{\text{изд}}$ .

Длительность первого этапа  $\tau_1$  может быть определена, как и раньше, из (2.1).

По достижении печью заданного значения температуры начинает работать терморегулятор, поддерживая ее неизменной, мощность печи при этом начинает снижаться. В течение второго этапа работы, следовательно, нагрев изделий осуществляется при постоянной температуре печи (рис. 2.26).

При нагреве тонких изделий в них практически отсутствует внутренний перепад температур, поэтому выдержка их в печи при постоянной температуре является необходимой, лишь когда требуется время

на прохождение в материале тех или иных процессов. Следовательно, при нагреве тонких изделий наличие выдержки и ее время всецело определяются технологами.

### 2.2.1.3 Остывание тонких изделий

Остывание изделий может происходить в самой печи или вне ее, в специальной камере, на воздухе, в струе воздуха. В первом случае печь будет остывать вместе с изделием. При этом все аккумулированное в печи тепло, т. е. тепло кладки, жароупорных деталей, самих изделий, должно быть из нее удалено. Естественно, что это связано с большими потерями тепла, поэтому остывание изделий в печи применяется лишь тогда, когда технологический процесс термической обработки требует их медленного остывания или если не только нагрев, но и остывание должно быть проведено в вакууме или в защитной атмосфере. В последнем случае, однако, там, где это возможно, предпочитают проводить остывание изделий не в самой печи, а в специальных герметических муфелях или горшках с тем, чтобы сохранить аккумулированное кладкой тепло.

Если не приняты специальные меры по ускорению процесса остывания (вдувание в печь холодного воздуха, опускание в печь охлаждаемых водой змеевиков), то аккумулированное печью тепло может быть удалено лишь через ее тепловые потери. Поэтому если бы между тепловыми потерями печи и ее температурой имелась прямая пропорциональность (что в действительности и имеет место при высоких и средних температурах), то для получения времени остывания изделий в печи достаточно было бы разделить аккумулированное ею тепло на средние за время остывания потери:

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{Q''_{\text{ак}} - Q'''_{\text{ак}}}{\frac{1}{2} (q''_{\text{пот}} + q'''_{\text{пот}})}$$

где  $q''_{\text{пот}}$  – тепловые потери печи при температуре, соответствующей началу остывания;

$q'''_{\text{пот}}$  — тепловые потери печи, соответствующие температуре конца остывания, при которой изделие может быть вынуто из печи;

$Q''_{\text{ак}}$  – аккумулированное печью тепло при температуре начала остывания;

$Q'''_{\text{ак}}$  – аккумулированное печью тепло при температуре конца остывания.

Для расчета времени остывания печи тепловые потери ее могут быть определены по ориентировочному эскизу ее футеровки. Аккумулированное

печью тепло определяется отдельно для каждого слоя кладки, для жароупора и для изделия как произведение массы на удельную теплоемкость и на среднюю температуру:

для огнеупорного слоя

$$Q_{\text{огн}} = G_{\text{огн}} c_{\text{огн}} t_{\text{ср.огн}};$$

для теплоизоляции

$$Q_{\text{тепл}} = G_{\text{тепл}} c_{\text{тепл}} t_{\text{ср.тепл}} \text{ и т.д.};$$

$$Q_{\text{ак}} = Q_{\text{огн}} + Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{жар}} + Q_{\text{изд}}$$

Средние температуры огнеупора и теплоизоляции берутся из расчета тепловых потерь печи. Температуры жароупорных деталей и изделий в начале остывания могут быть приняты равными заданной температуре нагрева изделий, а в конце остывания — расчетной для этого момента температуре печи.

При желании получить несколько более точное решение с учетом отклонения кривой тепловых потерь от прямой (печи с экранной теплоизоляцией, печи с тонкой теплоизоляцией), можно применить графический метод в соответствии с построением, показанным на рис. 2.27. На нем нанесены кривые аккумулированного печью тепла при разных температурах и кривая тепловых потерь. Если от аккумулированного печью при температуре  $t''_1$  тепла отнять ее часовые тепловые потери при той же температуре, то, построив треугольник ABC, по точке C можно определить, какую температуру  $t_1$  примет печь через час от начала остывания и какое тепло останется в ней при этом аккумулированным. Если затем от этого тепла отнять часовые потери тепла, соответствующие температуре  $t_1$ , осуществив построение треугольника CDE, то можно определить температуру печи  $t_2$  в конце второго часа остывания. Продолжая дальше такие же построения до момента достижения температуры конца процесса остывания  $t'''$ , можно не только определить время остывания, но и построить график изменения температуры внутри печи (соответствующей температуре изделий) по времени.

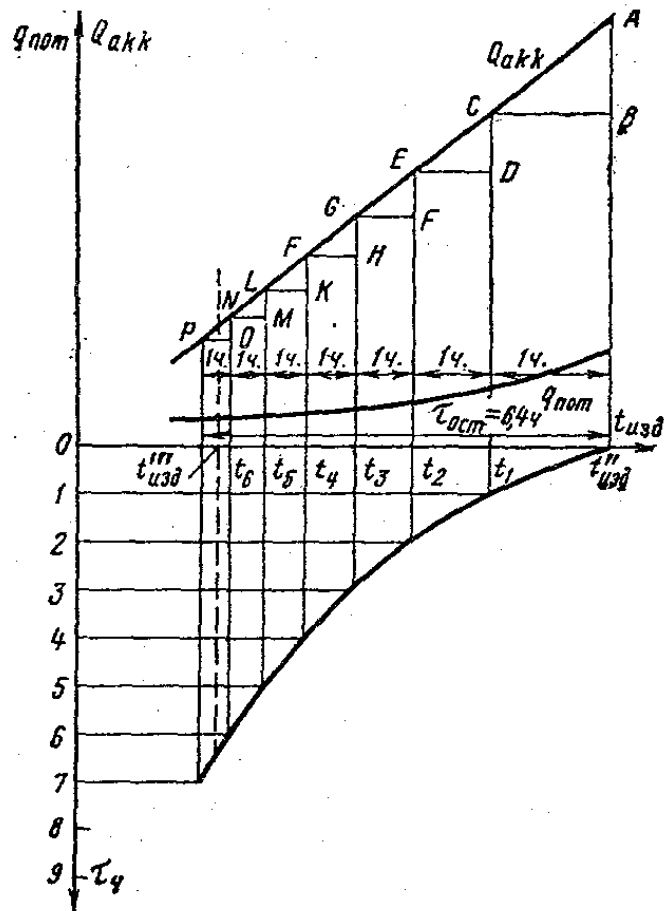


Рис. 2.27. Построение кривой остывания изделия в печи

Полученные при помощи графического построения результаты дадут для времени остывания более точное решение (особенно при низких температурах), если количество построений будет достаточно велико (не менее 7—8, так как принимается, что в период одного интервала  $q_{\text{пот}} = \text{const}$ ). При этом, если процесс остывания длится всего лишь 3—4 ч., треугольники ABC, CDE и т. д. следует строить не для часовых интервалов времени, а для более мелких, принимая значения тепловых потерь, например, за 1/2 ч. Наоборот, если длительность остывания составляет десятки часов, то эти интервалы целесообразно соответственно увеличить.

При проведении вышеизложенного метода расчета времени остывания изделия в печи необходимо иметь в виду, что в наших рассуждениях мы не учитывали перераспределения тепла в кладке, вызванного нестационарным процессом ее остывания. Поэтому значения времени остывания, полученные графическим путем, также не будут вполне точными. Получить, однако, более точное решение с учетом указанного процесса перераспределения тепла в толще кладки практически очень трудно, так как стены электрических печей неоднородны, скорость их остывания будет различна и поэтому в процессе остывания будет происходить перераспределение тепла

не только в их толще, но и между отдельными стенками печной камеры. Кроме того, при этом и само остывание изделий будет не вполне симметричным.

При остывании изделий на воздухе они отдают окружающему пространству аккумулированное в них тепло излучением и конвекцией. Коэффициент теплоотдачи излучением очень сильно зависит от температуры, и со снижением температуры изделия отдаваемое последним тепло резко падает. Поэтому в начале остывания изделие охлаждается очень быстро, затем скорость остывания уменьшается все больше и в конечном счете общее время охлаждения определяется именно остыванием при низких температурах.

Весьма значительное изменение коэффициента теплоотдачи изделия в процессе охлаждения делает невозможным использование для него средних значений, поэтому определение времени остывания изделий на воздухе (или в камере охлаждения) следует вести графическим путем, по участкам, разбивая температурную кривую на интервалы и подсчитывая для каждого из них свои средние значения коэффициентов теплоотдачи излучением и конвекцией аналогично тому, как это было указано при построении графическим методом кривой нагрева тонких изделий.

### 2.2.1.4 Нагрев массивных изделий

При нагреве массивных изделий в печах периодического действия время нагрева изделий, как и в предыдущем случае, может быть разбито на два этапа: первый этап — нагрев при постоянном тепловом потоке— и второй этап — нагрев при постоянной температуре печи (рис. 2.29).

По достижении температурой поверхности изделия значения  $t''_{\text{пов}}$  закончится первый этап, так как при этом температура печи достигнет заданного значения  $T_{\text{печи}}$  и в дальнейшем благодаря работе терморегулятора остается неизменной, начнется второй этап нагрева при постоянной температуре печи. К этому моменту температура центра изделия станет равной  $t''_{\text{центр}} = t''_{\text{пов}} - \Delta t$ , а по сечению его установится параболическое (для плиты) распределение температуры. Расчет нагрева на втором этапе должен, очевидно, вестись с учетом этого распределения температуры в начальный период этапа. Это легко выполнить, если принять для этого момента в сечении изделия наличие некоторой средней температуры  $t''_{\text{ср}}$ . Формулы расчета параметров приведены в табл. 2.2.

Расчет времени остывания массивных тел в печи может быть осуществлен так же, как и для тонких изделий, построением по рис. 2.27. Наличие вокруг изделий нагретой кладки печи с весьма большим тепловым сопротивлением приводит к тому, что теплоотдача поверхности изделий падает во много раз, остывание ее происходит медленно и внутренние тем-

пературы изделий успевают выровняться. Следовательно, помещение изделий для остывания в печь приводит к резкому уменьшению числа Био, к тому, что массивные изделия остывают как тонкие.

Таблица 2.2

Расчет параметров первого этапа

Пластина	Сплошной цилиндр
$\tau_1' = 0,3 \cdot \frac{S^2}{a}$	$\tau_1' = 0,25 \cdot \frac{R^2}{a}$
$\Delta t_1 = q_{\text{изд}} \cdot \frac{S}{2 \cdot \lambda}$	$\Delta t_1 = q_{\text{изд}} \cdot \frac{R}{2 \cdot \lambda}$
$t_{\text{пов}}' = 1,27 \cdot \Delta t + t_0$	$t_{\text{пов}}' = 1,5 \cdot \Delta t + t_0$
$t_{\text{ц}}' = t_{\text{пов}}' - \Delta t_1$	$t_{\text{ц}}' = t_{\text{пов}}' - \Delta t_1$
$\Theta = \frac{q_{\text{изд}}}{(C \cdot \rho \cdot S)}$	$\Theta = \frac{2 \cdot q_{\text{изд}}}{(C \cdot \rho \cdot R)}$
$\tau_1'' = \frac{t_{\text{пов}}'' - t_{\text{пов}}'}{\Theta}$	$\tau_1'' = \frac{t_{\text{пов}}'' - t_{\text{пов}}'}{\Theta}$
$\tau_1 = \tau_1' + \tau_1''$	$\tau_1 = \tau_1' + \tau_1''$

При остывании массивных изделий на воздухе в них получается существенный внутренний перепад, который постепенно уменьшается по мере снижения температуры их поверхности. Так же как и при остывании тонких изделий, коэффициенты теплоотдачи, а следовательно, и числа Био очень сильно меняются, поэтому пользование средними значениями  $\lambda$  и  $Bi$  может привести к крупным ошибкам. Расчет остывания на воздухе крупных изделий необходимо, следовательно, вести по графикам Будрина, но по участкам, с определением для каждого участка средних значений  $\lambda$  и  $Bi$  и построением кривых остывания для поверхности и центра изделия.



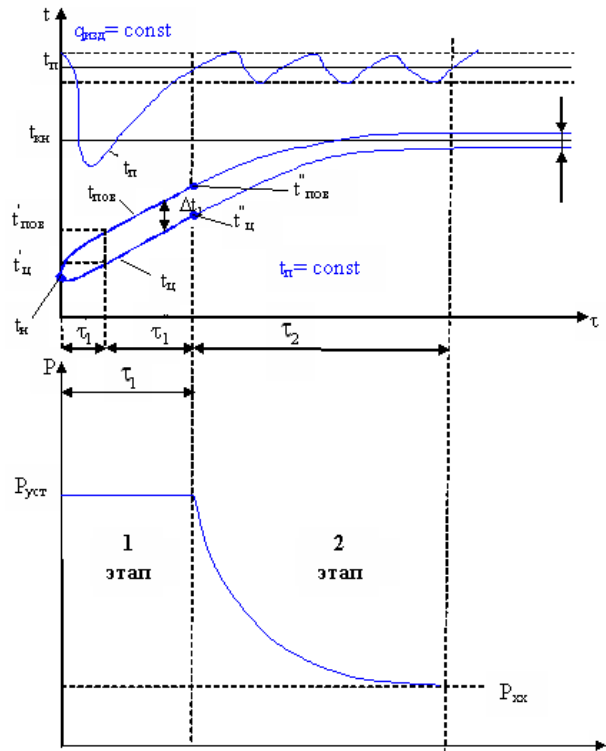


Рис. 2.27. График нагрева массивного изделия в электрической печи периодического действия.

## 2.2.2 Электрический расчет электрических печей сопротивления

Всю выделяющуюся в нагревателе мощность можно разбить на три составляющих:

- 1) мощность  $P_{пол}$ , воспринимаемую изделием от нагревателя (полезная мощность);
- 2) мощность  $P_{пот}$ , воспринимаемую футеровкой (мощность тепловых потерь);
- 3) мощность переизлучения между футеровкой и изделием.

Схема теплопередачи в электрической печи сопротивления представлена на рис. 2.28.

Схемы расположения нагревательных элементов в ЭПС показаны на рис.2.29.

Первый вариант (рис.2.29) соответствует реально существующим, но не широко применяемым печам; он близок к идеализированному варианту теплообмена системы «нагреватель–нагреваемое изделие–футеровка» - «идеальному нагревателю».

Два других варианта(рис.2.30 и рис. 2.31) наиболее широко применяемые схемы рабочей камеры ЭПС.

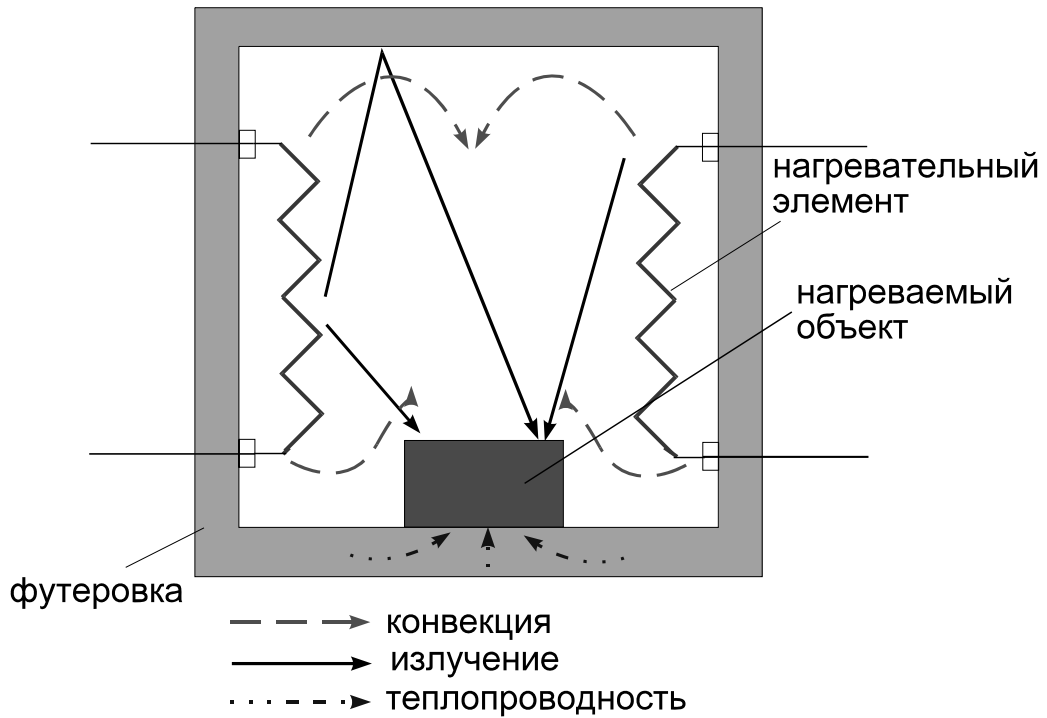


Рис. 2.28. Схема теплопередачи в электрической печи сопротивления

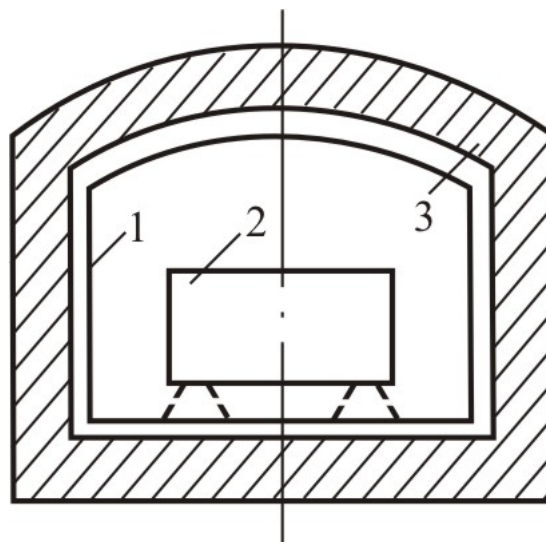


Рис. 2.29. Электрическая печь со сплошным нагревателем

Если в первом случае нагреватель, отдавая тепло нагреваемому изделию и футеровке, экранирует их друг от друга, то во втором и третьем – футеровка и нагреваемое изделие «видят друг друга».

При рассмотрении процессов теплопередачи в печи с таким нагревателем приходится базироваться на следующих допущениях:

- 1) процесс теплообмена в камере печи принимается стационарным, соответствующим режиму наибольшей температуры нагреваемых изделий;
- 2) все участвующие в теплообмене тела являются серыми;
- 3) температуры всех точек поверхностей каждого из тел принимаются равными;
- 4) процесс теплопередачи между любыми двумя из трех включенных в теплообмен тел рассматривается как отдельный.

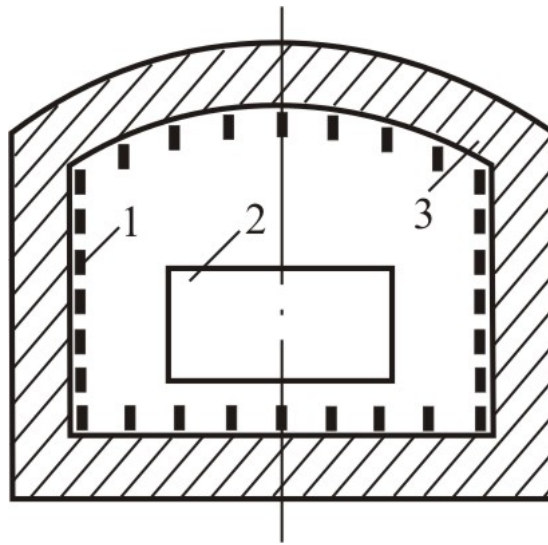


Рис. 2.30. Электродуховка с нагревателем с нарушенной сплошностью (например, зигзагообразный)

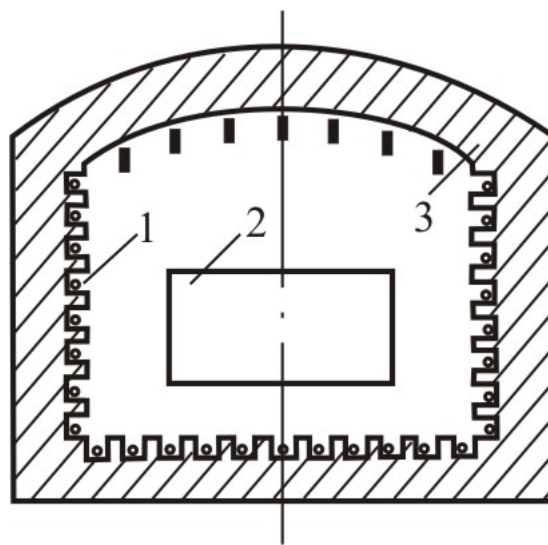


Рис. 2.31. Электродуховка с нагревателем, расположенным в пазах футеровки

Тогда можно представить энергетический баланс нагревателя, нагреваемого изделия и футеровки следующим образом:

Энергетический баланс нагревателя

$$Q_{12} + Q_{13} = C_{12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{12} + C_{13} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 \right] F_{13} = P$$

Энергетический баланс изделия

$$Q_{12} + Q_{32} = C_{12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{12} + C_{32} \left[ \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{32} = P_{пол}$$

Энергетический баланс футеровки

$$Q_{13} - Q_{32} = C_{13} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 \right] F_{13} - C_{32} \left[ \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{32} = P_{ном}$$

Используя любые два из них, получим

$$t_1 = t_n = 100 \sqrt[4]{\frac{m[(1-\gamma)C_{13}F_{13} + C_{32}F_{32}]}{C_{12}F_{12}C_{13}F_{13} + C_{13}F_{13}C_{32}F_{32} + C_{12}F_{12}C_{32}F_{32}} + \left( \frac{T_2}{100} \right)^4} - 273, ^\circ C, \quad (2.3)$$

где  $\gamma = \frac{m_{\text{фут}}}{m}$ ,

Уравнение (2.3) позволяет для уже работающей печи, у которой известны материал и размеры нагревателей, изделия и футеровки, а также температура изделия  $t_2$ , определить температуру нагревателя  $t_1$ .

Если приведенных выше данных нет, необходимо определить удельную поверхностную мощность реального нагревателя

$$W = P / F_{нагр}$$

У реального нагревателя лишь часть энергии доходит до изделия, кроме того, он покрывает не только полезное тепло, но и тепловые потери.

Поэтому необходимо ввести фиктивную активную поверхность нагревателя, т.е. такую поверхность, вся энергия с которой идет на нагрев изделия.

$$P_{пол} = W_{ид} \cdot F_{акт} = W \cdot F_{нагр} \cdot (1 - \gamma)$$

$$W = W_{ид} \frac{F_{акт}}{F_{нагр} \cdot (1 - \gamma)}$$

Другими словами, активной поверхностью реального нагревателя принято считать поверхность эквивалентного ему идеального нагревателя.

Дадим определение идеальному нагревателю.

*Идеальный нагреватель* – это нагреватель, обладающий следующими свойствами

- 1) расположен в идеальной печи, у которой нет тепловых потерь, т.е. вся мощность нагревателя тратится на нагрев изделия;
- 2) является сплошным;
- 3) расположен в плоскости поверхности изделия;
- 4) все поверхности, участвующие в теплообмене с идеальным нагревателем, являются серыми с  $\varepsilon = 0.8$

Мощность идеального нагревателя находится по формуле

$$P_{ид} = P_{печи} = \frac{5.67}{\frac{1}{\varepsilon_n} + \frac{1}{\varepsilon_{изд}} - 1} \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right] F$$

Следовательно, можно ввести понятие удельной поверхностной мощности идеального нагревателя, т.е. количества тепла, отдаваемого с единицы поверхности

$$W_{ид} = C_{np} \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right] \quad (2.4)$$

$$C_{np} = \frac{5,67}{\frac{1}{\varepsilon_n} + \frac{1}{\varepsilon_{изд}} - 1}$$

Для идеального нагревателя можно написать

$$P_{пол} = P(1 - \gamma) = C_{12} F_{акт} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

или

$$\frac{P(1-\gamma)}{C_{12}F_{акт}} = \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4$$

После преобразований мы можем получить

$$W = W_{ид} \frac{C_{12}F_{12}C_{13}F_{13} + C_{13}F_{13}C_{32}F_{32} + C_{12}F_{12}C_{32}F_{32}}{F_1[(1-\gamma)C_{12}C_{13}F_{13} + C_{12}C_{32}F_{32}]} \quad (2.5)$$

Анализ выражений (2.4) и (2.5) показывает, что удельная поверхностная мощность реального нагревателя зависит от:

- 1) температур нагреваемого изделия и нагревателя;
- 2) степени черноты изделия и нагревателя;
- 3) геометрии нагревателя, футеровки и изделия.

Определенную трудность в применении (2.5) представляет вычисление взаимных поверхностей излучения  $F_{12}$ ,  $F_{13}$ ,  $F_{32}$ .

Отношения  $F_{12} / F_1$ ,  $F_{32} / F_3$ ,  $F_{32} / F_{12}$  являются угловыми коэффициентами системы "нагреватель - изделие - футеровка".

Поэтому необходимо применения зонального метода расчета при конкретном конструктивном исполнении нагревательного элемента: ленточного или проволочного зигзага, проволочной спирали, или стержневого нагревателя.

Рассмотрим определение электрических параметров нагревателей электрических печей сопротивления (мощности и напряжения расчетной фазоветви).

Для этого необходимо установить количество тепловых зон в электропечи и выбрать схему соединения нагревателей зоны.

Количество тепловых зон принимается на основании общих рекомендации: в печах с высокими камерами, в шахтных и колпаковых высота зоны 1...1,5 м., в протяженных в длину и печах непрерывного действия – длина зоны 1,5...2,5 м.

В крупных печах периодического действия мощности зон могут быть приняты равными.

С точки зрения обеспечения работы нагревателей от сети 220/380 В, мощность трехфазной зоны может составлять 100...160 кВт, но не более 250 кВт.

Необходимо выделять тепловые зоны для перемещающихся частей печей, например выдвигного пода.

Маломощные зоны или печи могут быть однофазными.

Если при проектировании рассчитывалось время нагрева в печи непрерывного действия, то из этого расчета получается количество зон и их мощность.

В остальных случаях установленная мощность тепловых зон распределяется так, чтобы максимальное значение было в первой зоне у загрузочного окна, а далее мощность уменьшается в каждой следующей зоне на 10...15 %,

При питании от трехфазной сети напряжением 380/220В могут быть применены две схемы соединения нагревателей: треугольник - на нагревателе линейное напряжение 380В, звезда - фазное напряжение 220 В.

Для, однофазной зоны, как правило, принимается напряжение 220 В.

В отдельных обоснованных случаях, например для питания нагревателей маломощных зон в печах непрерывного действия, допускается применение понижающих трансформаторов.

Рассмотрим выбор размеров нагревателя по номограммам.

Номограммы связывают электрические и геометрические параметры нагревателя.

По мощности  $P$ , напряжению на нагревателе  $U$  и допустимой удельной поверхностной мощности  $W$  определяются диаметр  $d$  и длина проволочного нагревателя  $L$  - из никельхромовых сплавов (рис.2.32), - из железохромоалюминиевых сплавов (рис. 2.33).

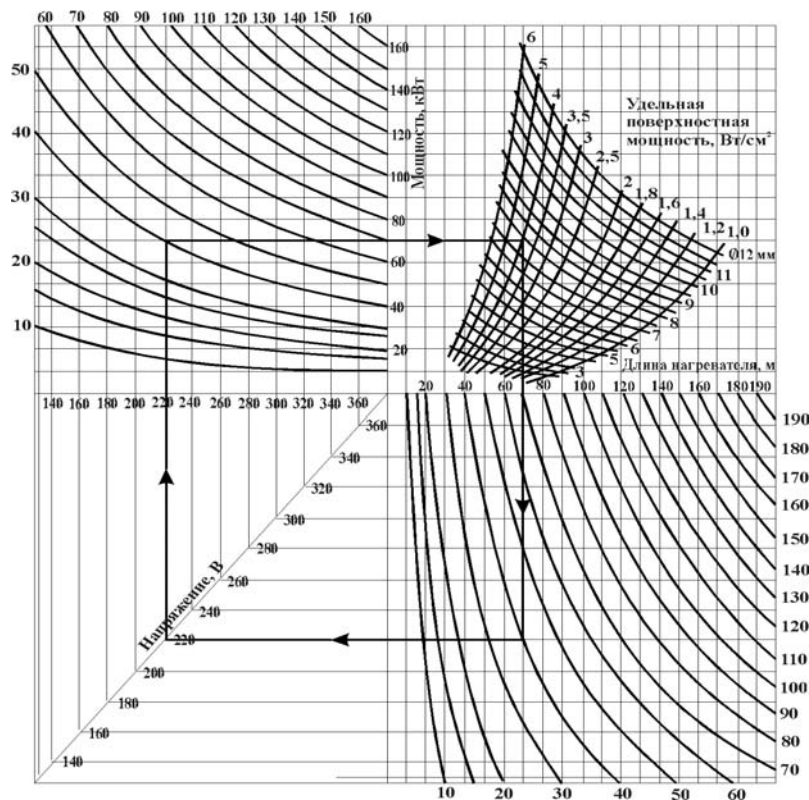


Рис. 2.32. Номограмма для расчета проволочных нагревателей из никельхромовых сплавов

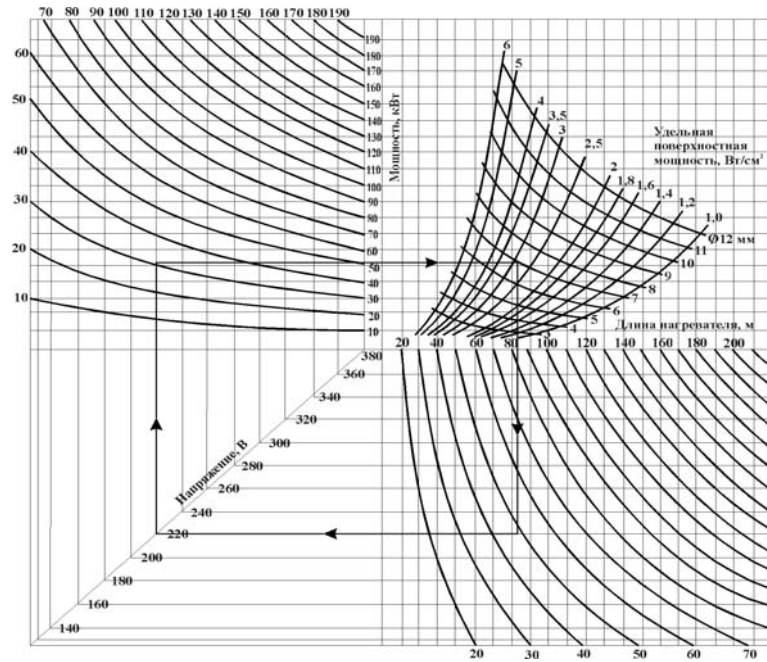


Рис. 2.33. Номограмма для расчета проволочных нагревателей из железохромоалюминиевых сплавов

С помощью номограмм можно просмотреть несколько вариантов питания нагревателя.

Выбирается нагреватель более массивный с большим сроком службы, более удобный для размещения, соответствующий предварительно выбранной конструкции (проволочный зигзаг  $d = 6,3 \dots 11$  мм, спираль  $d = 4 \dots 5,6$  мм).

Принимается стандартный диаметр проволоки: 4; 4,5; 5; 5,6; 6,3; 7; 8; 9; 10; 11; 12 мм.

Рассмотрим уточненный расчет параметров нагревателя  
- сопротивление нагревателя (фазоветви)

$$R_r = \frac{U^2}{10^3 P},$$

где  $U$  - напряжение на нагревателе, В;

$P$  - мощность фазы, кВт;

- развернутая длина нагревателя, м

$$L_p = \frac{\pi d^2 \cdot R_r}{4 \rho_r},$$



где  $\rho_r$  - удельное сопротивление материала при рабочей температуре, Ом.мм<sup>2</sup>/м;

- расчетная удельная поверхностная мощность

$$W_p = \frac{P \cdot 10^3}{\pi d \cdot L_p}$$

Проверка нагревателя на аварийный режим производится для печей периодического действия и для последних зон нагрева печей непрерывного действия.

При задержке изделия в печи или в зоне (поломка механизма передвижения) температура его поверхности может достигнуть температуры печи и нагреватели могут перегреться.

Определяется значение  $tn'$  по  $W'$  и  $d$  и  $tn_{п} = tn_{печи}$ .

Полученная температура нагревателя должна превышать максимально допустимую для данного сплава.

Расчетный срок службы нагревателя определяют по следующим формулам:

- для никельхромовых сплавов и железохромоалюминиевых сплавов при температуре до 1200°C

$$\tau_p = d \cdot \tau_1 \cdot \kappa_L \cdot \kappa_k,$$

- для железохромоалюминиевых сплавов при температуре, большей или равной 1200°C,

$$\tau_p = d^{1,9} \cdot \tau_1 \cdot \kappa_L \cdot \kappa_k,$$

$\kappa_k$  - коэффициент конструкции, учитывающий затемнение отдельных участков нагревателя, при работе в воздушной атмосфере можно принять  $\kappa_k=1$  - для никельхромовых сплавов,  $\kappa_k=0,82$  - зигзагообразный нагреватель из железохромоалюминиевых сплавов;  $\kappa_L$  - коэффициент, зависящий от длины нагревателя, определяется по табл. 2.3.

Таблица 2.3

Коэффициент, зависящий от длины нагревателя

L, м	Менее 30	30...50	Более 50
KL	1-0,005L	0,85	0,7

### 2.3. Проектирование электропечей сопротивления периодического действия

При проектировании электропечи сопротивления периодического действия обычно задается либо часовая ее производительность, либо ее единовременная загрузка. Последняя необходима для конструирования камеры печи, поэтому, если она неизвестна, ею приходится задаваться с последующей проверкой ее соответствия заданной производительности печи.

Конструируют печную камеру, определяют ее размеры и параметры, учитывая следующие положения:

- внутренние размеры камеры печи должны быть по возможности малы и соответствовать размерам загрузки; наличие вредного, неиспользованного пространства в камере печи приводит к увеличению ее внешних размеров и тепловых потерь.

- внешние габариты печи определяются ее внутренними размерами и толщиной кладки. Кладка должна обеспечить низкие температуры кожуха печи (не выше 60°C при температуре окружающего воздуха в 20°C). Не следует при проектировании электрических печей экономить на теплоизоляции, так как она очень быстро окупает себя. Огнеупорная часть кладки должна выполняться из возможно более легкого, допустимого по условиям прочности материала, с тем, чтобы снизить аккумулированное тепло. Ни в коем случае не следует применять излишне прочный и, следовательно, тяжелый материал и по возможности избегать тепловых коротких замыканий (металлические детали, проходящие через кладку), способных значительно повысить тепловые потери печи,

Расположение нагревателей в печи должно определяться как технологическими требованиями, так и возможностью размещения их в печи. Следующим этапом является определение времени нагрева садки. Если часовая производительность печи задана, то время цикла,  $\tau$ , легко определяется из формулы

$$\tau_{\text{цикла}} = \frac{G}{M},$$

где  $G$  - масса загрузки печи, кг;

$M$  - ее часовая производительность, кг/ч.

Время цикла в общем виде

$$\tau_{\text{цикла}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{пр}},$$

где  $\tau_{нагр}$  - время нагрева;  
 $\tau_{выд}$  - время выдержки;  
 $\tau_{пр}$  - время простоя печи.

Остывание, как правило, проводят вне печи, чтобы сохранить накопленное кладкой за время нагрева тепло.

Время простоя печи  $\tau_{пр}$  складывается из времени ее загрузки и выгрузки, а иногда также из времени, необходимого на ее чистку или подправку.

Время выдержки изделий в печи  $\tau_{выд}$  задается технологическим процессом, в противном случае оно сливается с последним этапом нагрева.

Для определения времени нагрева  $\tau_{нагр}$  необходимо задаться значением удельного полезного теплового потока  $q_n$ . Полезный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>, определяется из следующего выражения

$$q_n = \frac{C_{пр}}{\frac{1}{\varepsilon_{изд}} + \frac{F_{изд}}{F_{ст}} \left( \frac{1}{\varepsilon_{ст}} - 1 \right)} \left[ \left( \frac{T_{печи}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right],$$

где  $C_{пр}$  - приведенный коэффициент лучеиспускания;

$\varepsilon_{изд}$  - степень черноты изделия;

$\varepsilon_{ст}$  - степень черноты стен камеры;

$F_{изд}$  - тепловоспринимающая поверхность изделия;

$F_{ст}$  - поверхность стен камеры;

$T_{печи}$  - температура в камере печи;

$T_{изд}$  - температура изделия.

После определения времени нагрева и производительности печи следует приступить к расчету тепловых потерь печи и к составлению энергетического баланса.

$$Q_{цикл} = Q_{пол} + Q_{всп} + q_{пот.ср} \tau_{цикл},$$

где  $Q_{пол}$  - полезное тепло;

$Q_{всп}$  - тепло, расходуемое на нагрев вспомогательного оборудования;

$q_{пот.ср}$  - тепловые потери за время одного цикла.

Полезное тепло, идущее на нагрев садки,

$$Q_{пол} = G_{изд} C_{изд} (t_{2изд} - t_{1изд}) = G_{изд} (q_{2изд} - q_{1изд})$$

где  $q$  - теплосодержание;

$C$  - удельная теплоемкость;

$t$  - температура;

$G$  - масса материала.

Тепло, идущее на нагрев вспомогательного оборудования,

$$Q_{всп} = G_{всп} C_{всп} (t_{2всп} - t_{1всп}) + G_{газ} C_{газ} (t_{2газ} - t_{1газ}).$$

Тепловые потери за время одного цикла складываются из тепловых потерь за отдельные периоды цикла, т.е. из потерь за время нагрева, выдержки, остывания и простоя печи при загрузке и выгрузке

$$q_{пот.ср} \tau_{цикл} = q_{пот.нагр} \tau_{нагр} + q_{пот.выд} \tau_{выд} + q_{пот.ост} \tau_{ост} + q_{пот.пр} \tau_{пр}.$$

Отдельно подсчитываются тепловые потери через закрытую и открытую дверцы, причем учитывается время открытого состояния последней

$$q_{пот.дв} = q_{пот.откр.дв} \frac{\tau_{откр}}{\tau_{цикл}} + q_{пот.закр.дв} \frac{\tau_{цикл} - \tau_{откр}}{\tau_{цикл}}.$$

Потери через тепловые короткие замыкания следует подсчитывать, оценивая температуру на обоих концах металлического стержня ( $t_1$  и  $t_2$ ), проходящего через стенку:

$$q_{пот.к.х} = \lambda \frac{t_2 - t_1}{L_{стп}} F_{стп},$$

где  $L_{стп}$  - длина стержня;

$F_{стп}$  - сечение стержня;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности.

Расход энергии на единицу обрабатываемой в печи продукции может быть определен из выражения

$$A = \frac{Q_{\text{цикла}}}{M \tau_{\text{цикла}}}.$$

Тепловой КПД печи равен

$$\eta_T = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{пот}} \tau_{\text{цикла}}}.$$

Мощность печи периодического действия

$$P_{\text{печи}} = K \frac{Q_{\text{нагр}}}{\tau_{\text{нагр}}},$$

где  $K$  - коэффициент запаса.

Особое место занимает нагрев в таре или муфеле. В этих условиях определение времени нагрева расчетным путем затруднительно, и оно обычно задается на основе опытных данных.

### 2.3.1 Примеры расчета установленной мощности ЭПС

#### Пример 1

Определить установленную мощность методической печи, предназначенной для нагрева стальных изделий под отпуск до температуры 230°С.

*Исходные данные:*

производительность – 0,139 кг/с;

тепловой КПД печи – 0,72;

электрический КПД печи – 0,95;

удельная теплоемкость стали – 490 Дж/кг·°С (в интервале температур 20 - 230°С).

*Решение*

1. Определение полезной мощности печи

$$P_{пол} = MC(t_2 - t_1),$$

где  $M$  - производительность;

$C$  - удельная теплоемкость;

$t_1$  - начальная температура;

$t_2$  - конечная температура.

$$P_{пол} = 0,139 \cdot 460 \cdot (230 - 20) = 14303,1 \text{ Вт},$$

$$\left[ \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot ^\circ\text{C} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт} \right].$$

## 2. Определение потребляемой мощности

$$P_{потр} = \frac{P_{пол}}{\eta_{эл}\eta_m} = \frac{14303,1}{0,95 \cdot 0,72} = 20910,96 \text{ Вт},$$

где  $\eta_{эл}$  - электрический КПД;

$\eta_m$  - тепловой КПД.

## 3. Определение установленной мощности

$$P_{уст} = P_{потр} k_3,$$

где  $k_3$  - коэффициент запаса (принимается  $k_3 = 1,2$ ).

$$P_{уст} = 20910,96 \cdot 1,2 = 25093,16 \text{ Вт}.$$

## Пример 2

Определить установленную мощность печи непрерывного действия (конвейерной), предназначенной для сушки изделий.

*Исходные данные:*

конвейер – металлический;

теплоемкость материала конвейера –  $477 \text{ Дж/кг}\cdot\text{°C}$ ;

начальная температура –  $20^\circ \text{C}$ ;

температура сушки –  $200^\circ \text{C}$ ;

сушатся влажные металлические изделия;

средняя теплоемкость материала изделий –  $963$  – (в интервале температур  $20 - 200^\circ \text{C}$ );

в течение одного часа прогревается  $300 \text{ кг}$  изделий;

средняя теплоемкость воды –  $4,187 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{°C}$ ;

скорость испарения влаги –  $4,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ ;

скрытая теплота испарения воды -  $2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ ;

средняя теплоемкость водяного пара при атмосферном давлении (в интервале температур от  $100 - 200^\circ \text{C}$ ) –  $2012 \text{ Дж/кг}\cdot\text{°C}$ ;

в печи в течение часа осуществляется четырехкратный воздухообмен;

объем печи  $100 \text{ м}^3$ ;

удельная теплоемкость сухого воздуха –  $1021 \text{ Дж/кг}\cdot\text{°C}$ ;

плотность сухого воздуха –  $0,916 \text{ кг/м}^3$ ;

мощность тепловых потерь с наружных поверхностей стенок печи составляет  $20 \%$  полезной мощности.

***Решение***

Установленная мощность

$$P_{уст} = P_{потр} k_3,$$

где  $k_3$  - коэффициент запаса (принимаем  $k_3 = 1,3$ ).

Потребляемая мощность

$$P_{\text{номр}} = P_{\text{пол}} + P_{\text{вспом}} + P_{\text{потерь}} + P_{\text{ак}},$$

где  $P_{\text{пол}}$  - мощность, затрачиваемая на разогрев изделий;

$P_{\text{вспом}}$  - мощность, затрачиваемая на разогрев вспомогательного оборудования (тары, транспортирующих устройств и т.д.);

$P_{\text{потерь}}$  - мощность, идущая на восстановление тепловых потерь;

$P_{\text{ак}}$  - мощность, аккумулируемая ограждающими конструкциями, находящимися в зоне повышенных температур; эта мощность требует сложного расчета нестационарных процессов, сопровождающих прогрев установки. Однако в ряде случаев ее значение составляет небольшую долю потребляемой мощности, например у слабофутерованных установок, а также когда установка разогревается лишь в начале кампании, затем длительное время работает без отключения. В данной задаче этой мощностью пренебрегаем.

1. Полезная мощность, затрачиваемая на нагрев сухих изделий,

$$P_{\text{пол1}} = MC(t_2 - t_1),$$

где  $M$  - производительность ( $M = \frac{G}{\tau} = \frac{300}{3600} = 0,083$  кг/с);

$C$  - удельная теплоемкость загрузки;

$t_1$  - начальная температура;

$t_2$  - конечная температура.

$$P_{\text{пол1}} = 0,083 \cdot 963 \cdot (200 - 20) = 14387,22 \text{ Вт},$$

$$\left[ \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot ^\circ\text{C} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт} \right].$$



2. Полезная мощность, затрачиваемая на нагрев воды до температуры  $100^{\circ}\text{C}$  и ее испарение,

$$P_{\text{пол}2} = MC(t_2 - t_1) + \lambda \cdot M,$$

где  $M$  - производительность ( $M = 4,16 \cdot 10^{-3}$  кг/с);

$C$  - удельная теплоемкость воды;

$t_1$  - начальная температура ( $20^{\circ}\text{C}$ );

$t_2$  - конечная температура ( $100^{\circ}\text{C}$ );

$\lambda$  - скрытая теплота парообразования ( $\lambda = 2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг).

$$P_{\text{пол}2} = 4,16 \cdot 10^{-3} \cdot 4187 \cdot (100 - 20) + 2,26 \cdot 10^6 \cdot 4,16 \cdot 10^{-3} = 10795,03 \text{ Вт.}$$

3. Полезная мощность, затрачиваемая на нагрев водяного пара,

$$P_{\text{пол}3} = MC(t_2 - t_1),$$

где  $M$  - производительность ( $M = 4,16 \cdot 10^{-3}$  кг/с);

$C$  - удельная теплоемкость водяного пара;

$t_1$  - начальная температура ( $100^{\circ}\text{C}$ );

$t_2$  - конечная температура ( $200^{\circ}\text{C}$ ).

$$P_{\text{пол}3} = 4,16 \cdot 10^{-3} \cdot 2012 \cdot (200 - 100) = 836,99 \text{ Вт.}$$

4. Суммарная полезная мощность

$$P_{\text{пол}} = P_{\text{пол}1} + P_{\text{пол}2} + P_{\text{пол}3} = 14387,22 + 10795,03 + 836,99 = 26019,24 \text{ Вт.}$$

Потери мощности, затрачиваемой на нагрев конвейера (нагрев вспомогательного оборудования),

$$P_{\text{вспом}} = P_{\text{пот}1} = MC(t_2 - t_1),$$

где  $M$  - производительность ( $M = \frac{G}{\tau} = \frac{300}{3600} = 0,083$  кг/с),

производительность принимаем равной производительности по нагреву загрузки;

$C$  - удельная теплоемкость материала конвейера;

$t_1$  - начальная температура ( $20^\circ \text{C}$ );

$t_2$  - конечная температура ( $200^\circ \text{C}$ ).

$$P_{вспом} = P_{ном1} = 0,083 \cdot 1477(200 - 20) = 7126,38 \text{ Вт.}$$

Мощность, затрачиваемая на нагрев сухого воздуха при осуществлении заданного воздухообмена,

$$P_{ном2} = MC(t_2 - t_1),$$

где  $M$  - производительность ( $M = \frac{\gamma_в V_n 4}{3600} = 0,1018$ , здесь  $\gamma_в$  - плотность

сухого воздуха;  $V_n$  - объем печи; 4 – четырехкратный воздухообмен в течение часа (3600 с));

$C$  - удельная теплоемкость сухого воздуха;

$t_1$  - начальная температура ( $20^\circ \text{C}$ );

$t_2$  - конечная температура ( $200^\circ \text{C}$ ).

$$P_{ном2} = 0,1018 \cdot 1021 \cdot (200 - 20) = 18704,72 \text{ Вт.}$$

7. Мощность тепловых потерь через стенки печи

$$P_{ном3} = 0,2P_{пол}.$$

$$P_{ном3} = 0,2 \cdot 26019,24 = 5203,85 \text{ Вт.}$$

### 8. Суммарная мощность тепловых потерь

$$P_{ном} = P_{ном2} + P_{ном3}.$$

$$P_{ном} = 18704,72 + 5203,85 = 23908,57 \text{ Вт.}$$

### 9. Установленная мощность

$$P_{номр} = P_{пол} + P_{вспом} + P_{потерь}.$$

$$P_{номр} = 26019,24 + 7126,38 + 23908,57 = 57054,19 \text{ Вт.}$$

$$P_{уст} = P_{номр} k_3 = 57054,19 \cdot 1,3 = 74170,45 \text{ Вт.}$$

### 2.3.2 Инженерная методика расчета нагревателей электрических цепей

$$W = W_{ид} \alpha, \quad (2.6)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{C_{12} F_{12} C_{13} F_{13} + C_{13} F_{13} C_{32} F_{32} + C_{12} F_{12} C_{32} F_{32}}{F_1 [(1 - \gamma) C_{12} C_{13} F_{13} + C_{12} C_{32} F_{32}]}$$

При разработке инженерной методики, было установлено, что в коэффициенте  $\alpha$  из (2.6) существуют несколько практически независимых сомножителей, т.е.

$$\alpha = \alpha_{эф} \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_c \cdot \alpha_p \cdot \alpha_{рол}$$

$\alpha_{эф}$  - коэффициент эффективности излучения системы нагревателя.

$\alpha_z$  - коэффициент шага учитывает зависимость  $W$  от относительных витковых расстояний  $e/d$ ,  $e/b$ ,  $t/d$  данной системы нагревателя.

Таблица 2.4

Система нагревателя	Минимальные относительные витковые расстояния	Коэффициент $\alpha_{эф}$
Проволочный зигзаг	$e/d=2.75$	0.68
Ленточный зигзаг	$e/b=0.9$	0.4
Ленточный зигзаг в выемных рамках	$e/b=0.9$	0.34
Проволочная спираль на трубке	$t/d=2$	0.32
Проволочная спираль на полочке	$t/d=2$	0.32
Проволочная спираль на балках	$t/d=2$	0.22

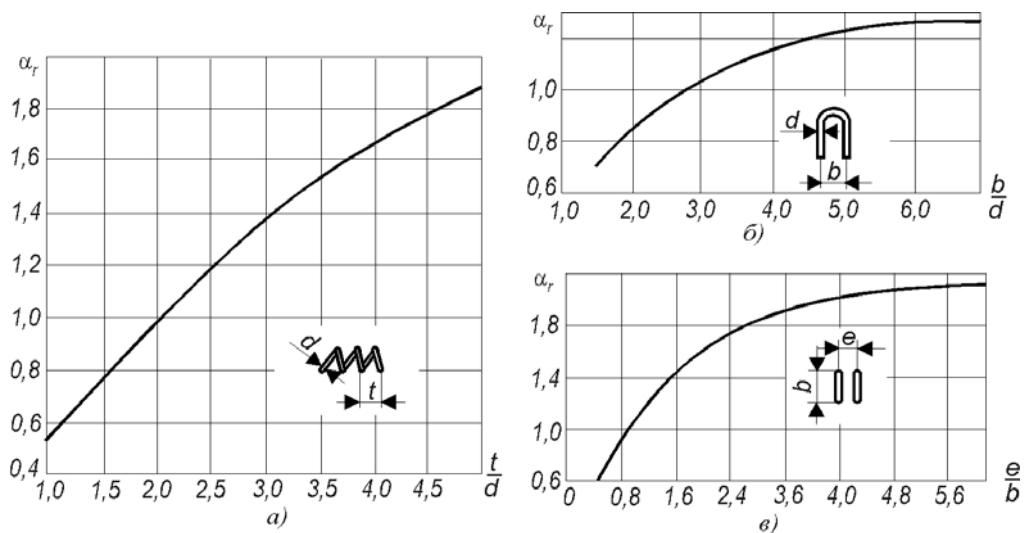


Рис. 2.34

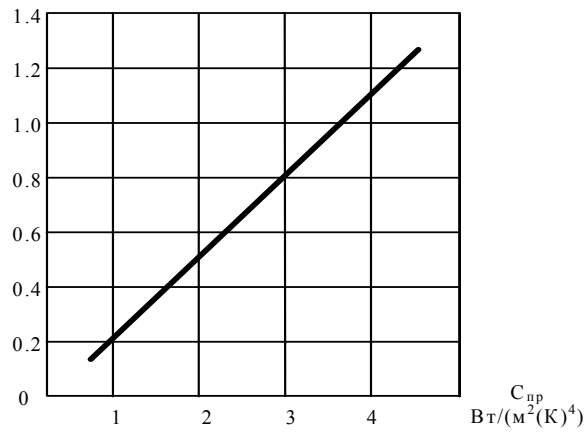


Рис.2.35

$$C_{пр} = \frac{5,67}{\frac{1}{\varepsilon_{изд}} + \frac{F_{изд}}{F_{ст}} \left( \frac{1}{\varepsilon_{и}} - 1 \right)}$$

$\alpha_p$  - коэффициент соотношения размеров садки и печи.

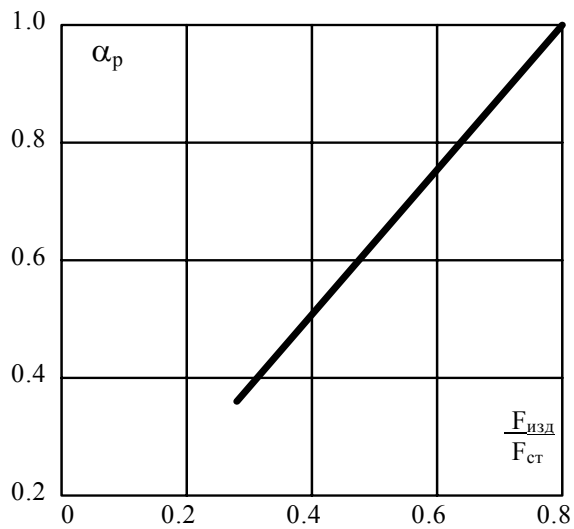


Рис.2.36.

$\alpha_{рол}$  - коэффициент, учитывающий затенение подовых нагревателей неохлаждаемыми роликами рольганговой печи.

*Итогом* прямого расчета электронагревателя является определение требуемых диаметра, длины проволоки (ленты) нагревателя, удовлетворяющих необходимой мощности одной фазоветви тепловой зоны электропечи, температуры нагреваемого изделия с обеспечением работоспособной температуры нагревателя.

Электросопротивление нагревателя (фазоветви) и удельная поверхностная мощность реального нагревателя рассчитывается по формулам

$$R = \frac{U^2}{10^3 P} = \rho \frac{l 10^6}{S} \quad (23)$$

$$W = \frac{10^3 P}{F_n} = \frac{10^3 P}{10^{-3} \Pi l} = \frac{10^6 P}{\Pi l} \quad (24)$$

Диаметр проволоки нагревателя

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^{15} \rho P^2}{\pi^2 U^2 W}}$$

Развернутая длина нагревателя

$$L_p = \frac{\pi d^2 \cdot R_r}{4 \rho_r}$$

Рассмотрим определение срока службы нагревателя.

За срок службы или технический ресурс нагревательного элемента принимается время его работы при температуре эксплуатации до увеличения электрического сопротивления на 20 %. Для никельхромовых нагревателей это соответствует уменьшению его активного сечения на 20 %, получаемому в процессе его окисления, для железохромоалюминиевых нагревателей, кроме окисления, существенную роль в уменьшении срока службы нагревателя играет снижение концентрации алюминия в поверхностном слое.

Расчетный срок службы нагревателя определяют по следующим формулам:

Для никельхромовых сплавов и железохромоалюминиевых сплавов при температуре до 1200°C

$$\tau_p = d \cdot \tau_1 \cdot \kappa_L \cdot \kappa_\kappa,$$

Для железохромоалюминиевых сплавов при температуре, большей или равной 1200°C

$$\tau_p = d^{1,9} \cdot \tau_1 \cdot K_L \cdot K_k,$$

где  $K_L$  - коэффициент длины, учитывающий снижение срока службы реального нагревателя при увеличении его длины;

$K_k$  - коэффициент конструкции, учитывающий затемнение отдельных участков нагревателя.  $K_k=1$  - для никельхромовых сплавов,  $K_k=0,82$  - нагреватель из железохромоалюминиевых сплавов (в воздушной атмосфере)

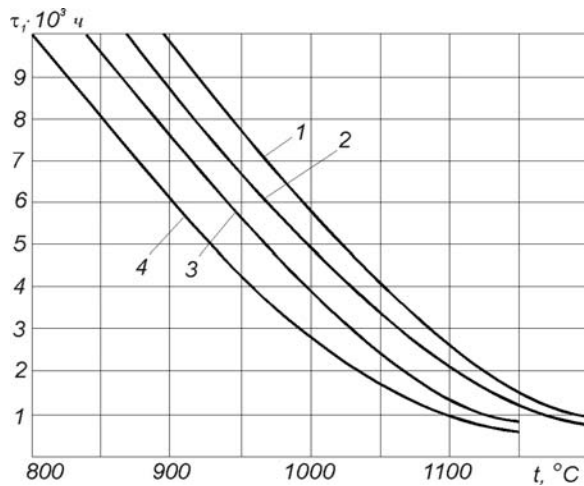


Рис.2.37Срок службы проволоки  
d - 1 мм из никельхромовых сплавов:  
1 - ХН70Ю; 2 - Х20Н80-Н; 3 -  
Х15Н6; 4 - ХН20ЮС

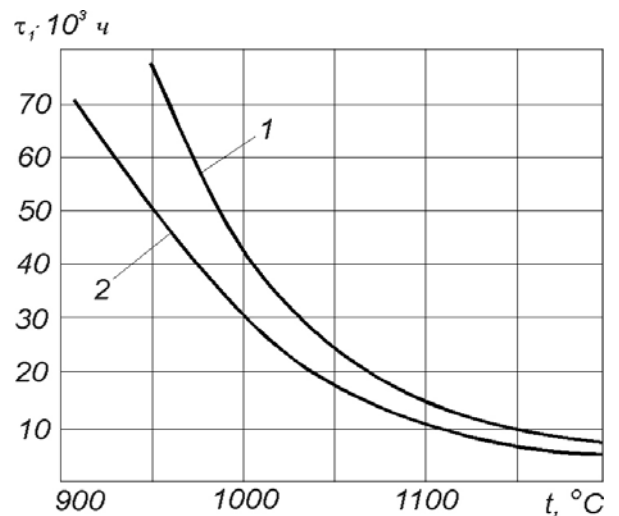


Рис.2.38Срок службы проволоки  
d - 1 мм из  
железохромоалюминиевых сплавов:  
1 - Х23Ю5Т, Х27Ю5Т; 2 -  
Х23Ю5

$L, м$	Коэффициент $K_L$		
	Менее 30	30...50	Более 50
$K_L$	1-0,005L	0,85	0,7

Рассмотрим подробнее методику электрического расчета.

Исходные данные для выбора материала нагревателя:

- 1) номинальная температура в рабочем пространстве печи  $t_p$  и конечная температура нагрева изделия  $t_{изд.кон.}$ ;
- 2) материал изделия (степень черноты  $\epsilon_{изд.}$ );
- 3) особенности технологического процесса (требования к точности поддержания температуры, среда в рабочем пространстве и т.д.);

4) размеры и форма внутреннего пространства печи, расположение загрузки и нагревателей;

5) установленная мощность печи и мощность расчетной фазо-ветви нагревателя  $P$ , кВт;

6) напряжение питающей сети  $U$  и напряжение на рассчитываемом нагревателе

7) система автоматического регулирования температуры печи (позиционное регулирование или непрерывное регулирование);

8) режимы работы печи (непрерывный или прерывистый с охлаждением печи вместе с загрузкой или во время длительных простоев).

Выбор материала нагревателя производится по рекомендуемой рабочей температуре сплава таким образом, чтобы она была примерно на  $150^{\circ}\text{C}$  больше  $t_{\text{изд.кон.}}$

Рекомендуемые и максимально допустимые температуры табл. 2.5.

Таблица 2.5

Марка сплава	Рекомендуемая рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$		Максимально допустимая температура, $^{\circ}\text{C}$	
	Непрерывный режим	Прерывистый режим	Непрерывный режим	Прерывистый режим
ХН20ЮС	850-1000	850-950	1100	1050
Х15Н60-Н	900-1025	900-975	1125	1075
ХН20Н80-Н	1000-1100	1000-1075	1200	1150
ХН70Ю	1050-1100	1050-1075	1200	1175
Х23Ю5	1050-1100	1000-1050	1200	1150
Х27Ю5Т	1150-1250	1150-1200	1350	1300
Х23Ю5Т	1300-1350	1250-1300	1400	1350

Замечание: При выборе материала следует учитывать, что железохромо - алюминидные сплавы при температуре выше  $1000^{\circ}\text{C}$  не могут работать в контакте с шамотными огнеупорами и требуют применения высокоглиноземистых материалов, например муллита.

Для проведения расчета потребуются

- удельное электрическое сопротивление сплава в горячем состоянии (при рабочей температуре)  $\rho_{\text{г}}$ , Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Алгоритм расчета параметра нагревателя

Определение удельной поверхностной мощности идеального нагревателя



По графикам рис.2.39 по принятой рабочей температуре нагревателя и температуре тепловоспринимающей поверхности

Определение допустимой удельной поверхностной мощности реального нагревателя производится по формуле:

$$W = \alpha \cdot W_{ид},$$

где  $\alpha = \alpha_{эф} \cdot \alpha_{г} \cdot \alpha_{с} \cdot \alpha_{р} \cdot \alpha_{рол}$ .

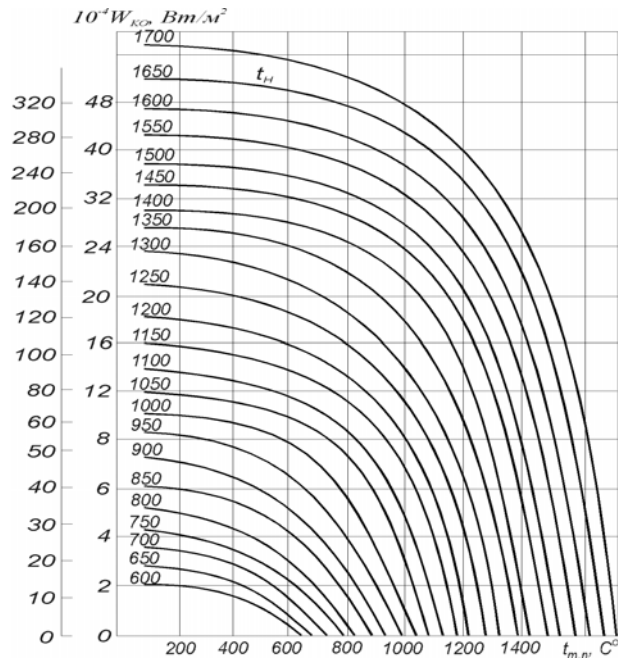


Рис.2.39. Удельная поверхностная мощность идеального нагревателя и ориентировочные мощности, размещаемые на 1 м<sup>2</sup> в зависимости от температуры нагревателя и тепловоспринимающей поверхности

Определение электрических параметров нагревателя (мощности и напряжения расчетной фазоветви).

Для этого необходимо установить количество тепловых зон в электропечи и выбрать схему соединения нагревателей зоны.

Количество тепловых зон принимается на основании общих рекомендации: в печах с высокими камерами, в шахтных и колпаковых высота зоны 1...1,5 м., в протяженных в длину и печах непрерывного действия – длина зоны 1,5...2,5 м.

В крупных печах периодического действия мощности зон могут быть приняты равными.

С точки зрения обеспечения работы нагревателей от сети 220/380 В, мощность трехфазной зоны может составлять 100...160 кВт, но не более 250 кВт.

Необходимо выделять тепловые зоны для перемещающихся частей печей, например выдвигного пода.

Маломощные зоны или печи могут быть однофазными.

Если при проектировании рассчитывалось время нагрева в печи непрерывного действия, то из этого расчета получается количество зон и их мощность.

В остальных случаях установленная мощность тепловых зон распределяется так, чтобы максимальное значение было в первой зоне у загрузочного окна, а далее мощность уменьшается в каждой следующей зоне на 10...15 %,

При питании от трехфазной сети напряжением 380/220В могут быть применены две схемы соединения нагревателей: треугольник - на нагревателе линейное напряжение 380В, звезда - фазное напряжение 220 В.

Для, однофазной зоны, как правило, принимается напряжение 220 В.

В отдельных обоснованных случаях, например для питания нагревателей маломощных зон в печах непрерывного действия, допускается применение понижающих трансформаторов.

Выбор размеров нагревателя по номограммам.

Номограммы связывают электрические и геометрические параметры нагревателя.

По мощности  $P$ , напряжению на нагревателе  $U$  и допустимой удельной поверхностной мощности  $W$  определяются диаметр  $d$  и длина проволочного нагревателя  $L$  - из никельхромовых сплавов (рис.2.40), - из железохромоалюминиевых сплавов (рис. 2.41).

С помощью номограмм можно просмотреть несколько вариантов питания нагревателя.

Выбирается нагреватель более массивный с большим сроком службы, более удобный для размещения, соответствующий предварительно выбранной конструкции (проволочный зигзаг  $d = 6,3...11$  мм, спираль  $d = 4...5,6$  мм).

Принимается стандартный диаметр проволоки: 4; 4,5; 5; 5,6; 6,3; 7; 8; 9; 10; 11; 12 мм.

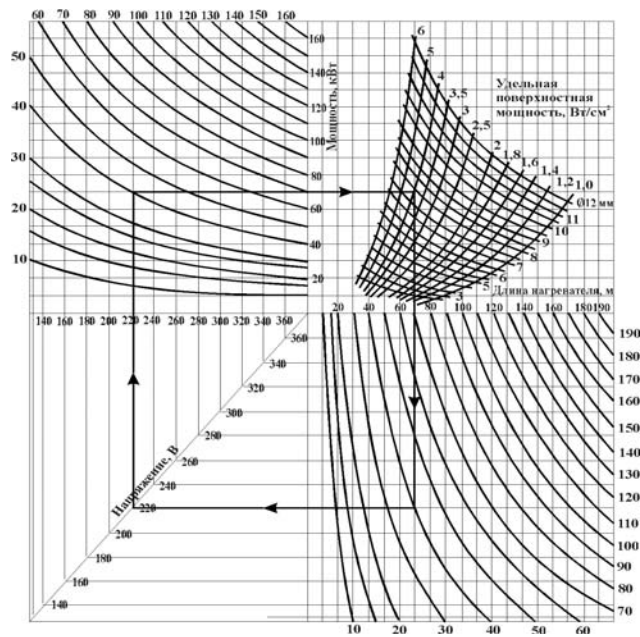


Рис. 2.40. Номограмма для расчета проволочных нагревателей из никельхромовых сплавов

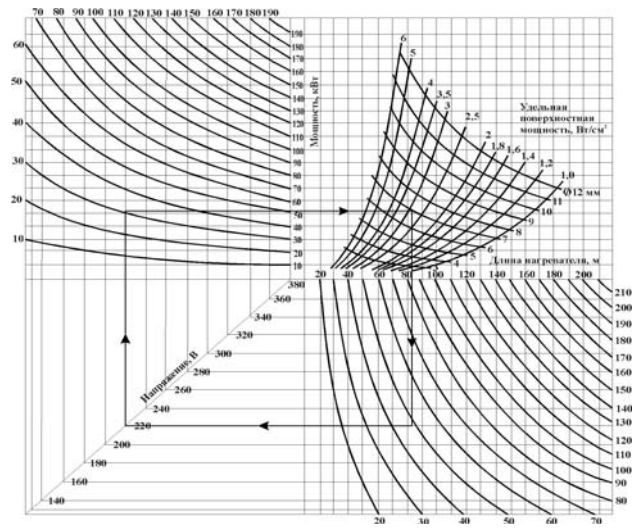


Рис. 2.41. Номограмма для расчета проволочных нагревателей из железохромоалюминиевых сплавов

Уточненный расчет параметров нагревателя  
 - сопротивление нагревателя (фазоветви)

$$R_r = \frac{U^2}{10^3 P'}$$

где  $U$  - напряжение на нагревателе, В;  
 $P$  - мощность фазы, кВт;

- развернутая длина нагревателя, м

$$L_p = \frac{\pi d^2 \cdot R_r}{4 \rho_r},$$

где  $\rho_r$  - удельное сопротивление материала при рабочей температуре, Ом.мм<sup>2</sup>/м;

- расчетная удельная поверхностная мощность

$$W_p = \frac{P \cdot 10^3}{\pi d \cdot L_p}$$

Действительная температура нагревателя  $t_n$  определяется по рис.2.7 ( $W'_{и.д.} = W_p / \alpha$ ) сравнивается с рекомендуемой температурой для данного сплава. Если  $t_n > t_{рек}$ , необходимо произвести пересчет нагревателя, изменив электрические параметры, или выбрать более жаростойкий сплав.

Определение размеров готового нагревателя и размещение его в печи

Размеры зигзагообразного нагревателя определяются по формулам:

- развернутая длина одной петли зигзага.

$$L_3 = 2(H - 2R) + 2\pi R_{cp};$$

- количество петель в нагревателе

$$n = L_p / L_3;$$

- длина готового нагревателя

$$L = nt.$$

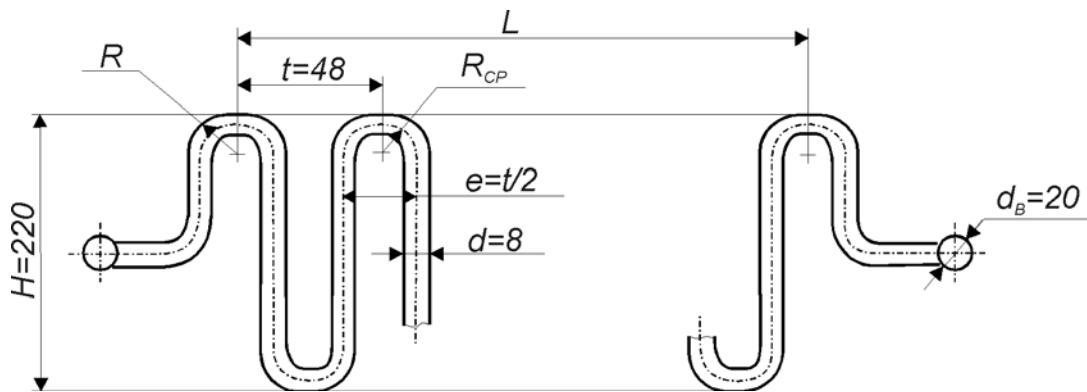


Рис.2.42. Зигзагообразный нагреватель

### 3 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ И УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

#### 3.1 Область применения и классификация. Физические основы индукционного метода нагрева

##### 3.1.1 Область применения и классификация

Под индукционным нагревом понимают нагрев тел в электромагнитном поле за счет теплового действия электрического тока, протекающего непосредственно по нагреваемому телу и возбуждаемого в нем благодаря явлению электромагнитной индукции. При этом ток в нагреваемом изделии называют индуктированным или наведенным током.

Индукционными установками называют электротермические устройства, предназначенные для индукционного нагрева или плавки тех или иных материалов. Под индукционной установкой понимают весь комплекс устройств, обеспечивающих осуществление электротермического процесса (источники питания, устройства автоматики и управления, комплектующее оборудование, токоподводы и т.д.).

Под индукционной печью понимают часть индукционной установки, включающую индуктор, каркас, камеру для нагрева или плавки, вакуумную систему, механизмы наклона печи или перемещения нагреваемых изделий и т.д.

Индукционной плавильной установкой называют индукционную установку, в которой нагреваемый материал доводится до плавления.

В индукционной нагревательной установке конечная температура нагрева всегда ниже температуры плавления материала.

Важнейшим элементом любой индукционной печи является индуктор, представляющий собой проводник или систему проводников определенной конфигурации, подключаемый к внешнему источнику переменного тока и предназначенный для бесконтактного наведения в нагреваемом изделии электрического тока, разогревающего изделие. Индуктор представляет из себя проводник в виде одно- или многовитковой катушки, поперечное сечение которой определяется размером и конфигурацией нагреваемых изделий. Изделия, помещенные в индуктор и подвергаемые нагреву, называют загрузкой.

В некоторых случаях загрузку целесообразно нагревать, возбуждая электрический ток не непосредственно в ней, а в каком – либо промежуточном устройстве. Такой вид нагрева загрузки называется косвенным индукционным нагревом, а печь для такого нагрева называется индукционной печью косвенного нагрева.

Для компенсации реактивной мощности индуктора используют силовые конденсаторы, представляющие собой отдельный конструктивный узел называемый конденсаторной батареей.

Индуктор, соединенный токоподводом с конденсаторной батареей, образует силовой колебательный контур.

### **3.1.1.1 Преимущества индукционного нагрева**

Индукционный нагрев основан на преобразовании электрической энергии в тепловую. В электромагнитном поле, создаваемое током индуктора, вносят нагреваемое тело. Благодаря явлению электромагнитной индукции в нем возникает ЭДС, под действием которой в нагреваемом изделии появляется электрический ток, который приводит к разогреву загрузки.

Индукционный метод нагрева применяется для нагрева и плавки металлов и сплавов, полупроводниковых материалов, диэлектриков, газов и т.д.

Преимущества индукционного нагрева по сравнению с другими методами нагрева заключается в следующем:

Передача электроэнергии непосредственно нагреваемое тело позволяет осуществить прямой нагрев материалов и значительно увеличить его скорость по сравнению с печами косвенного нагрева.

Максимальный уровень температур может быть высоким и ограничивается только применяемыми огнеупорными материалами.

При передаче электроэнергии в нагреваемое тело не нужны контактные устройства, что упрощает конструкцию и позволяет применить индукционный метод в условиях автоматизированного поточного производства, а также осуществлять нагрев в вакууме и защитных средах.

Благодаря явлению поверхностного эффекта на высоких частотах максимальная мощность выделяется в поверхностном слое нагреваемого изделия, и тем самым индукционный метод при закалке обеспечивает быстрый нагрев поверхности изделия, позволяя получить ее высокую твердость, при сохранении вязкой сердцевины.

В индукционных плавильных печах возникают электродинамические усилия, способствующие циркуляции расплава в общем объеме тигля. Это ускоряет процесс плавки и позволяет получить металл со стабильными и однородными свойствами.

### **3.1.1.2 Область применения индукционных установок**

Все индукционные установки делятся на три группы:

1. Установки для индукционного нагрева.
2. Установки для диэлектрического нагрева.
3. Индукционные плавильные установки.

На установках для индукционного нагрева выполняют: сквозной нагрев под пластическую деформацию и под термообработку; поверхностную закалку, сварку, пайку и т.д.

На установках для диэлектрического нагрева осуществляют сушку древесины; склейку полимеров; подогрев изделий перед формованием; подогрев пищевых продуктов и др.

Индукционные плавильные установки делятся на индукционные канальные печи; индукционные тигельные печи; индукционные вакуумные печи; индукционные печи с холодным тиглем и т.д. Наибольшее распространение в промышленности получили канальные и тигельные печи.

В зависимости от организации режима нагрева во времени различают индукционные установки:

1. периодического действия, в которых загрузка нагревается от начальной до конечной температуры, оставаясь неподвижной относительно индуктора;
2. полунепрерывного действия;
3. непрерывного действия (методические установки), в которых загрузка нагревается до заданной температуры по мере ее перемещения относительно индуктора.

По частоте питающего тока индукционные установки разделяются на:

1. Установки промышленной частоты, питающиеся от сети 50 Гц непосредственно, или через специальные понизительные трансформаторы;

2. Установки средней или повышенной частоты (150 – 10000 Гц), питающиеся от электромагнитных или статических преобразователей частоты;

3. Высокочастотные установки, питающиеся от ламповых генераторов, работают на частотах от 20000 Гц до нескольких мегагерц.

### 3.1.2 Физические основы индукционного нагрева и электроконтактного нагрева

Метод индукционного нагрева основан на использовании ряда законов и явлений, таких как:

- закон электромагнитной индукции;
- поверхностный эффект;
- эффект близости;
- кольцевой эффект;
- эффект паза;
- изменение физических свойств нагреваемого тела в процессе нагрева.

При реализации электроконтактного нагрева на переменном токе также используются знания о поведении электрических и энергетических характеристик металлических нагревательных изделий разной формы влиянием перечисленных явлений и эффектов.

Прежде чем рассматривать эти законы и явления, напомним основные понятия и определения, принимаемые в теории электромагнитного поля.

*Электромагнитное поле* – основной вид материи, отличающийся непрерывным распределением в пространстве, характеризующийся способностью распространения в вакууме со скоростью света, и оказывающий силовое воздействие на заряженные частицы и проводники с током.

Всякое электромагнитное явление характеризуется двумя сторонами – электрической и магнитной.

*Электрическим полем* называют одну из сторон электромагнитного поля, обусловленную наличием электрических зарядов или изменением магнитного поля и оказывающую силовое воздействие на неподвижные заряженные частицы. Физическая величина, характеризующая интенсивность электрического поля в какой – либо точке, называется напряженностью электрического поля  $E \left[ \frac{Vm}{m} \right]$ . Напряженность электрического поля является

причиной возникновения электрического тока в нагрузке, помещенной в переменное электромагнитное поле. В зависимости от материала нагрузки и



скорости изменения электромагнитного поля в нагрузке появляются ток проводимости, ток переноса или ток электрического смещения.

Плотность тока проводимости, преобладающая в электропроводных материалах, определяется законом Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{\delta} = \gamma \cdot E,$$

где  $\omega = \gamma$  - удельная электрическая проводимость.

*Магнитным полем* называют одну из сторон электромагнитного поля, обусловленную движением заряженных частиц или изменением электрического поля и оказывающую силовое воздействие на движущиеся заряженные частицы или проводник с током. При этом вектор силы перпендикулярен к направлению перемещения заряда или направлению тока в проводнике.

Физическая величина, характеризующая интенсивность магнитного поля в каждой точке называется магнитной индукцией  $B$ . Она изображается вектором имеющим направление, перпендикулярное к направлению перемещения заряда  $q$  или тока  $i$  протекающему по проводнику длиной  $l$  и к направлению силы  $\vec{F}$ , действующий на этот заряд:

$$B = \frac{F}{i \cdot l}.$$

Поток вектора магнитной индукции через некоторую поверхность  $S$  называют магнитным потоком через эту поверхность:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B \cdot \cos \beta \cdot dS$$

где  $\beta$  - угол между направлением вектора  $\vec{B}$  и нормалью к площадке  $d\vec{S}$ .

Таким образом магнитная индукция характеризует плотность магнитного потока в данной точке поля. Линиями магнитной индукции называют линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором  $\vec{B}$ .

Магнитный поток в отличие от магнитной индукции является скаляром. Единицей измерения магнитного потока является Вебер [Вб], а магнитной индукции тесла [Тл].  $Tл = \frac{Вб}{м^2}$ .

Принцип непрерывности магнитного потока гласит, что линии магнитной индукции не имеют ни начала ни конца – они всюду

непрерывны. Математическая запись принципа непрерывности имеет следующий вид:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

магнитный поток сквозь замкнутую поверхность равен нулю.

### 3.1.2.1 Характеристики электрического поля

*Напряженность электрического поля*  $\vec{E}$  - физическая величина, характеризующая интенсивность электрического поля в любой точке. Напряженность электрического поля является причиной возникновения электрического тока в телах, находящихся в переменном электромагнитном поле. Напряженность электрического поля - это векторная функция. В зависимости от физических свойств тела и частоты изменения электромагнитного поля в теле появляются ток проводимости, ток переноса или ток электрического смещения. Например, в электропроводящих металлах ток переноса отсутствует, а ток проводимости значительно (на несколько порядков) превосходит ток смещения, при нагреве же диэлектрических материалов отсутствует ток проводимости, а присутствует ток смещения.

В изотропной электропроводящей среде (например, металле), имеющей одинаковые физические свойства во всех направлениях, вектор плотности тока проводимости  $\vec{J}$  совпадает по направлению с вектором напряженности электрического поля  $\vec{E}$ .

**Для такого случая плотность тока проводимости можно определить по закону Ома в дифференциальной форме:**

$$\vec{J} = \gamma \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho},$$

где  $\gamma$  - удельная электрическая проводимость, 1/(Ом·м);  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление, Ом·м;  $\vec{E}$  - напряженность электрического поля, В/м.

### 3.1.2.2 Характеристики магнитного поля

*Магнитная индукция*  $\vec{B}$  - физическая величина, характеризующая интенсивность магнитного поля в любой точке. Магнитная индукция –

векторная величина. Модуль вектора магнитной индукции  $\bar{B}$  равен отношению модуля силы  $dF$ , действующей со стороны магнитного поля на малый элемент проводника с током, к произведению силы тока  $I$  на длину элемента  $dl$ , если этот элемент ориентирован в пространстве так, что отношение  $dF/dl$  максимально:

$$B = \frac{dF}{Idl}.$$

Направление вектора магнитной индукции определяется в соответствии с рис. 3.1.

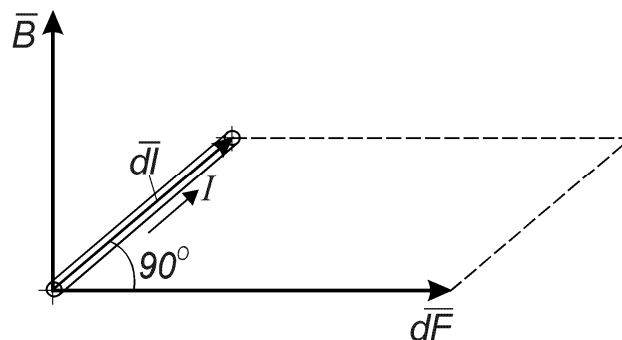


Рис. 3.1 Определение вектора магнитной индукции в проводнике

Поток вектора магнитной индукции  $\bar{B}$  через некоторую поверхность  $S$  называют магнитным потоком  $\Phi$  через эту поверхность, который рассчитывается по формуле

$$\Phi = \int_S \bar{B} d\bar{S} = \int_S B \cos \beta dS,$$

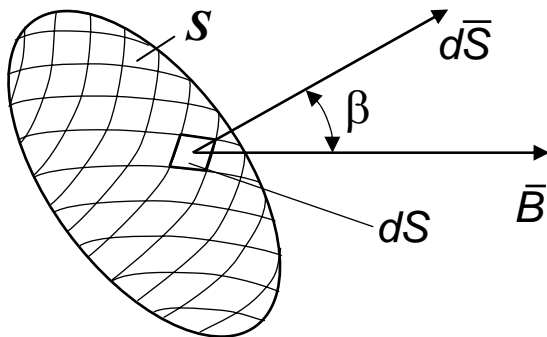


Рис. 3.2. Определение магнитного потока  $\Phi$  через поверхность  $S$

где  $\beta$  - угол между направлениями вектора магнитной индукции  $\bar{B}$  и нормалью к элементарной площадке  $d\bar{S}$ . Расположение векторов  $\bar{B}$  и  $d\bar{S}$  представлено на рис. 3.2.

Магнитный поток в отличие от магнитной индукции является скалярной величиной. Единица измерения магнитного потока в

системе СИ - Вебер (Вб), а магнитной индукции - Тесла (Т), равной Вб/м<sup>2</sup>.

*Принцип непрерывности магнитного потока:* линии магнитной индукции (магнитные силовые линии)- непрерывны, т.е. замкнуты.

Иллюстрация принципа непрерывности приведена нарис. 3.3.

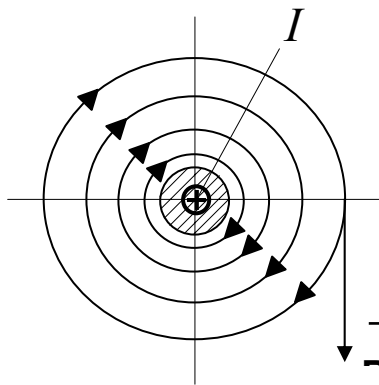


Рис. 3.3. Поле магнитной индукции  $\vec{B}$  от проводника с током  $I$

Математическая запись принципа непрерывности магнитного потока определяется выражением

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0,$$

**т.е. магнитный поток сквозь замкнутую поверхность равен нулю. Примером такой поверхности может служить шар.**

### 3.1.2.3 Закон полного тока

Рассмотрим виток проводника с током (см. рис. 3.4). Он окружен магнитным полем с замкнутыми магнитными линиями вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ . Обходя виток по некоторому замкнутому контуру  $l$ , не лежащему в плоскости витка, вычислим линейный интеграл магнитной индукции  $\vec{B}$  вдоль этого контура.

Оказывается, что этот интеграл пропорционален силе тока, протекающей в проводнике

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \oint_l B \cos \alpha dl = \mu I,$$

где  $l$  - длина контура интегрирования;  $\alpha$  - угол между вектором магнитной индукции и линии, касательной к контуру интегрирования;  $\mu = \mu_r \mu_0$  - абсолютная магнитная проницаемость среды, окружающей виток;  $\mu_r$  - относительная магнитная проницаемость;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  - магнитная постоянная, Гн/м.

Если контур интегрирования будет охватывать несколько витков с током  $I_1, I_2, \dots, I_n$ , то линейный интеграл магнитной индукции будет равен

$$\oint_l \vec{B} dl = \mu (I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n).$$

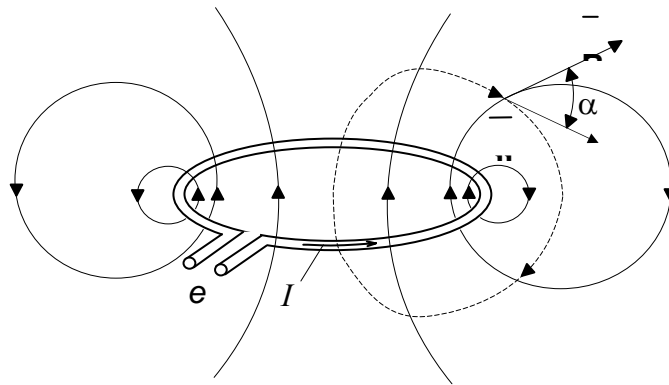


Рис. 3.4. Связь магнитного поля  $B$  с электрическим током  $I$  произвольного контура

Если токи в витках равны  $I$ , то линейный интеграл магнитной индукции равен

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu W I,$$

где  $W$  - число витков.

На практике при расчетах магнитных полей часто пользуются не

величиной магнитной индукции  $\vec{B}$ , а другой характеристикой - напряженностью магнитного поля  $\vec{H}$ .

Вектор напряженности магнитного поля равен

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r}.$$

Размерность напряженности магнитного поля в системе СИ - А/м.

С введением напряженности магнитного поля закон полного тока может быть сформулирован следующим образом: линейный интеграл напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  вдоль замкнутого контура  $l$  равен электрическому току, охватываемому этим контуром:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = WI.$$

### 3.1.2.4 Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея-Максвелла-Ленца)

Закон электромагнитной индукции характеризует возникновение электродвижущей силы в проводнике, движущемся в постоянном магнитном поле, или в замкнутом проводящем контуре вследствие движения контура или изменения самого поля.

В 1831 году Майкл Фарадей обнаружил принцип электромагнитной индукции, исследуя влияние изменения тока в одной катушке ( $W_1$ ) на возникновение тока в другой ( $W_2$ ). Иллюстрация данного опыта приведена нарис. 3.5.

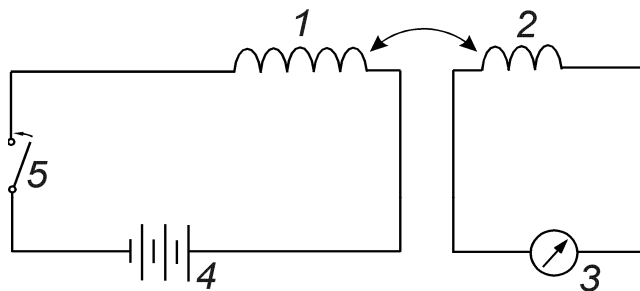


Рис. 2.5. Иллюстрация опыта Фарадея:

1 - катушка с числом витков  $W_1$ ; 2 - катушка с числом витков  $W_2$ ;

3 - гальванометр; 4 - гальваническая батарея; 5 – ключ

Закон электромагнитной индукции гласит: при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего какой-либо контур, в контуре

наводится электродвижущая сила (ЭДС)  $e$ .

Наведенная ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, сцепленного с контуром

$$e = - \frac{d\Phi}{d\tau},$$

где  $e$ ,  $\Phi$ ,  $\tau$  - мгновенные значения ЭДС, магнитного потока и времени.

*Частные случаи электромагнитной индукции.*

*Взаимная индукция* - явление возбуждения ЭДС в одной электрической цепи (или проводящем теле) при изменении электрического тока в другой цепи (или помещении проводника в переменное электромагнитное поле).

*Самоиндукция* - наведение ЭДС в электрической цепи при протекании в ней переменного электрического тока (или наведение ЭДС в проводящем теле, протекающим в нем переменным электрическим током проводимости).

Направление индуцированного тока, возникающего вследствие явления электромагнитной индукции, определяется правилом Ленца: индуцированный ток всегда имеет такое направление, при котором его собственное магнитное поле противодействует изменению магнитного поля, вызывающего возникновение индуцированного тока.

### 3.1.2.5 Закон Джоуля-Ленца

Под действием ЭДС происходит перемещение зарядов  $q$ . Для перемещения заряда  $q$  необходимо затратить энергию

$$Q = qU,$$

где  $U$  - разность потенциалов на пути перемещения зарядов.

Энергия, затрачиваемая в единицу времени, определяет требуемую мощность

$$P = \frac{q}{\tau} U = IU,$$

где  $\tau$  - время, за которое происходило перемещение зарядов.

Если вторичная цепь - нагреваемое металлическое тело, то нас, прежде всего, будет интересовать мощность, выделяемая в металле, которая в общем случае может иметь неравномерное распределение по толщине тела.

Получим закон Джоуля-Ленца, характеризующий удельную мощность,

выделяемую в элементарном объеме нагреваемого тела. Разность потенциалов на пути  $dl$  движения зарядов и силу тока в элементарном сечении  $dS$  можно определить по формулам

$$dU = Edl, \quad dI = JdS,$$

тогда мощность, затрачиваемая на перемещение зарядов, будет равна

$$dP = dIdU = JdSEdl = JEdV,$$

т.е. в единице объема мощность равна

$$q_v = \frac{dP}{dV} = EJ.$$

Используя закон Ома в дифференциальной форме

$$J = \gamma E \quad \text{или} \quad E = \rho J,$$

**можно получить следующие выражения для мощности внутренних источников тепла в дифференциальной форме**

$$q_v = EJ = \gamma E^2; \quad q_v = EJ = \rho J^2.$$

### 3.1.3 Поверхностный эффект в проводниках

#### 3.1.3.1 Поверхностный эффект в цилиндрическом проводнике

**Поверхностный эффект – это неравномерное распределение плотности переменного электрического тока по сечению проводника или магнитного потока по сечению магнитопровода. Плотность тока в проводнике или магнитный поток в магнитопроводе уменьшаются в направлении от их поверхности к центральной части.**

При протекании через проводник постоянного тока плотность тока постоянна по сечению и определяется по формуле

$$J = \frac{I}{S},$$

где  $I$  - ток, протекающий в проводнике, А;  $S$  - поперечное сечение проводника, м<sup>2</sup>.



Иная картина наблюдается при протекании переменного тока. Для наглядности построим ее графическое изображение нарис. 3.6.

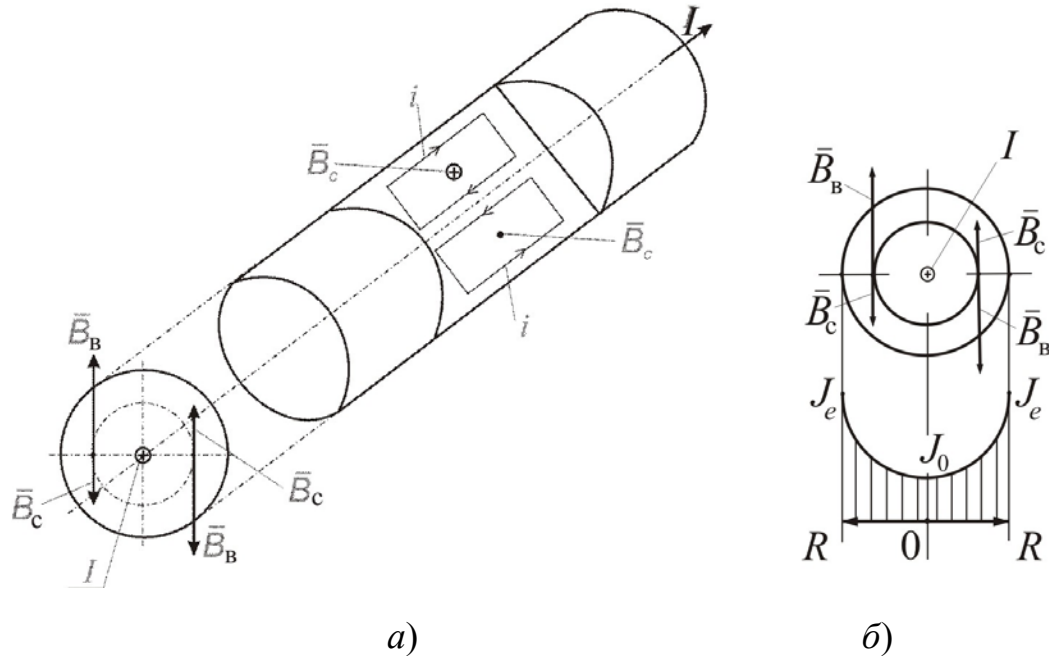


Рис. 2.6. Явление поверхностного эффекта в цилиндрическом проводнике

Пусть по бесконечному металлическому цилиндрическому проводнику протекает переменный ток  $I$ . Тогда направление линий магнитного поля (магнитной индукции), созданного током  $I$ , может быть определено по правилу правого винта. Обозначим такую внешнюю магнитную индукцию этого поля через  $\bar{B}_g$ .

Переменное магнитное поле  $\bar{B}_g$  индуцирует в проводнике вихревой ток  $i$ . Вихревой ток  $i$  создает собственное магнитное поле, характеризуемое вектором магнитной индукции  $\bar{B}_c$ . Согласно правилу Ленца, магнитное поле  $\bar{B}_c$  должно противодействовать процессу, создавшему его. То есть направление вектора магнитной индукции  $\bar{B}_c$ , формируемой током  $i$ , должно быть противоположно вектору магнитной индукции  $\bar{B}_g$ , созданной током  $I$ . Направление контура вихревого тока  $i$ , охватывающего линии магнитной индукции  $\bar{B}_c$ , также подчиняется закону правого винта. Поэтому, согласно изложенной физической картине, наводимые в проводнике вихревые токи  $i$  усиливают суммарную величину тока у поверхности проводника и ослабляют его в центральной части проводника, что создает неравномерное распределение плотности тока, качественное изменение которого приведено

нарис. 1.6.

### 3.1.3.2 Глубина проникновения электромагнитной волны

При ярко выраженном поверхностном эффекте уменьшение плотности тока вглубь проводника происходит по экспоненциальному закону вида

$$J = J_e e^{-\frac{y}{\delta}}, \quad (3.1)$$

где  $J$  - плотность тока на расстоянии  $y$  от поверхности проводника,  $A/m^2$ ;  $J_e$  - плотность тока на поверхности проводника,  $A/m^2$ ;  $\delta$  - некоторая величина, имеющая размерность длины, характеризующая степень затухания электромагнитного поля в проводнике и называемая глубиной проникновения электромагнитной волны, м.

Из теории электромагнитного поля известно следующее выражение для расчета глубины проникновения электромагнитной волны в однородной проводящей среде

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}, \text{ м}, \quad (3.2)$$

где  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота электромагнитного поля, рад/с;  $\gamma = \frac{1}{\rho}$  - удельная электропроводимость материала проводника,  $1/(Om \cdot m)$ ;  $\rho$  - удельное электросопротивление материала проводника,  $Om/m$ .

Подставим в формулу (3.2) величины

$$\gamma = \frac{1}{\rho}; \quad \omega = 2\pi f, \quad \mu = \mu_0 \mu_r, \quad \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, \text{ Гн/м},$$

**где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость.**

**После преобразований получим выражение для определения глубины проникновения в более удобной форме**

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}, \text{ м}.$$

Из формулы, характеризующей распределение плотности тока, следует, что под глубиной проникновения будем понимать такое расстояние по

нормали от поверхности проводника, на котором плотность тока в плоском проводнике уменьшается в  $e = 2,718$  раз по сравнению с плотностью тока на поверхности.

Определим, какая часть мощности выделяется в слое, равном глубине проникновения. С этой целью рассмотрим полубесконечное металлическое тело, на поверхность которого падает электромагнитная волна. Направим внутрь проводника координату  $y$ , а координаты  $x, z$  - по его внешней поверхности (см.рис. 3.7).

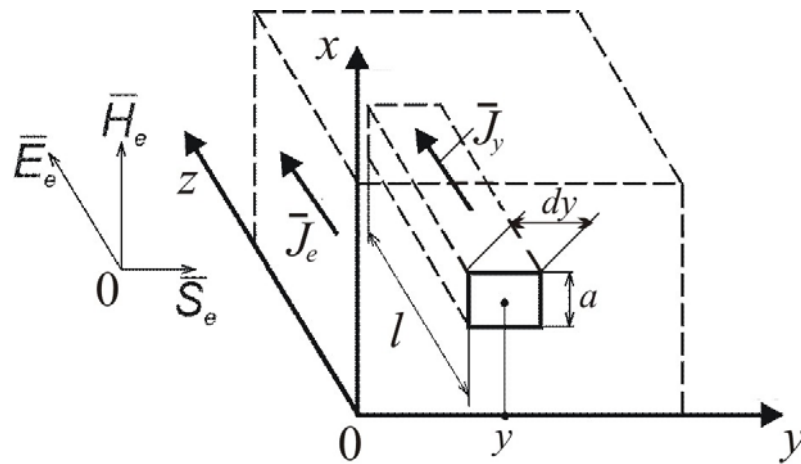


Рис. 3.7. К определению мощности в слое  $\delta$

Выделим на расстоянии  $y$  от поверхности тела  $xoz$  элементарную площадку, нормальную к вектору плотности тока  $\bar{J}$ , высотой  $a$ , шириной  $dy$ . Полагаем, что модуль плотности тока  $\bar{J}$  в пределах  $dy$  постоянен и определяется по формуле (3.1). Мощность в элементарном параллелепипеде, ограниченном высотой  $a$ , шириной  $dy$  и длиной  $l$ , равна

$$dP = (dI)^2 dr,$$

где  $dI = JdS_n = Jady$  - действующее значение тока, протекающего по элементарному проводнику (параллелепипеду), А;  $dS_n$  - площадь поперечного сечения элементарного проводника,  $m^2$ ;  $dr$  - электрическое активное сопротивление элементарного проводника (параллелепипеда);

$$dr = \rho \frac{l}{ady}, \text{ Ом.}$$

Тогда активная мощность в элементарном параллелепипеде может быть рассчитана по выражению

$$dP = (J)^2 a \rho l dy = (J_e)^2 e^{-\frac{2y}{\delta}} a \rho l dy. \quad (3.3)$$

Полная активная мощность, выделяемая в нагреваемом теле, может быть получена из выражения (3.3) посредством его интегрирования от 0 до  $\infty$  по координате  $y$

$$P_a = \int_0^{\infty} J_e^2 e^{-\frac{2y}{\delta}} a \rho l dy = J_e^2 \frac{a \rho l \delta}{2}. \quad (3.3a)$$

Для того, чтобы вычислить мощность, выделяемую в слое толщиной, равной глубине проникновения электромагнитной волны  $\delta$ , необходимо в выражении (3.3a) верхний предел интегрирования ограничить значением, равным глубине проникновения  $\delta$ . Тогда мощность, выделяемая в таком слое, будет определяться по формуле

$$P_{a\delta} = \int_0^{\delta} J_e^2 e^{-\frac{2y}{\delta}} a \rho l dy = J_e^2 \frac{a \rho l \delta}{2} (1 - e^{-2}) = 0,865 J_e^2 \frac{a \rho l \delta}{2}.$$

Отношение мощности, выделяемой в слое, толщиной, равной глубине проникновения электромагнитной волны, к полной активной мощности, выделяемой в проводящем полубесконечном теле, будет равно

$$\frac{P_{a\delta}}{P_a} = 0,865,$$

т.е. в слое толщиной, равной глубине проникновения электромагнитной волны, выделяется 86,5 % активной мощности, получаемой полубесконечным проводящим телом. Такое отношение получается при экспоненциальном распределении плотности тока  $J$  по толщине тела.

### 3.1.3.3 Активный слой

При экспоненциальном распределении плотности тока по толщине нагреваемого тела возникает ряд затруднений при исследовании его теплового состояния. В инженерной практике индукционного и электроконтактного нагрева часто приходится принимать оперативные

решения по расчету теплового состояния нагреваемого тела, для которого требуются достаточно простые аналитические зависимости температуры тела от времени его нагрева и мощности, выделяемой в нем. Такие выражения получаются в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности с внутренними источниками, которое при экспоненциальном распределении мощности внутренних источников по толщине нагреваемого тела имеет сложное аналитическое решение, требующее применение методов численного моделирования. Это с одной стороны.

С другой - инженерный расчет таких электрических интегральных параметров, как активное  $r$ , реактивное  $x$  и полное сопротивление  $z$  нагреваемого изделия, также сложен при условии экспоненциальной зависимости напряженности магнитного и электрического полей по толщине нагреваемого тела, особенно для случая падения электромагнитной волны на 2-хслойное тело (которое соответствует режиму нагрева ферромагнитного тела выше температуры магнитных превращений).

В связи с изложенным, для практических расчетов реальное распределение плотности тока в нагреваемом теле заменяется некоторым более простым распределением, которое позволило бы получить достаточно простое аналитическое решение теплового состояния тела (температурное поле по его сечению в любой момент времени), а также рассчитать интегральные электрические сопротивления нагреваемого изделия: активное  $r$ , реактивное  $x$  и полное  $z$ .

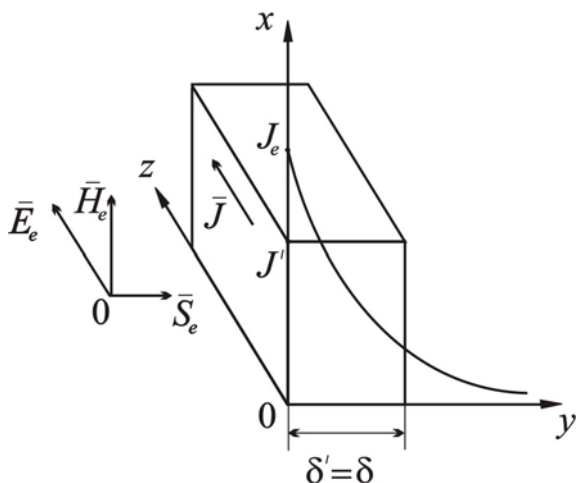


Рис. 3.8. Активный слой

При такой искусственной замене считают, что плотность  $J'$  тока, протекающего в активном слое конечной толщины  $\delta'$ , распределяется равномерно, а в остальной части сечения изделия ток принимается равным нулю (см. рис. 3.8). Толщина слоя  $\delta'$  и действующее значение плотности тока  $J'$ , определяются при соблюдении условия равенства активной мощности, выделяемой в проводнике при экспоненциальном распределении плотности тока, и активной мощности, выделяемой в

эквивалентном активном слое.

Оценим мощность, выделяемую в активном слое, и установим, каково может быть соотношение между толщиной активного слоя  $\delta'$  и глубиной проникновения электромагнитной волны  $\delta$ , плотностью тока в эквивалентном активном слое  $J'$  и плотностью тока на поверхности  $J_e$  при

экспоненциальном ее распределении по сечению проводника. Мощность в слое длиной  $l$ , высотой  $a$ , шириной  $\delta'$  при равномерном распределении плотности тока  $J'$  равна

$$P_{a\delta'} = (I_{\delta'})^2 r_{\delta'},$$

где  $I_{\delta'}$ ,  $P_{a\delta'}$  - значения тока, протекающего в эквивалентном поверхностном слое и активное сопротивление этого токонесущего слоя. За пределами токонесущего слоя ( $y > \delta'$ ) ток равен  $I = 0$ . Тогда мощность, выделяемая в активном слое, равна

$$P_{a\delta'} = (J'a\delta')^2 \rho \frac{l}{a\delta'} = (J')^2 a\rho l\delta'.$$

По определению активного слоя активная мощность  $P_{a\delta'}$ , выделяемая в активном слое, должна быть равна активной мощности  $P_a$ , выделяемой в нагреваемом теле при экспоненциальном распределении плотности тока по его сечению, т.е.  $P_{a\delta'} = P_a$ , или

$$(J')^2 a\rho l\delta' = J_e^2 \frac{a\rho l\delta}{2}$$

или

$$\frac{J_e^2}{2} \delta = (J')^2 \delta'.$$

В этом равенстве существует два неизвестных параметра  $J'$  и  $\delta'$ . Так как толщина активного слоя  $\delta'$  вводится нами искусственно для упрощения инженерных расчетов, поэтому мы вправе выбрать такое ее значение, чтобы оно равнялось глубине проникновения электромагнитной волны  $\delta$ . Тогда плотность тока на поверхности изделия при экспоненциальном ее распределении и плотность тока эквивалентного активного слоя будут связаны выражением  $J_e = \sqrt{2}J'$ . Еще раз обращаем внимание: понятие толщины активного слоя  $\delta'$  и плотности тока в активном слое  $J'$  вводится в результате искусственной инженерной операции.

### 3.1.3.4 Эффект близости

Эффект близости представляет собой разновидность поверхностного эффекта и заключается в перераспределении плотности тока в определенных

зонах проводника в результате суммарного взаимодействия электромагнитных полей, создаваемых всеми проводниками с током, входящими в рассматриваемую систему.

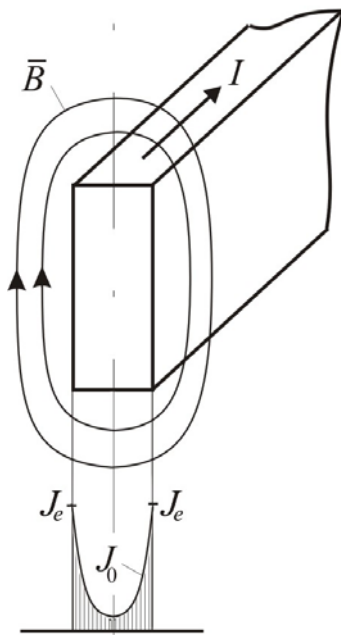
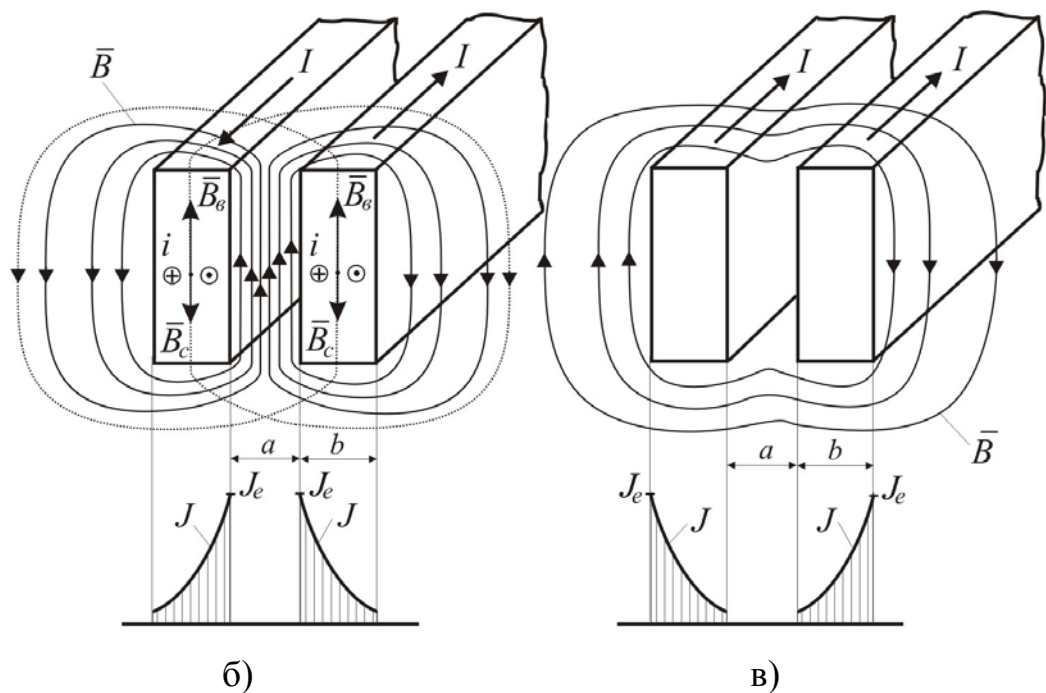


Рис. 3.9, а.

Поверхностный эффект в одиночном проводнике

В отдельно взятом проводнике переменный ток распределяется неравномерно по сечению (по толщине, ширине или радиусу) и равномерно по поверхности (периметру), рис. 3.9 а. При прохождении переменного тока по двум проводникам, находящимся на близком расстоянии друг от друга, происходит перераспределение плотности тока в каждом из них.

Если токи в проводниках протекают в противоположных направлениях (когда разность фаз токов равна  $180^\circ$ ), то наибольшая плотность тока будет сосредоточена на сторонах, обращенных друг к другу (рис. 3.9 б). Если токи в проводниках имеют одинаковое направление (разность фаз токов равна  $0^\circ$ ), то наибольшая плотность тока будет на удаленных сторонах проводников (рис. 3.9 в).



б)

в)

Рис. 3.9, б, в. Эффект близости

Для объяснения данного явления воспользуемся методическим подходом, применяемым для пояснений к поверхностному эффекту.

Перераспределение плотности тока в одном из проводников вызвано влиянием магнитного поля, созданного током другого проводника.

Рассмотрим случай встречно направленных токов (рис. 3.9 б). Магнитное поле, созданное током, протекающим в правом проводнике, пронизывает левый проводник в направлении, характеризуемом вектором индукции магнитного поля  $\vec{B}_e$ . Данное магнитное поле, являясь внешним для левого проводника, в силу закона электромагнитной индукции наводит в нем электродвижущую силу (ЭДС), под действием которой в проводнике формируется индуцированный вихревой ток  $i$ , направление которого определяется правилом Ленца. По правилу Ленца наведенный вихревой ток имеет такое направление, при котором его собственное магнитное поле  $\vec{B}_c$  всегда противодействует внешнему магнитному полю  $\vec{B}_e$ , вызвавшему его.

Таким образом, в левом проводнике наводится вихревой ток  $i$ , замыкающийся вокруг линий внешнего магнитного поля, усиливая ток  $I$  у поверхности, обращенной ко второму проводнику, и уменьшая его у поверхности, удаленной от него.

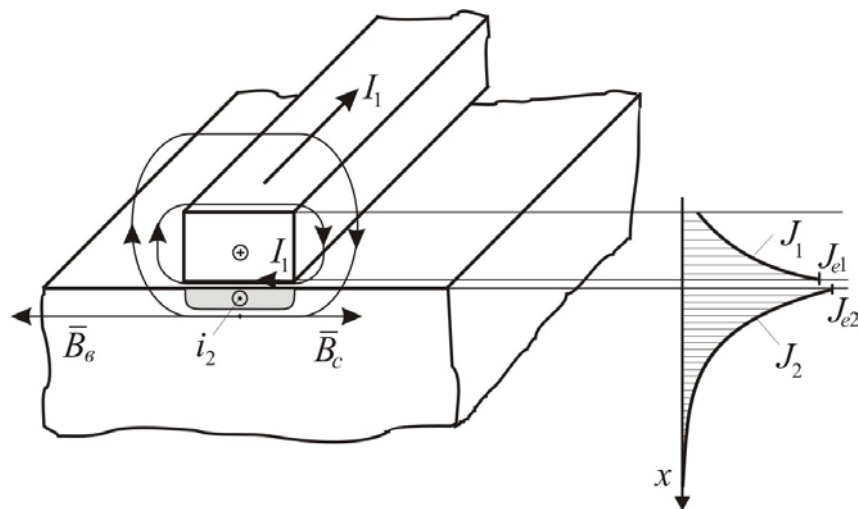


Рис. 3.9, г. Эффект близости

Рассуждая аналогично, можно показать, что во втором (правом) проводнике направление вихревого тока  $i$  будет совпадать с направлением (или фазой) тока  $I$  у поверхности, обращенной к левому проводнику, и будет встречно у поверхности, удаленной от левого проводника.

Аналогичным образом можно объяснить перераспределение плотности тока, получаемое при одинаковом направлении токов в проводниках (рис. 3.9 в).



При рассмотрении токонесущего проводника у поверхности электропроводного тела, по которому первоначально ток не протекает (случай индукционной поверхностной закалки стальных изделий), проводящее тело пронизывается внешним магнитным полем, созданным током  $I_1$  и характеризуемым вектором магнитной индукции  $\vec{B}_e$ . Переменное внешнее магнитное поле создает в электропроводящем теле ЭДС, появление которой наводит вихревой ток  $i_2$ , направление которого определяется правилом Ленца.

По правилу Ленца собственное магнитное поле  $\vec{B}_c$  вихревого тока должно противодействовать внешнему магнитному полю  $\vec{B}_e$ . Тогда, по правилу правого буравчика (правого винта) направление вихревого тока  $i_2$ , наведенного в проводящем теле, должно быть противоположным направлению тока  $I_1$  в токоведущем проводнике. Таким образом, фаза тока, протекающего в токоведущем проводнике (например, плоском индукторе), и фаза вихревого тока, индуцированного в проводящем теле (например, нагреваемом изделии), отличаются на  $180^\circ$ . Как в токоведущем проводнике – индукторе, так и нагреваемом теле получается неравномерное распределение плотности тока, соответствующее эффекту близости по варианту направления токов в двух параллельных проводниках (рис. 1.9 в), когда максимум плотности тока находится на поверхностях индуктора и нагреваемого тела, обращенных друг к другу.

Эффект близости проявляется тем сильнее, чем ближе проводники будут находиться друг к другу (т.е., чем больше отношение  $b/a$  на рис. 1.9.б) и чем сильнее проявляется поверхностный эффект (т.е., чем больше отношение толщины проводника к глубине проникновения).

### 3.1.3.5 Эффект кольцевой

Если прямолинейный проводник свернуть в кольцо, или спираль, и пропустить через него переменный ток, то наибольшая плотность тока будет на внутренней поверхности кольца или спирали (см. рис. 3.10 а, б). Это явление называется кольцевым, или катушечным, эффектом, являющимся также разновидностью поверхностного эффекта. Наличие такого неравномерного распределения можно объяснить асимметрией магнитного поля кольцевого витка или соленоида, относительно тела проводника, их образующего. Во внутренней полости кольца магнитное поле намного сильнее, чем снаружи, поэтому основная часть электромагнитной энергии поступает в проводник через его поверхность, обращенную внутрь кольца (или соленоида).

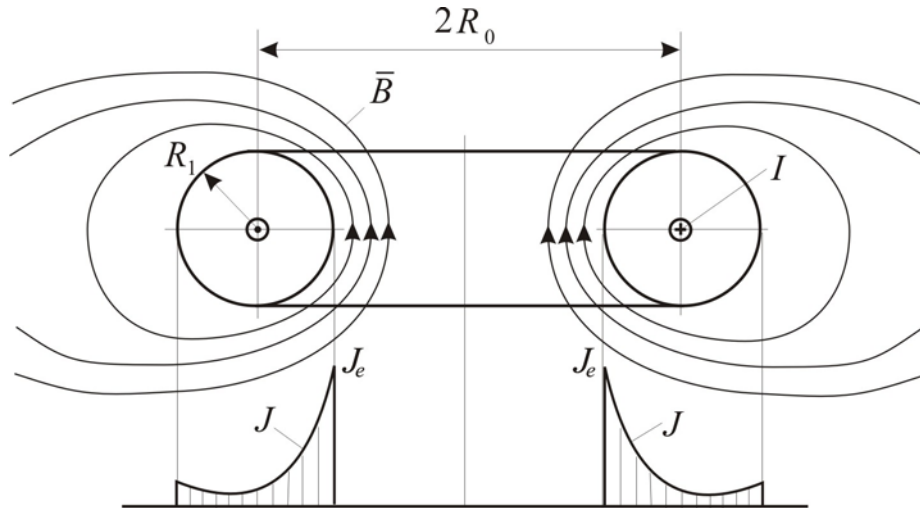


Рис. 3.10, а. Эффект кольцевой

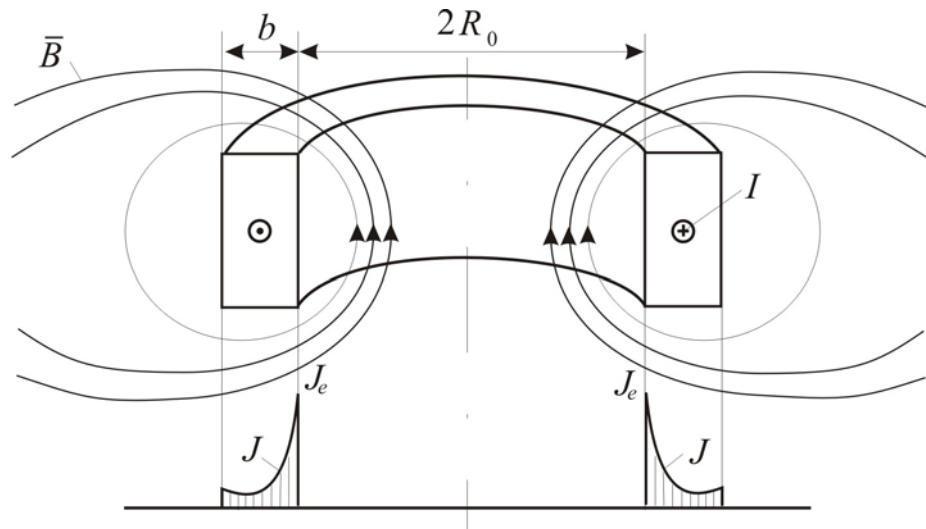


Рис. 3.10, б. Эффект кольцевой

Явление кольцевого эффекта можно объяснить, также, иначе. Ток концентрируется у внутренней поверхности кольца, проходя по сечению проводника, обладающему наименьшим реактивным (и активным) сопротивлением. Кольцевой эффект тем сильнее, чем больше по отношению к радиусу кольца  $R_0$  радиальная толщина проводника  $b$  (т.е., чем больше отношение  $b/R_0$  – для проводника прямоугольного сечения, и чем больше отношение  $R_1/R_0$  – для проводника круглого сечения).

### 3.1.3.6 Эффект паза

На распределение плотности тока в проводнике оказывает существенное влияние магнитопровод. Если проводник разместить в

открытом пазу магнитопровода (рис. 3.11), то можно наблюдать явление одностороннего поверхностного эффекта – эффекта паза.

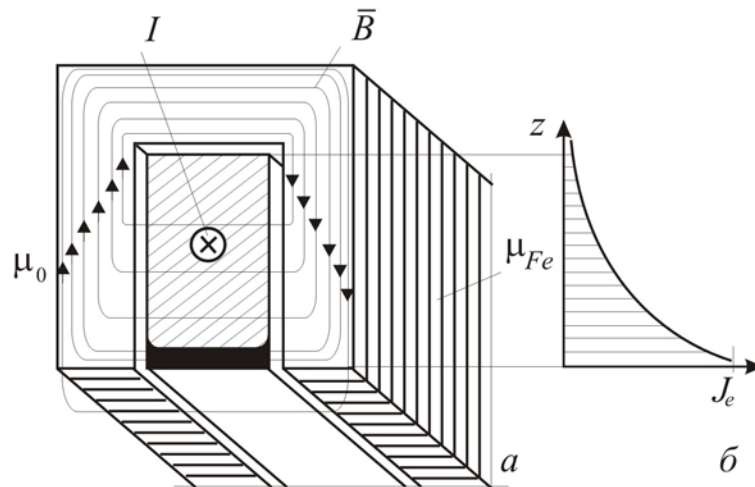


Рис. 3.11. Эффект паза

Наибольшая плотность тока будет получаться в той части проводника, которая находится у открытой стороны паза. В присутствии магнитопровода область проводника, которая находится в глубине паза, охватывается полным магнитным потоком, созданным током, протекающим в проводнике. Поэтому в этой части индуцируется наибольшая величина противоэлектродвижущей силы самоиндукции и создается наибольшее реактивное сопротивление. Вследствие этого ток проходит в части проводника, обладающей наименьшим реактивным сопротивлением, т.е. в зоне открытой стороны паза.

### **3.2.1 Индукционные канальные печи**

#### **3.2.1.1 Назначение индукционных канальных печей**

Индукционные канальные печи в основном используются для плавки цветных металлов (медь и сплавы на медной основе – латуни, бронзы, нейзильберы, мельхиоры, куниали; цинк; алюминий и их сплавы) и чугуна, а также в качестве миксеров для тех же металлов. Использование индукционных канальных печей для плавки стали ограничивается из-за недостаточной стойкости футеровки.

Наличие в индукционных канальных печах электродинамического и теплового движения расплавленного металла или сплава обеспечивает однородность химического состава и равномерность температуры расплавленного металла или сплава в ванне печи.

Индукционные канальные печи рекомендуется использовать в тех случаях, когда к выплавляемому металлу и полученным из него отливкам предъявляются высокие требования, в частности, по минимальным газонасыщенности и неметаллическим включениям.

Индукционные канальные миксеры предназначены для перегрева жидкого металла, выравнивания состава, создания постоянных температурных условий литья и в ряде случаев для дозирования и регулирования скорости литья в кристаллизаторы литейных машин или в литейные формы.

Шихта для индукционных канальных печей должна готовиться в соответствии с заданным составом выплавляемой марки металла или сплава, должна быть сухой и состоять в основном из первичного чистого металла.

Применение канальных печей не рекомендуется при использовании загрязненной вторичной шихты, использовании стружки, особенно при выплавке алюминиевых сплавов, а также при выплавке всевозможных лигатур и сплавов на медной основе, содержащих свинец и олово, так как при этом резко снижается срок службы футеровки, и эксплуатация канальных печей становится затруднительной.

В [17] приведена следующая классификация индукционных канальных печей и миксеров.

Печь ИЛК - шахтного и барабанного типов – предназначена для плавки меди и сплавов на медной основе.

Миксер ИЛКМ предназначен для выдержки, перегрева и разливки меди и сплавов на медной основе.

Печь ИАК предназначена для плавки алюминия и его сплавов.

Миксер ИАКР предназначен для перегрева, поддержания стабильной температуры жидкого алюминия и заливки его непосредственно в литейные формы.

Печь ИЦК предназначена для плавки катодного цинка.

Миксер ИЧКМ – шахтного и барабанного типов - предназначен для выдержки, перегрева, разливки жидкого чугуна, может работать в комплекте с вагранками или индукционными тигельными печами, или дуговыми печами (дуплекс-процесс)<sup>1</sup>.

Миксер раздаточный ИЧКР предназначен для перегрева, поддержания стабильной температуры жидкого чугуна и заливки его непосредственно в литейные формы, работает в комплексе с литейными машинами и литейными конвейерами.

Канальные печи могут работать самостоятельно с периодической разливкой расплавленного металла или сплава либо в составе плавильно-раздаточных агрегатов. Например [4, 5], агрегат ИЛКА-6 состоит из печи ИЛК-6 (полезная емкость 6 т, потребляемая мощность 1264 кВт, напряжение 475 В), переливного желоба и миксера ИЛКМ-6 (полезная емкость 6 т, потребляемая мощность 500 кВт, напряжение 350 В). Этот агрегат предназначен для плавки и полунепрерывной разливки меди и ее сплавов в круглые и плоские слитки. Агрегат ИЛКА-16М2 состоит из двух печей ИЛК-16М2 (полезная емкость 16 т, потребляемая мощность 1656 кВт, напряжение 475 В), системы переливных обогреваемых желобов и миксера ИЛКМ-16М2 (полезная емкость 16 т, потребляемая мощность 500 кВт, напряжение 350 В), предназначен для непрерывной плавки и разливки высококачественной бескислородной меди на катанку.

К *основным достоинствам* индукционных канальных печей можно отнести:

1. Минимальный угар (окисление) и испарение металла, так как нагрев происходит снизу. К наиболее нагретой части расплава, находящейся в каналах, нет доступа воздуха, а поверхность металла в ванне имеет сравнительно низкую температуру.

2. Малый расход энергии на расплавление, перегрев и выдержку металла. Канальная печь имеет высокий электрический КПД благодаря использованию замкнутого магнитопровода.

---

<sup>1</sup> Применение дуплекс-процессов для плавки в двух различных плавильных агрегатах целесообразно при полном использовании преимуществ каждой печи, таких как энергетические, теплотехнические, эксплуатационные, экономические и др. [8] . Например, при плавке в вагранке КПД при расплавлении достигает 60%, а при перегреве всего 5%. В индукционной печи при плавке КПД низкий, не более 30%, а при перегреве высокий – около 60%, следовательно, соединение вагранки с индукционной печью дает явное преимущество в использовании тепловой энергии. Кроме того, в индукционных печах можно получить металл более точного химического состава и более стабильную температуру, чем в вагранках и дуговых электропечах.

В то же время высок и тепловой КПД печи, так как основная масса расплава находится в ванне, имеющей толстую теплоизолирующую футеровку.

3. Однородность химического состава металла в ванне благодаря циркуляции расплава, обусловленной электродинамическими и тепловыми усилиями. Циркуляция способствует также ускорению процесса плавки.

К основным недостаткам индукционных канальных печей относятся:

1. Тяжелые условия работы футеровки канала – подового камня. Стойкость этой футеровки снижается при повышении температуры расплава, при плавке сплавов, содержащих химически активные компоненты (например, бронзы, имеющие в своем составе олово и свинец). Затруднена плавка в этих печах также низкосортной, загрязненной шихты – вследствие зарастания каналов.

2. Необходимость постоянно (даже при длительных перерывах в работе) держать в печи сравнительно большое количество расплавленного металла. Полный слив металла ведет к резкому охлаждению футеровки каналов и к ее растрескиванию. По этой причине невозможен также быстрый переход с одной марки выплавляемого сплава на другую. В этом случае приходится проводить ряд балластных переходных плавов. Постепенной загрузкой новой шихты меняют состав сплава от исходного до требуемого.

3. Шлак на поверхности ванны имеет низкую температуру. Это затрудняет проведение нужных металлургических операций между металлом и шлаком. По этой же причине, а также ввиду малой циркуляции расплава вблизи поверхности затруднено расплавление стружки и легкого скрапа.

### 3.2.1.2 Принцип действия индукционной канальной печи

*Принцип действия индукционной канальной печи подобен принципу действия силового трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания. Однако электрические параметры канальной электропечи и обычного трансформатора заметно отличаются. Это вызвано различием их конструкций.*

Конструктивно печь состоит (рис. 3.12) [6] из футерованной ванны 2, в которой помещается почти вся масса расплавляемого металла 3, и находящейся под ванной индукционной единицы.

Ванна сообщается с плавильным каналом 5, также заполненным расплавом. Расплав в канале и прилегающем участке ванны образует замкнутое проводящее кольцо.

Система индуктор – магнитопровод называется печным трансформатором. Футеровка, образующая плавильный канал, называется подовым камнем 6. Подовый камень представляет собой огнеупорный массив с цилиндрическим проемом 7, в который вставляется индуктор 4, навитый на стержень замкнутого магнитопровода 1.

Перегрев ограничивается некоторой допустимой величиной, лимитирующей допускаемую мощность в канале.

Принцип действия канальной печи требует постоянно замкнутой вторичной цепи. Поэтому допускается лишь частичный слив расплавленного металла и дозагрузка соответствующего количества новой шихты. Все канальные печи работают с остаточной емкостью, составляющей обычно 20 – 50 % полной емкости печи и обеспечивающей постоянное заполнение канала жидким металлом. Замораживание металла в канале не допускается, во время межплавочного простоя металл в канале должен поддерживаться в расплавленном состоянии.

Индукционная единица объединяет печной трансформатор и подовый камень с каналом.

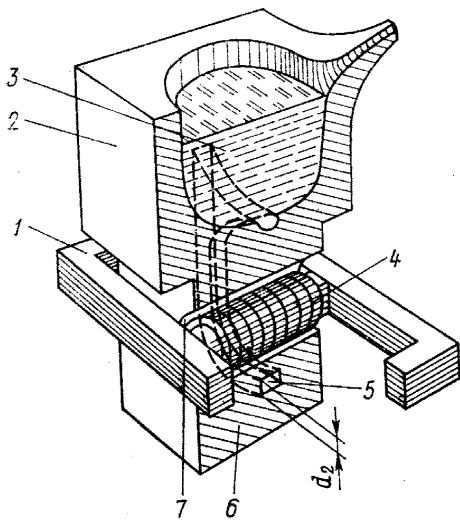


Рис. 3,12. Устройство индукционной канальной печи шахтного типа

Индуктор является первичной обмоткой трансформатора, а роль вторичного витка выполняет расплавленный металл, заполняющий канал и находящийся в нижней части ванны.

Ток, протекающий во вторичной цепи, вызывает нагрев расплава, при этом почти вся энергия выделяется в канале, имеющем малое сечение (в канале поглощается 90 – 95 % подведенной к печи электрической энергии). Металл нагревается за счет тепло- и массообмена между каналом и ванной.

Перемещение металла обусловлено главным образом электродинамическими усилиями, возникающими в канале, и в меньшей степени конвекцией, связанной

перегревом металла в канале по отношению к ванне.

Индукционная канальная печь имеет следующие отличия от силовых трансформаторов:

- 1) вторичная обмотка совмещена с нагрузкой и имеет только один виток  $N_2$  с относительно малой высотой по сравнению с высотой первичной обмотки с числом витков  $N_1$  (рис. 3.13);
- 2) вторичный виток – канал – находится от индуктора на относительно большом расстоянии, так как отделен от него не только электрической, но и тепловой изоляцией (воздушным зазором и футеровкой). В связи с этим магнитные потоки рассеяния индуктора и канала значительно превышают потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток обычного силового трансформатора той же мощности, поэтому значения реактивных сопротивлений рассеяния индукционной канальной печи выше, чем у трансформатора. Это, в свою очередь, приводит к тому, что энергетические показатели индукционной канальной печи – это электрический коэффициент полезного действия и коэффициент мощности – заметно ниже, чем у обычного трансформатора.

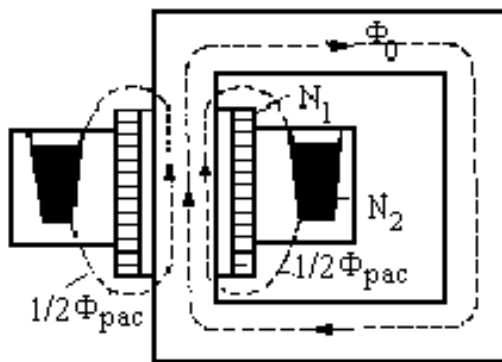


Рис. 3.13. Принципиальная схема индукционной канальной печи

Основные уравнения (уравнение токов и уравнения электрического состояния) для индукционной канальной печи аналогичны уравнениям для трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания (отсутствует напряжение  $U_2$ ):

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + (-\dot{I}'_2);$$

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1;$$

$$E'_2 = R'_2 \dot{I}'_2 + jX'_2 \dot{I}'_2.$$

Схема замещения и векторная диаграмма индукционной канальной печи приведены на рис. 3.14.

Интенсивное движение расплавленного металла из каналов в ванну и в обратном направлении имеет важнейшее значение, так как почти все тепло выделяется в каналах. В возникновении циркуляции металла некоторую роль



играет конвекция, связанная с перегревом металла в каналах, но основным фактором является электродинамическое взаимодействие тока в канале с магнитным потоком рассеяния, проходящим между каналом и индуктором (рис. 3.15).

Электродинамические силы  $F_r$ , направлены от индуктора  $u$  к металлу в канале  $K$  при осевом направлении плотности тока в канале  $\delta_z$ . Создаваемое ими давление равно нулю на внутренней поверхности канала и максимально на его наружной поверхности. Вследствие этого металл вытесняется в ванну из устья канала вдоль его наружной стенки и всасывается в канал вдоль его внутренней стенки (рис. 3.16, б).

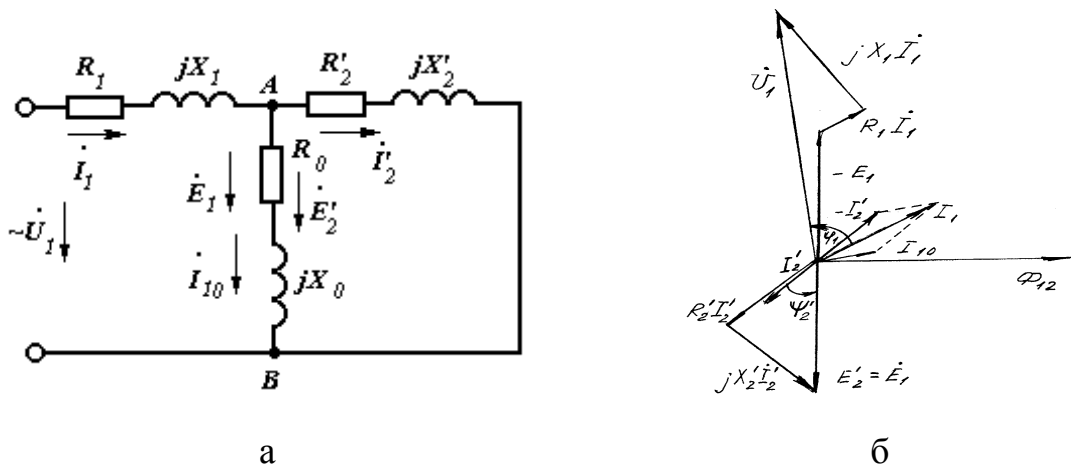


Рис. 3.14. Схема замещения и векторная диаграмма:

$U_1$  - напряжение на индукторе;  $I_1$  - ток в индукторе;  $I_{10}$  - ток холостого хода в индукторе;  $I'_2$  - приведенный ток в канале печи;  $E_1$  - ЭДС самоиндукции (наведенная основным потоком в обмотке индуктора);  $E'_2$  - ЭДС взаимоиндукции (наведенная основным потоком в канале печи);  $R_1, X_1$  - параметры индуктора;  $R'_2, X'_2$  - параметры канала

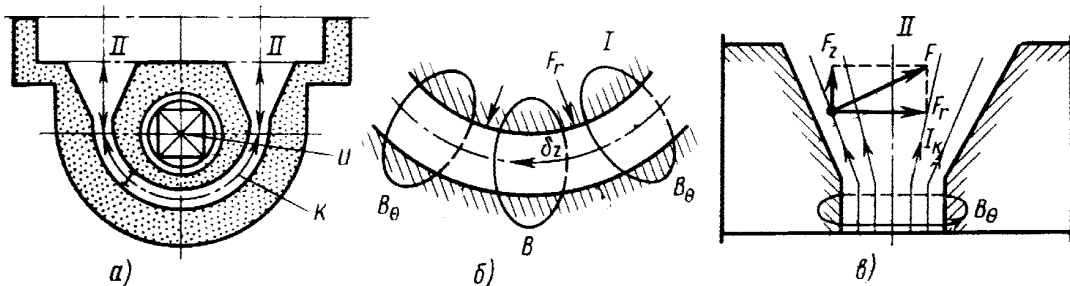


Рис. 3.15. Схема взаимодействия тока канала с магнитным полем

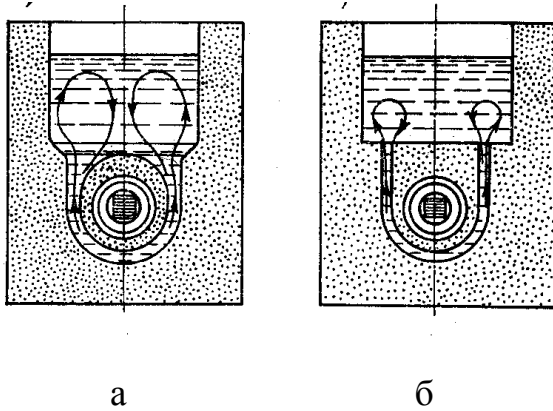


Рис. 3.16. Циркуляция металла канальной печи

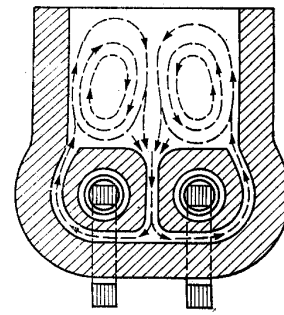


Рис. 3.17. Сдвоенная индукционная единица с однонаправленным движением металла каналах

В тех же случаях, когда необходимо ослабить циркуляцию (например, при плавке алюминия), устья делают без расширения, с большим гидравлическим сопротивлением.

Сквозное однонаправленное движение металла через канал и ванну вместо симметричной циркуляции позволяет усилить тепло- и массообмен, уменьшить перегрев металла в каналах и за счет этого увеличить стойкость подового камня. Для обеспечения такого движения металла были предложены различные технические решения [7]: винтовые канал с устьями, выходящими в ванну на разной высоте, что резко усиливает конвекцию; каналы переменного сечения, в которых имеется не только радиальная (обжимающая), но и осевая составляющая сил электродинамического взаимодействия тока в канале с собственным магнитным полем; дополнительный электромагнит для создания электродинамической силы, перемещающей металл вверх по центральному каналу сдвоенной индукционной единицы.

Применение винтовых каналов и каналов переменного сечения на одноканальных единицах себя не оправдало. Использование дополнительного электромагнита связано с усложнением и удорожанием печи и потому нашло лишь ограниченное применение. Использование каналов с устьями переменного сечения на сдвоенных индукционных единицах дало положительный результат. В сдвоенной единице с различной формой центрального и боковых устьев обусловлено однонаправленное движение металла, особенно интенсивное при отсутствии фазового сдвига между магнитными потоками индукторов. Такие единицы применяются в практике и обеспечивают удвоение срока службы футеровки.

### 3.2.1.3 Конструкция индукционных канальных печей

При большом разнообразии типов индукционных канальных печей основные конструктивные узлы являются общими для них всех: футеровка, трансформатор печи, корпус, вентиляционная установка, механизм наклона (рис. 3.18, 3.19).

#### *Трансформатор печи*

Схема трансформатора печи, элементами которого являются магнитопровод, индуктор, канал, определяется конструкцией печи.

Основными элементами трансформатора являются *магнитопровод* и *индуктор*.

Печь с одной индукционной единицей имеет однофазный трансформатор с броневым магнитопроводом. Широко применяются также трансформаторы со стержневыми магнитопроводами. Напряжение на первичную обмотку (индуктор) подается от питающего автотрансформатора с большим числом ступеней напряжения, что позволяет регулировать мощность печи. Автотрансформатор включается на линейное напряжение цеховой сети обычно без симметрирующего устройства, поскольку мощность однофазных печей относительно невелика.

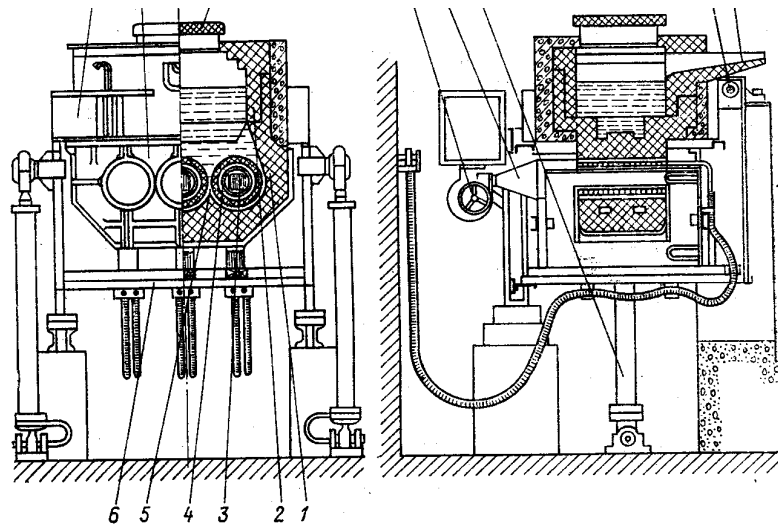


Рис. 3.18. Индукционная канальная печь для плавки медных сплавов с трехфазной индукционной единицей (шахтного типа):  
1, 2 - футеровка; 3 – 5 – трансформатор печи; 6 - 8 – корпус; 9 – крышка;  
10 – 11 – вентиляционная установка; 12 – 13 – механизм наклона

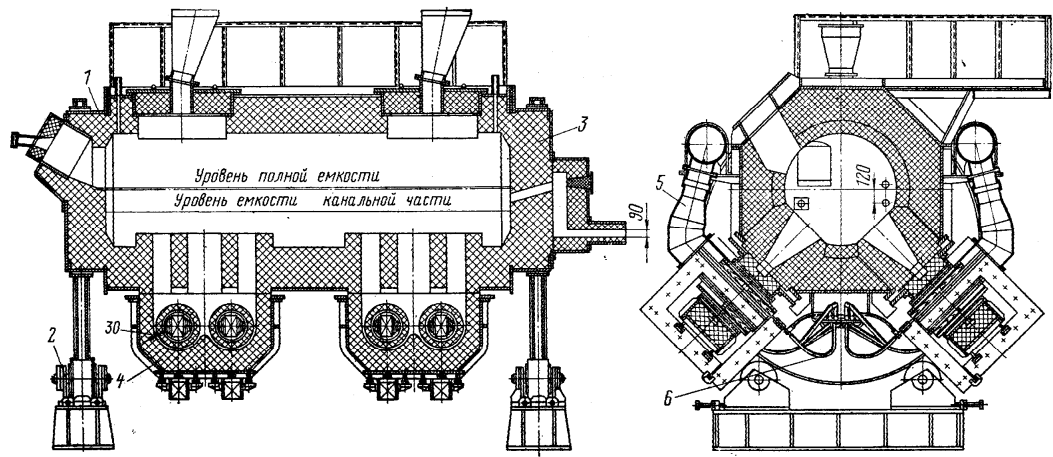


Рис. 3.19. Индукционная канальная печь (барabanного типа):  
 1- кожух; 2 – механизм поворота; 3 – футеровка; 4 – индукционная  
 единица; 5- воздушное охлаждение футеровки канальной части;  
 6 – подвод тока и воды к индукторам

Печь со сдвоенной индукционной единицей (рис. 3.20) [17] представляет собой двухфазную нагрузку, так же, как печь с двумя отдельными однофазными индукционными единицами. Индукторы в двухфазной системе подключаются к трехфазной сети по схеме открытого треугольника, если это не вызывает недопустимой несимметрии напряжений, или по схеме Скотта, обеспечивающей равномерную загрузку трех фаз. Конструктивно сдвоенная единица состоит из двух трансформаторов стержневого типа.

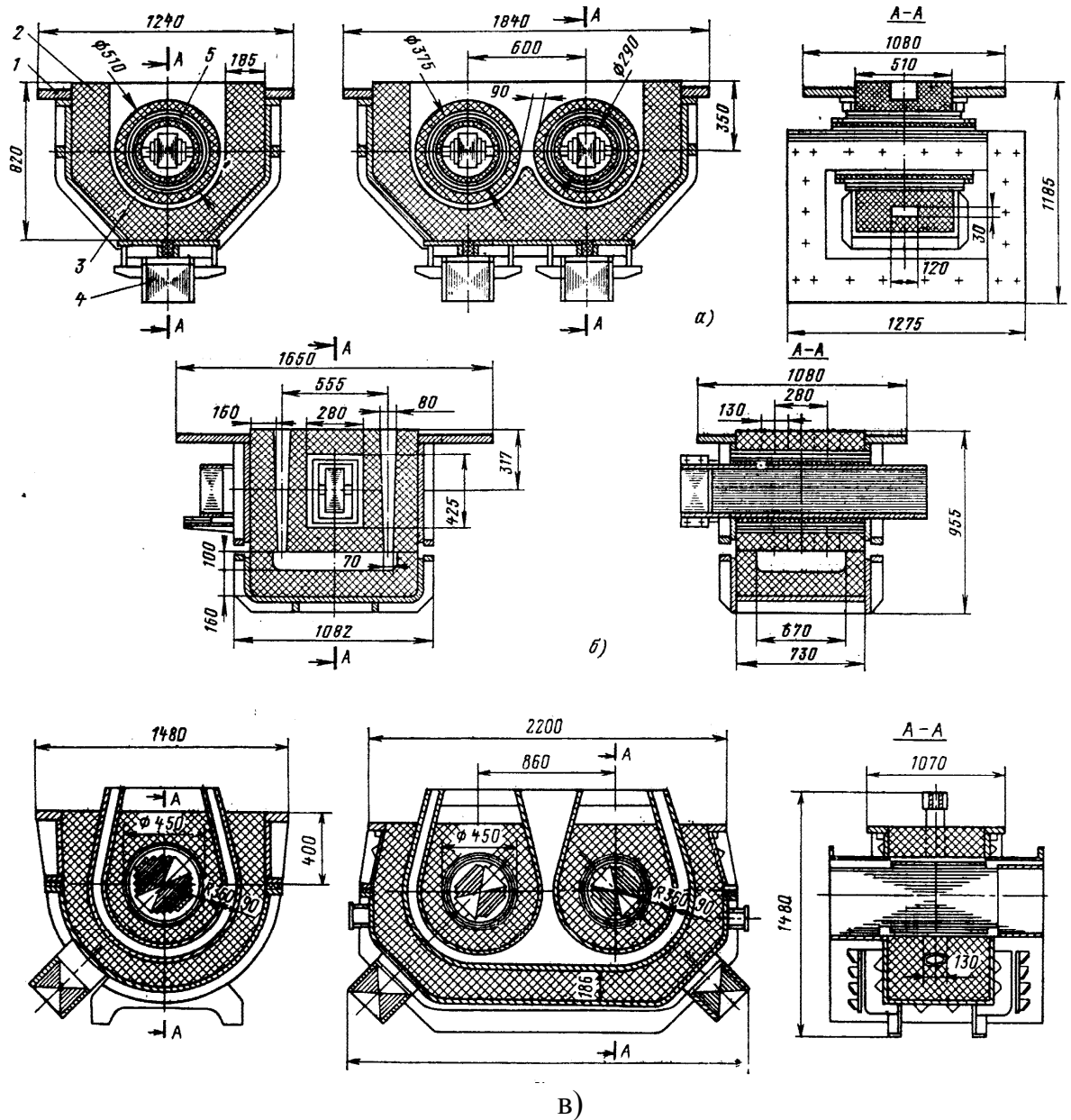


Рис. 3.20. Типовые унифицированные съемные индукционные единицы:  
 а – для печей ИЛК (мощность при плавке меди 300 кВт, при плавке латуни - 350 кВт, у двойной единицы соответственно 600 и 700 кВт);  
 б – для печей ИАК (мощность 400 кВт); в – для печей ИЧКМ (мощность 500 кВт – однофазная единица и 1000 кВт – двойная единица);  
 1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – канал; 4 – магнитопровод; 5 – индуктор

Печь с трехфазной индукционной единицей может иметь трехфазный трансформатор или три однофазных трансформатора. Последнее предпочтительнее, несмотря на большую массу магнитопровода, так как обеспечивает более удобную сборку и разборку, которые приходится периодически производить при смене футеровки.

Трехфазные индукционные единицы или группы однофазных единиц, число которых кратно трем, позволяют равномерно загрузить питающую сеть. Питание многофазных печей осуществляется через регулировочные автотрансформаторы.

*Магнитопровод* трансформатора печи изготавливается из листовой электротехнической стали, ярмо выполняется съемным из-за регулярной сборки и разборки.

Форма поперечного сечения стержня при небольшой мощности трансформатора – квадратная или прямоугольная, а при значительной мощности – крестообразная или ступенчатая.

*Индуктор* представляет собой выполненную из медного провода спиральную катушку. Как правило, катушка индуктора имеет круглое поперечное сечение. Однако в печах, имеющих прямоугольный контур плавильного канала, катушка индуктора может повторять его форму. Полученный из электрического расчета диаметр индуктора определяет размеры располагаемого внутри него сердечника.

Печной трансформатор работает в тяжелых температурных условиях. Он нагревается не только за счет электрических потерь в меди и стали, как обычный трансформатор, но и за счет тепловых потерь через футеровку плавильного канала. Поэтому всегда применяется форсированное охлаждение печного трансформатора.

Индуктор канальной печи имеет принудительное воздушное или водяное охлаждение. При воздушном охлаждении индуктор изготовлен из медного обмоточного провода прямоугольного сечения, средняя плотность тока составляет  $2,5 - 4 \text{ А/мм}^2$ . При водяном охлаждении индуктор, изготовленный из профилированной медной трубки, желателен неравностенной, с толщиной рабочей стенки (обращенной к каналу)  $10 - 15 \text{ мм}$ ; средняя плотность тока достигает  $20 \text{ А/мм}^2$ . Индуктор, как правило, выполняется однослойным, в редких случаях – двухслойным. Последний значительно сложнее конструктивно и имеет более низкий коэффициент мощности.

Номинальное напряжение на индукторе не превышает  $1000 \text{ В}$  и чаще всего соответствует стандартному напряжению сети ( $220, 380$  или  $500 \text{ В}$ ). Витковое напряжение при малой мощности индукционной единицы составляет  $7 - 10 \text{ В}$ , а при большой мощности оно возрастает до  $13 - 20 \text{ В}$ . Форма витков индуктора обычно круговая, лишь у печей для плавки алюминия, каналы которых состоят из прямолинейных отрезков, а сердечник всегда имеет прямоугольное сечение, витки индуктора также делаются прямоугольными. Индуктор изолируют киперной, асбестовой лентой или лентой из стекловолокна. Между индуктором и сердечником расположен изолирующий цилиндр толщиной  $5 - 10 \text{ мм}$  из бакелита или стеклотекстолита. Цилиндр фиксируют на сердечнике при помощи забиваемых деревянных клиньев.

Когда печь не питается от специального регулируемого силового трансформатора, от нескольких крайних витков индуктора делаются отпайки. Подавая питающее напряжение на различные отпайки, можно менять коэффициент трансформации печного трансформатора и тем самым управлять величиной выделяемой в канале мощности.

#### *Корпус печи*

Обычно корпус печи состоит из каркаса, кожуха ванны и кожуха индукционной единицы. Кожух ванны у печей малой емкости, а у барабанных печей также и значительной мощности, может быть выполнен достаточно прочным и жестким, что позволяет отказаться от каркаса. Конструкции и крепления корпуса должны быть рассчитаны на нагрузки, возникающие при наклоне печи, чтобы обеспечивать необходимую жесткость в наклоненном положении.

Каркас изготавливается из стальных фасонных балок. Цапфы оси наклона опираются на подшипники, смонтированные на опорах, установленных на фундаменте. Кожух ванны изготавливается из листовой стали толщиной 6 – 15 мм и снабжается ребрами жесткости.

Кожух индукционной единицы служит для соединения подового камня и печного трансформатора печи в единый конструктивный элемент. Двухкамерные печи не имеют отдельного кожуха индукционной единицы, он составляет у них одно целое с кожухом ванны. Кожух индукционной единицы охватывает индуктор, поэтому для уменьшения потерь на вихревые токи он делается составным из двух половин с изолирующей прокладкой между ними. Стяжка производится болтами, снабженными изолирующими втулками и шайбами. Таким же образом кожух индукционной единицы крепится к кожуху ванны.

Кожухи индукционных единиц могут быть литыми или сварными, часто имеют ребра жесткости. В качестве материала для кожухов предпочтительнее использовать немагнитные сплавы. Двухкамерные печи имеют один общий кожух ванны и индукционной единицы.

#### *Вентиляционная установка*

В печах небольшой емкости, не имеющих водяного охлаждения, вентиляционная установка служит для отвода тепла от индуктора и поверхности проема подового камня, нагреваемой за счет теплопроводности от расплавленного металла в близко расположенных каналах. Применение водоохлаждаемого индуктора не освобождает от необходимости вентилировать проем подового камня во избежание перегрева его поверхности. Хотя современные съемные индукционные единицы имеют не только водоохлаждаемые индукторы, но и водяное охлаждение кожухов и проемов подового камня (в проем вставляется водоохлаждаемый кессон), *вентиляционная установка является обязательным элементом оборудования* канальной печи.

Вентиляторы с приводными двигателями часто устанавливаются на каркасе печи. При этом вентилятор соединяется с коробом, распределяющим

воздух по вентилируемым проемам, коротким жестким воздуховодом. Масса вентиляционной установки может быть значительной, что приводит к существенному увеличению нагрузки на механизм наклона печи. Поэтому применяется и другая компоновка, при которой вентиляторы устанавливаются рядом с печью и соединяются с нею гибкими рукавами, обеспечивающими возможность наклона. Вместо гибких рукавов может использоваться воздуховод, состоящий из двух жестких участков, сочленяющихся с помощью поворотного стыка на продолжении оси наклона, что также позволяет осуществлять опрокидывание печи. При такой компоновке уменьшается нагрузка на механизм наклона, но усложняется конструкция воздуховодов и загромождается пространство вокруг печи.

Печи со съемными индукционными единицами оборудуются индивидуальными вентиляторами для охлаждения каждой единицы. Выход из строя вентилятора может привести к аварии печи. Поэтому вентиляционная установка должна иметь резервный вентилятор, готовый к немедленному включению и отделенный от воздуховода задвижкой. Исключение составляют печи с индивидуальными вентиляторами на индукционных единицах. Индивидуальные вентиляторы имеют небольшие габариты и массу и в случае выхода из строя могут быть очень быстро заменены, поэтому устанавливать резервные вентиляторы на печь не требуется.

Печи со съемными индукционными единицами оборудуются индивидуальными вентиляторами для охлаждения каждой единицы.

### *Механизм наклона*

Канальные печи малой емкости (до 150-200 кг) снабжаются обычно механизмом наклона с ручным приводом, ось наклона проходит вблизи центра тяжести печи.

Крупные печи оборудуются механизмами наклона с гидравлическим приводом. Ось наклона располагается у сливного носка.

Наклон барабанных печей осуществляется путем поворота вокруг оси, параллельной продольной оси ванны. При вертикальном положении печи леточное отверстие находится выше уровня жидкого металла, при повороте печи на катках оно оказывается под зеркалом ванны. Положение летки относительно ковша в процессе слива металла не изменяется, поскольку летка располагается в центре опорного диска, на оси поворота.

Механизм наклона любого типа должен обеспечивать слив всего металла из печи.

## **3.2.2 Индукционные тигельные печи**

### **3.2.2.1. Назначение индукционных тигельных печей**



Индукционные тигельные печи (ИТП) широко применяются в промышленности для плавки черных и цветных металлов как на воздухе, так и в вакууме и в защитных атмосферах. В настоящее время используются такие печи емкостью от десятков грамм до десятков тонн. Тигельные индукционные печи применяют главным образом для плавки высококачественных сталей и других специальных сплавов, требующих особой чистоты, однородности и точности химического состава, что недостижимо при плавке в пламенных и дуговых печах.

В качестве примера в табл. 3.1 приведены технические данные некоторых тигельных индукционных печей [4, 5, 17], на рис. 3.21, 3.22, 3.23 - индукционные тигельные печи для плавки алюминия емкостью 6 тонн, для плавки сплавов на основе меди емкостью 2.5 тонны, для плавки чугуна емкостью 10 тонн, а в табл. 3.2 приведены характеристики некоторых металлов и сплавов, расплавляемых в индукционных тигельных печах.

Плавка обычных сортов стали в печах без сердечника менее экономична, чем в дуговых, так же как и обычных цветных металлов и сплавов, по сравнению с индукционными канальными печами. Однако в настоящее время тигельные индукционные печи повышенной и промышленной частоты широко применяют за рубежом и в России для плавки обычных тяжелых и легких цветных металлов и их сплавов в производствах с периодическим режимом работы и широким ассортиментом выплавляемых сплавов, а также для плавки сильно загрязненной шихты с большим содержанием стружки или сплавов, требующих модифицирования, поскольку в канальных печах наличие каналов затрудняет перевод печей с плавки одного сплава на другой, и в то же время флюсы и модифицирующие соли, а также грязная мелкая шихта способствуют зарастанию каналов.

Таким образом, тигельные индукционные печи, хотя и отличаются более низкими КПД и  $\cos \varphi$ , а также представляют собой более дорогое и сложное электротехническое устройство по сравнению с индукционными канальными печами, все же в указанных случаях более приемлемы и удобны в эксплуатации. Следует отметить попытку совмещения некоторых достоинств и преимуществ индукционных канальных печей (высокий электрический КПД) и индукционных тигельных печей (относительная простота ее футеровки) в промежуточном конструктивном решении между этими типами печей – создание индукционной тигельной печи с кольцевой камерой (рис.3.24, 3.25).

Таблица 3.1

## Технические данные некоторых тигельных индукционных печей

Наименование и назначение печи	Тип печи	Емкость печи, т	Мощность печи, кВт	Частота, Гц	Напряжение на индукторе, В	Мощность конденсаторно-ы багалеи кван	Максимальная рабочая температура,	Максимальная производительность, кг/ч	Удельный расход электроэнергии	Габаритные размеры, мм		Масса печи, т
										в плане	высота	
Индукционная тигельная для плавки стали	ИСТ-1,0	1,0	790	1000	2000	15600	1650	1330	625	2700x2120	3800	6,5
	ИСТ-2,5	2,5	2350	500	1910	22500	1600	4000	600	3000x2850	3740	15,4
	ИСТ-6	6,0	2330	500	1500	45000	1650	3500	600	-	-	-
	ИСТ-10	10,0	3200	500	1500	48000	1650	5000	640	-	-	-
Индукционная тигельная для плавки чугуна	ИЧТ-2,5	2,5	910	50	980	-	1400	1700	550	3164x3000	3620	17
	ИЧТ-6	6,0	1600	50	1000	-	1400	2200	546	4815x3120	4620	28
Индукционный тигельный миксер для перегрева чугуна	ИЧТМ-6	6,0	370	50	500	-	1400	6000	52	5350x3120	6500	28
	ИЧТМ-10	10,0	840	50	1255	-	1400	17600	48	5700x3600	7100	35,7
Индукционная тигельная для плавки алюминия и его	ИАТ-0,4	0,4	170	50	340	-	750	230	745	-	-	-
	ИАТ-1	1,0	320	50	485	-	750	1300	580	3164x3000	3100	-

сплавов	ИАТ-6	6,0	1400	50	1050	-	750	2000	560	4840x3600	5570	39,6			
Индукционная тигельная для плавки меди и ее сплавов	ИЛТ-1	1,0	325	50	485	-	1200	1000	380						
	ИЛТ-2,5	2,5	720	50	980	-	1200	2000	355						
	ИЛТ-10	10,0	1290	50	1050	-	1200	3600	350						
<b>Вакуумные печи</b>										Изложница	1000	6,5			
Индукционная вакуумная для плавки стали и жаропрочных сплавов периодического действия	ИСВ-0,06ПИ	0,06	155	2400	800	1760	1800	67	2500				500x600	1000	7,75
	ИСВ-0,16ПИ	0,16	435	2400	800	4400	1700	107	2170				500x600	1000	7,75
	ИСВ-0,16ПИ	0,16	435	2400	800	4400	1650	200	2100				2000x1200	1200	
	ИСВ-0,16НИ	1,0	1000	1000	1000	8600	1650	445	2000				200x200	2500	49,3
	ИСВ-1,0НИ	2,5	1500	1000	1000	20000	1800	750	2000				700x900	1800	152,0
	ИСВ-2,5НИ														
Индукционная вакуумная для плавки стали полунепрерывного действия	ИАВ-0,06ПИ	0,06	50	2400	475	-	800	10	-	500x500	800	18,27			
	ИАПВ-0,25ПИ	0,25	500	1000	2000	-	2000	125	-	Кокиль 240x1200	1300	42,7			
Индукционная вакуумная для плавки меди и ее сплавов	ИМВ-0,16ПИ	0,16	162	2400	445	-	1300	64	-	Ø300	800	7,28			

Таблица 3.2

*Характеристики некоторых металлов и сплавов, расплавляемых в индукционных тигельных печах*

Металл или сплав	Температура, °С		Плотность, т/м <sup>3</sup>		Удельная теплоемкость в жидком состоянии, ккал/(кг·град)			Скрытая теплота плавления, ккал/кг
	плавления	перегрева перед разливкой	при 20°С	в жидком состоянии	при температуре плавления	при температуре перегрева	При температуре °С	
Медь (100 % Си)	1083	1225	8,89	8,30	0,1300	0,1335	0,104 + 0,000024t	42,5
Томпак (90 % Си, 10 % Zn)	1045	1225	8,80	8,20	0,1139	0,1174	0,0935 + 0,0000195t	41,0
Полутомпак (80 % Си, 20 % Zn)	1000	1160	8,70	8,10	0,1138	0,1171	0,0933 + 0,0000205t	39,0
Латунь (39,5 ÷ 36,6 Zn , остальное Си)	905	1070	8,50	7,80	0,1124	0,1162	0,0929 + 0,0000216t	35,5
Латунь (30 ÷ 33 Zn, остальное Си)	940	1140	8,60	8,00	0,1132	0,1175	0,0929 + 0,0000217t	-
Бронза марганцовистая (58 % Си, 40 % Zn, 2 % Sn)	920	1070	7,80	7,80	0,1130	0,1164	0,0924 + 0,0000224t	34,5
Бронза фосфористая (93 % Си, 3 % Zn,	1060	1225	8,00	8,00	0,1137	0,1168	0,0935 + 0,000019t	4,0

4 % Sn)								
Алюминий (100 % Al)	658	700	2,4	2,4	0,297	0,300	0,246 +0,000078t	92,4

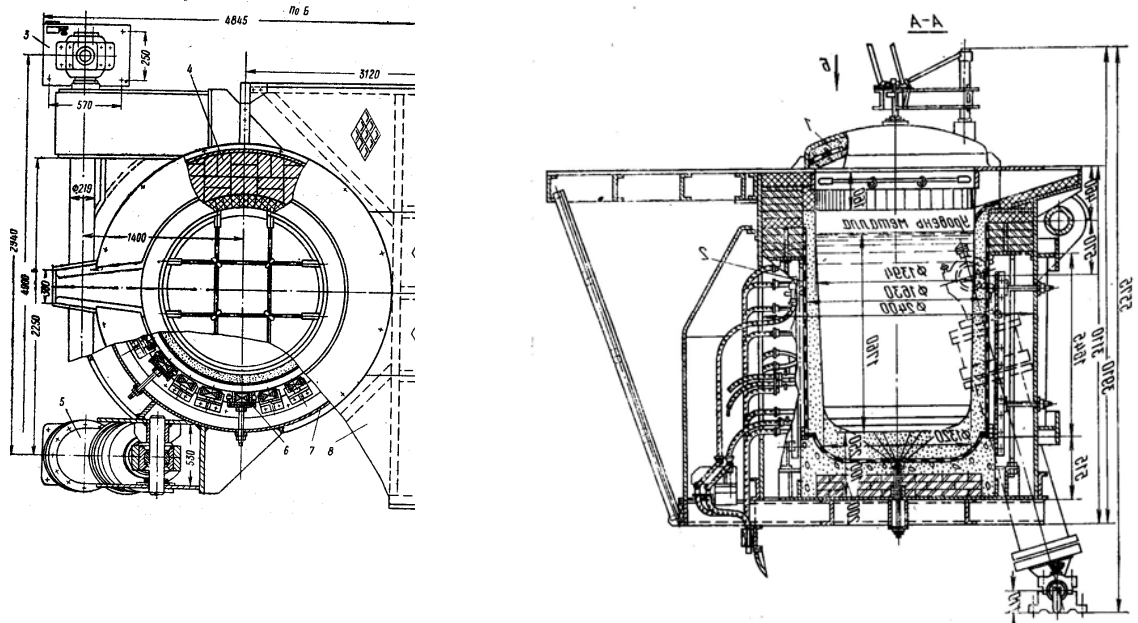


Рис. 3.21. Индукционная тигельная печь типа ИАТ-6 для плавки алюминиевых сплавов:

- 1 – крышка с механизмом подъема; 2 – установка индуктора;
- 3 – установка подшипников; 4 – футеровка;
- 5 – плунжер механизма поворота; 6 – пакеты магнитопровода;
- 7 – кожух печи; 8 – рабочая площадка

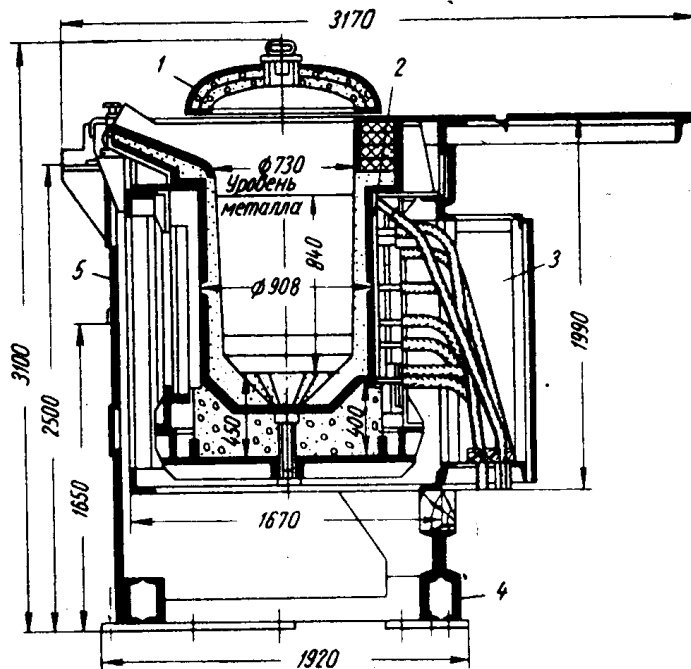


Рис. 3.22. Общий вид индукционной тигельной печи типа ИЛТ-2,5:

- 1 – крышка; 2 – установка индуктора; 3 – кожух выводов;
- 4 – рама основания; 5 – каркас печи

**Достоинства** тигельных плавильных печей:

- Выделение энергии непосредственно в загрузке, без промежуточных нагревательных элементов.

- Интенсивная электродинамическая циркуляция расплава в тигле, обеспечивающая быстрое плавление мелкой шихты и отходов, быстрое выравнивание температуры по объему ванны и отсутствие местных перегревов и гарантирующая получение многокомпонентных сплавов, однородных по химическому составу.

- Принципиальная возможность создания в печи любой атмосферы (окислительной, восстановительной, нейтральной) при любом давлении (вакуумные или компрессионные печи).

- Высокая производительность, достигаемая благодаря высоким значениям удельной мощности (особенно на средних частотах).

- Возможность полного слива металла из тигля и относительно малая масса футеровки печи, что создает условия для снижения тепловой инерции печи благодаря уменьшению тепла, аккумулированного футеровкой. Печи этого типа весьма удобны для периодической работы с перерывами между плавками и обеспечивают возможность для быстрого перехода с одной марки сплава на другую.

- Простота и удобство обслуживания печи, управления и регулирования процесса плавки, широкие возможности для механизации и автоматизации процесса.

Высокая гигиеничность процесса плавки и малое загрязнение воздушного бассейна.

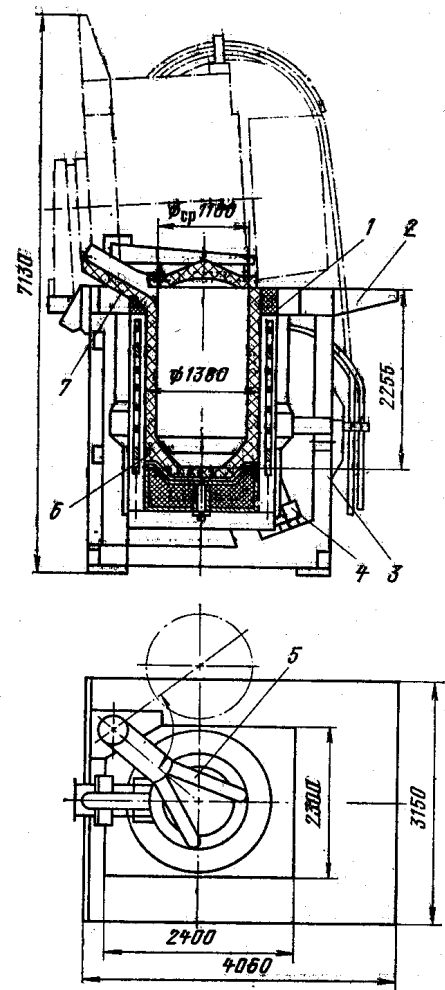


Рис. 3.23. Конструкция индукционной тигельной печи промышленной частоты для плавки чугуна емкостью 10 т:

- 1 – установка индуктора;
- 2 – поворотная рама;
- 3 – опорная рама; 4 – плунжеры;
- 5 – крышка печи с механизмом;
- 6 – тигель; 7 – сливной носок

(штрих-пунктиром показано

положение печи в момент полного слива металла)

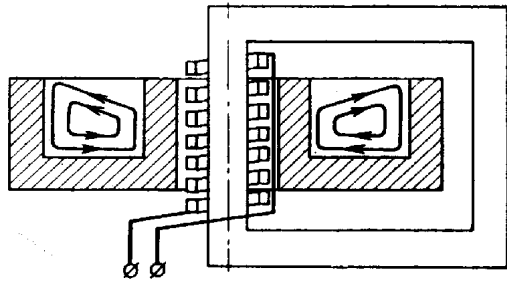


Рис. 3.24. Схематическое изображение тигельной печи с кольцевой камерой и движением расплава в ней

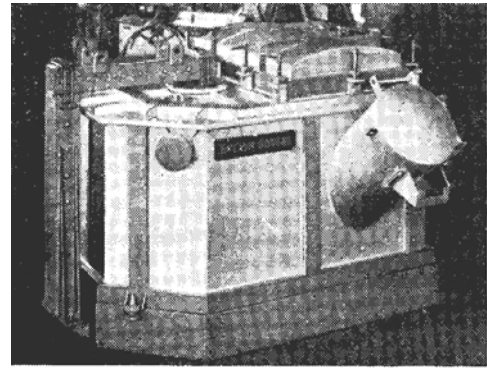


Рис. 3.25. Тигельная печь с кольцевой камерой, рассчитанная на сифонные заливку и отбор, с пневматическим

устройством разливки с помощью ковша

При таком решении могут частично проявиться преимущества обоих основных типов печей. Из-за наличия канала, открытого сверху, который к тому же еще и много шире, чем в канальной печи, металл в печи можно замораживать и вновь запускать печь, используя кольцо замерзшего металла или заливая жидкий металл [20].

Интенсивное движение расплава, имеющее место в печи с кольцевой камерой, ограничивает мощность печи. Поэтому такая печь используется преимущественно для поддержания металла в расплавленном состоянии. При этом она имеет то преимущество, что на наружной поверхности кожуха могут устанавливаться любые элементы конструкции для загрузки или отбора жидкого материала. Для работы печи металл канала постоянно должен образовывать замкнутое кольцо так же, как в индукционной канальной печи. При наклоне нагрев прекращается в том случае, если кольцо разрывается вследствие очень большого угла наклона. Индукционные тигельные печи как плавильные устройства обладают большими достоинствами, важнейшие из которых - возможность получения весьма чистых металлов и сплавов точно заданного состава, стабильность свойств получаемого металла, малый угар металла и легирующих элементов, высокая производительность, возможность полной автоматизации, хорошие условия труда обслуживающего персонала, малая степень загрязнения окружающей среды

Необходимо отметить следующие **недостатки** тигельных печей:

- Относительно низкая температура шлаков, наводимых на зеркало расплава с целью его технологической обработки. Относительно холодные шлаки затрудняют протекание реакций между металлом и шлаком и,



следовательно, затрудняют процессы рафинирования. Шлак в ИТП, индифферентный к электрическому току, нагревается только от расплавляемого металла, поэтому его температура всегда ниже.

- Сравнительно низкая стойкость футеровки при высоких рабочих температурах расплава и при наличии теплосмен (резких колебаний температуры футеровки при полном сливе металла).

- Высокая стоимость электрооборудования, особенно при частотах выше 50 Гц.

- Более низкий КПД всей установки вследствие необходимости иметь в установке источник получения высокой или повышенной частоты, а также конденсаторов, а также при плавке материалов с малым удельным сопротивлением.

Сочетанием таких качеств (высокая стоимость электрооборудования и низкий КПД) определяется область применения индукционных тигельных печей: плавка легированных сталей и синтетического чугуна, цветных тяжелых и легких сплавов, редких и благородных металлов. Поскольку область применения этих печей ограничивается не техническими, а экономическими факторами, по мере увеличения производства электроэнергии она непрерывно расширяется, захватывая все более дешевые металлы и сплавы.

К сказанному необходимо добавить, что тигельные индукционные печи широко применяют для плавки и выдержки чугуна.

Основной тенденцией в развитии индукционных тигельных печей является рост как единичной емкости, так и суммарной емкости парка печей, связанный, прежде всего с потребностью в больших количествах высококачественного металла. Кроме того, при увеличении емкости повышается КПД печи и снижаются удельные расходы на ее изготовление и эксплуатацию.

По сравнению с топливными печами производительность тигельных индукционных печей выше; кроме того, плавка в тигельных индукционных печах дает металл более высокого качества и потери выплавляемых сплавов меньше.

Тигельные печи все чаще стали использовать в комплексе с другими плавильными агрегатами (вагранками, дуговыми печами). В этих случаях металл, предварительно расплавленный в указанных печах, поступает в индукционную электропечь для рафинирования и доведения до заданного химического состава.

### **3.2.2.2 Принцип действия индукционной тигельной печи**

В основе работы тигельной печи лежит трансформаторный принцип передачи энергии индукцией от первичной цепи ко вторичной. Подводимая к

первичной цепи электрическая энергия переменного тока превращается в электромагнитную, которая во вторичной цепи переходит снова в электрическую, а затем в тепловую.

Индукционные тигельные печи также называют индукционными печами без сердечника. Печь представляет собой плавильный тигель, как правило, цилиндрической формы, выполненный из огнеупорного материала и помещенный в полость индуктора, подключенного к источнику переменного тока (рис. 3.26). Металлическая шихта (материал, подлежащий плавлению) загружается в тигель и, поглощая электрическую энергию, плавится. В тигельной печи (рис. 3.26) первичной обмоткой служит индуктор, обтекаемый переменным током, а вторичной обмоткой и одновременно нагрузкой – сам расплавляемый металл, загруженный в тигель и помещенный внутрь индуктора.

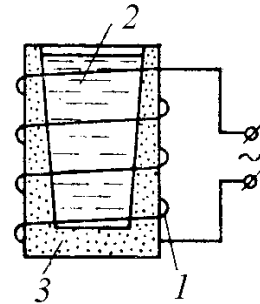


Рис. 3.26. Индукционная плавка металлов в тигельной печи:

1 – индуктор; 2 – расплав;

3 – огнеупорный тигель

Магнитный поток в тигельной печи проходит в той или иной степени по самой шихте. Поэтому для работы печи без сердечника имеют большое значение магнитные свойства, а также размеры и форма кусков шихты.

Когда в качестве шихты применяют ферромагнитные металлы, то до того момента, пока их температура еще не достигла точки Кюри, т.е.  $\sim 740 \div 770^\circ \text{C}$ , их магнитная проницаемость сохраняет свою величину. В этом случае шихта будет играть роль не только вторичной обмотки и нагрузки, но и незамкнутого сердечника. Иначе говоря, при плавке в тигельной печи ферромагнитных металлов разогрев шихты в первый период (до точки Кюри) произойдет не только за счет тепла, выделяемого от циркуляции в ней вихревых токов, но и за счет потерь на ее перемагничивание, которое в этот период наблюдается в шихте. После точки Кюри ферромагнитные тела теряют свои магнитные свойства и работа индукционной печи становится аналогичной работе воздушного трансформатора, т.е. трансформатора без сердечника.

*Тигельная печь по принципу действия подобна воздушному трансформатору.*

Мощность, а следовательно, и тепло, выделяемое вихревыми токами, которые наводятся и циркулируют в садке, зависят от частоты переменного магнитного поля. При промышленной частоте 50 Гц концентрация энергии, выделяемой вихревыми токами, незначительна и не превышает [3] несколько ватт на  $1 \text{ см}^2$  поверхности. Поэтому для эффективной работы печи без сердечника приходится питать их токами повышенной, а в отдельных случаях и высокой частоты, что достигается установкой специальных генераторов частоты.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования печей без сердечника, частота питающего тока может быть соответственно понижена в зависимости от диаметра садки, т.е. емкости печи, и удельного сопротивления расплавляемого металла. В частности, этими исследованиями определены следующие основные положения, которые позволили значительно упростить установку печей без сердечника:

- каждой емкости печи и сопротивлению шихты соответствует своя оптимальная частота питающего тока. При частоте, ниже оптимальной, КПД печи сильно понижается, выше оптимальной – почти не изменяется;
- с увеличением емкости печи частоту тока можно соответственно снизить.

В результате анализа отмеченных выше факторов (диаметра садки и сопротивления шихты), влияющих на частоту питающего тока, было получено уравнение, которое дает минимальное значение частоты для данного металла и диаметра садки [2, 3]:

$$f_{min} \geq \frac{25 \cdot 10^8 \rho_2}{d^2},$$

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

$\rho_2$  - удельное сопротивление расплавленного металла;

$d$  - диаметр садки.

Ток повышенной частоты, проходя через индуктор печи, обеспечивает наведение в садке ЭДС индукции, которая в плоскостях, параллельных плоскости витков обмотки, вызовет вихревые токи.

Вследствие поверхностного эффекта эти наведенные в садке токи достигают максимальной величины на внешней поверхности последней и значительно уменьшаются от краев к середине. Такое уменьшение плотности тока по мере удаления от поверхности к центру происходит по сложному закону (комбинация функций Бесселя).

При большом сечении проводника или при большой частоте тока уменьшение плотности тока по мере удаления от поверхности к центру проводника происходит по экспоненциальному закону.

### 3.2.2.3. Циркуляция металлов в тигельной печи

Расплавленный металл в индукционной тигельной печи обжимается электромагнитным полем. В средней по высоте части цилиндрического тигля, где не сказывается краевой эффект, силы электродинамического взаимодействия индуктированного тока и магнитного поля индуктора направлены радиально к оси цилиндра и убывают от максимального значения на поверхности до нуля на оси. Создаваемое этими силами давление сжатия возрастает от поверхности к оси [2, 7].

При ярко выраженном поверхностном эффекте, практически всегда имеющем место в тигельной печи, давление сжатия может быть записано в виде:

$$\rho_{сж} = \pi \cdot 10^{-7} H_{me}^2,$$

где  $H_{me}^2 = 2p_0 \Delta_2 / \rho_2$  - амплитуда напряженности магнитного поля в зазоре, для индукционных тигельных печей составляет  $10^4 - 10^5$  А/м;  $p_0$  - удельная поверхностная мощность, Вт/м<sup>2</sup>;  $\rho_2$  - удельное сопротивление расплава, Ом·м.

Следовательно, выражению для  $\rho_{сж}$  может быть придан вид

$$\rho_{сж} = \pi \cdot 10^{-7} p_0 \Delta_2 / \rho_2 = 3,16 \cdot 10^{-4} p_0 / \sqrt{\rho_2 f}.$$

Из формулы видно, что при неизменной мощности, передаваемой в расплав, силовое воздействие на него усиливается с понижением частоты.

Тигельная печь представляет собой относительно короткую электромагнитную систему (отношение высоты загрузки к диаметру редко превосходит 1,5), поэтому электродинамические силы направлены строго радиально только в средней по высоте части тигля. Ближе к верхнему и нижнему краям тигля, где магнитное поле искажается и линии его не идут параллельно оси, радиальная составляющая электродинамических сил

уменьшается, как показано горизонтальными стрелками на рис. 3.27.

Под действием такой системы сил металл в средней части тигля перетекает от периферии к оси, затем по оси тигля выжимается вверх к зеркалу ванны и вниз ко дну тигля. Вверху и внизу он перетекает к стенкам и вдоль стенок возвращается к средней части тигля, совершая так называемую двухконтурную циркуляцию.

Сам факт электродинамической циркуляции металла, которая может быть весьма интенсивной, является достоинством индукционной тигельной печи, выгодно отличающим ее от дуговой печи. Циркуляция ускоряет расплавление,

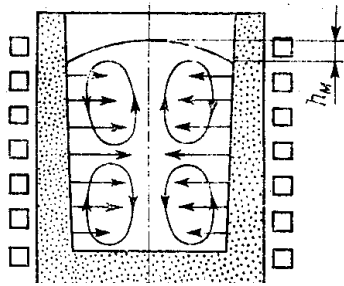


Рис. 3.27. Двухконтурная циркуляция металла в индукционной тигельной печи

способствует взаимодействию металла со шлаком.

Однако описанная двухконтурная циркуляция имеет и серьезные недостатки. Во-первых, в каждом из контуров, т. е. в верхней и нижней половинах ванны, металл циркулирует отдельно, слабо смешиваясь.

выравнивает температуру и химический состав ванны,

Во-вторых, на поверхности ванны образуется выпуклый мениск, с возрастанием высоты которого приходится увеличивать количество шлака, поскольку он должен полностью покрывать поверхность металла. При этом шлак взаимодействует с огнеупором тигля в широком поясе, разъедая его и способствуя загрязнению ванны. Кроме того, при увеличении количества шлака он получается более холодным, поскольку в индукционной печи шлак нагревается только путем теплопередачи от металла. Понижение температуры шлака замедляет протекание химических реакций и увеличивает продолжительность плавки. Как правило, высота мениска  $h_m$  (рис. 7) не должна превышать 15 % полной высоты металла по оси тигля.

При радиальном направлении электродинамических сил по всей высоте тигля высота мениска определяется из условия равенства электродинамического давления на оси тигля  $\rho_{сж}$  и гидростатического давления столба металла высотой  $h_m$ :

$$h_m = \rho_{сж} / (9,81\gamma) = 0,32 \cdot 10^{-4} p_0 / (\gamma \sqrt{\rho_2 f}),$$

где  $\gamma$  - плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>.

При проектировании индукционных тигельных печей нередко

удельную мощность приходится ограничивать из соображений не энергетики, а магнитогидродинамики, так как при увеличении удельной мощности растет и высота мениска, как видно из формулы (7). Поэтому в России и за рубежом разрабатываются конструкции и схемы тигельных печей с плоской поверхностью зеркала ванны.

Наиболее распространенный способ уменьшения высоты мениска состоит в расположении верхнего края индуктора ниже зеркала ванны. Этот способ применяется, например, в печах для плавки алюминия, для которых особенно важно ослабить циркуляцию на зеркале ванны, чтобы предотвратить взламывание тугоплавкой окисной пленки. При такой конструкции поле в верхней части ванны ослабляется, и циркуляция вблизи оси тигля не достигает поверхности. В результате зеркало ванны становится почти плоским. Однако эта конструкция имеет существенный недостаток. Ослабление поля в верхней части ванны приводит к снижению выделяющейся в этой зоне мощности, вследствие чего в процессе расплавления куски шихты в верхней части тигля свариваются, образуя «мост», под которым расплавленный металл перегревается. Поэтому в печах с низким расположением индуктора плавку ведут, тщательно осаживая шихту, чтобы не допустить образования мостов.

Предложен ряд схемных решений для улучшения циркуляции металла в индукционной тигельной печи.

Индуктор может быть разбит на несколько секций. В период расплавления включаются все секции, обеспечивая равномерное распределение мощности и быстрое расплавление шихты без образования мостов, в рафинировочный же период плавки верхняя секция отключается, и электродинамическая циркуляция у поверхности ванны ослабляется, высота мениска уменьшается.

Большой интерес представляет двухконтурная схема питания индуктора печи ИП (рис. 3.28), позволяющая перераспределять мощность и электродинамические силы по высоте ванны путем регулирования емкости конденсаторных батарей  $C_1$  и  $C_2$ , включенных параллельно верхней и нижней половинам индуктора.

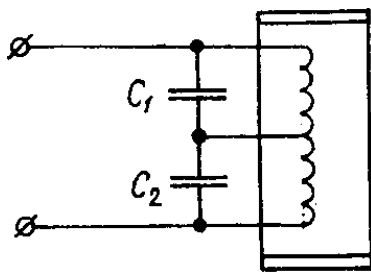


Рис. 3.28. Двухконтурная схема питания индуктора тигельной печи

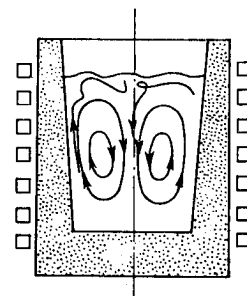


Рис. 3.29. Одноконтурная циркуляция металла в индукционной печи с

## бегущим полем

Радикальным решением проблемы улучшения электродинамического перемешивания металла в тигельной печи, правда, ценой значительного усложнения системы ее питания является осуществление одноконтурной циркуляции с помощью бегущего поля. В такой печи металл перемешивается во всем объеме ванны, а поверхность его остается почти плоской (рис. 3.29). Бегущее поле, оказывающее силовое воздействие на расплав, создается многофазным током низкой частоты (16 или 50 Гц), а энергия для нагрева передается в садку на более высокой частоте, т. е. печь является двухчастотной. Нагрев и перемешивание могут производиться одновременно или поочередно. В первом случае используются отдельные индукторы — однофазный для нагрева и многофазный для перемешивания, оборудованные фильтрами для защиты источника одной частоты от проникновения другой частоты. Во втором случае печь имеет один секционированный индуктор, подключаемый поочередно с соответствующими переключениями к различным источникам питания.

### 3.3.1 Расчет и проектирование индукционных канальных печей

Существуют два основных метода расчета индукционных канальных печей. Один из них основан на теории поглощения электромагнитных волн в металле. Этот метод предложен А.М.Вайнбергом и изложен в монографии «Индукционные канальные печи» [2]. Второй метод основан на теории трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания. Одними из авторов этого метода являются С.А.Фардман и И.Ф.Колобнев [3]. Этот метод нашел широкое применение как инженерный метод расчета индукционных канальных печей [6, 7, 17].

В данной главе приводятся последовательность инженерного электрического расчета с элементами расчета по [3] индукционно-канальной печи и примеры расчета по отдельным этапам.

Схема инженерного расчета индукционной канальной печи приведена ниже.

Как правило, в качестве исходных данных для расчета принимаются [3]:

*характеристики расплавляемого металла или сплава:*

- температура плавления и разливки;
- плотность в твердом и расплавленном состоянии;
- теплосодержание или энтальпия сплава при температуре разливки (зависимость энтальпии от температуры показана на рис. 3.30) или теплоемкость и скрытая теплота плавления;
- удельное сопротивление в твердом и расплавленном состоянии (зависимость удельного сопротивления от температуры показана на рис. 3.31);

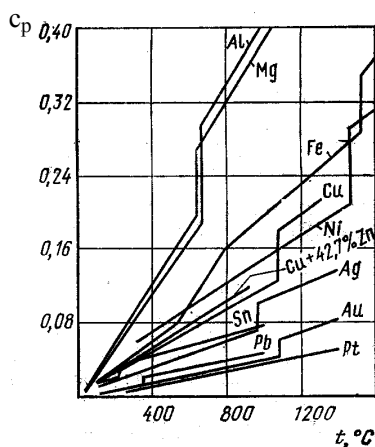


Рис. 3.30. Энтальпия различных металлов

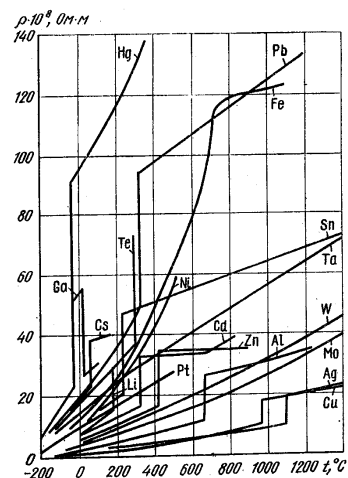


Рис. 3.31. Зависимость удельного электрического сопротивления



**- характеристики печи:**

- **назначение печи;**
- **емкость печи;**
- **производительность печи;**
- **длительность плавки и длительность загрузки и разливки;**

**- характеристики питающей сети:**

- **частота питающей сети;**
- **напряжение сети или напряжение вторичной обмотки электропечного трансформатора, питающего печь.**

**3.3.1.1 Определение емкости печи**

Полная емкость печи  $G$  состоит из полезной (сливаемой) емкости  $G_n$  и остаточной емкости (емкости болота)  $G_\sigma$  [3]

$$G = G_n + G_\sigma, \text{ кг.}$$

Принцип действия канальной печи требует наличия постоянно замкнутой вторичной цепи. Поэтому все канальные печи работают с остаточной емкостью, составляющей обычно 20 – 50 % полной емкости печи и обеспечивающей постоянное заполнение канала жидким металлом.

Остаточная емкость (емкость болота)

$$G_\sigma = k_\sigma G, \text{ кг,}$$

где  $k_\sigma$  - коэффициент, учитывающий остаточную емкость (массу болота). Этот коэффициент принимают равным 0,2 – 0,5; причем меньшие значения - для печей емкостью более 1 тонны, а большие - для печей емкостью менее 1 тонны.

Полезная емкость (сливаемая емкость)

$$G_n = \frac{A_n \cdot 10^3}{m_n}, \text{ кг,}$$

где  $A_n$  - суточная производительность печи в тоннах (т/сутки);

$m_n$  - число плавов в сутки.

Число плавов в сутки

$$m_n = \frac{24}{\tau_1 + \tau_2},$$

где  $\tau_1$  - длительность плавки и подогрева жидкого металла в часах,

$\tau_2$  - длительность разливки, загрузки, чистки и т.д. в часах.

Следует отметить, что значение величины производительности весьма относительно. В справочной литературе значения производительности даются ориентировочно [4, 5, 8].

Длительность плавки и подогрева жидкого металла ( $\tau_1$ ) зависит от физических свойств (теплоемкости и скрытой теплоты плавления) расплавляемых металлов и сплавов. Повышение производительности связано с уменьшением величины  $\tau_1$ , что ведет к повышению подводимой к печи мощности, и влияет на конструкцию печи, т.е. вместо однофазной печи необходимо будет разрабатывать трехфазную печь, вместо одной индукционной единицы необходимо будет использовать несколько индукционных единиц и т.д.

С другой стороны, увеличение  $\tau_1$  может нарушить технологический процесс плавки металла или сплава, например, легирующие добавки могут испариться до процесса разливки.

В зависимости от вида загружаемой шихты, скорости отливки, размера сечения отливаемого слитка и т.д. величина  $\tau_2$  также может изменяться в довольно широком диапазоне.

Поэтому при проведении расчетов необходимо величину производительности оценивать с учетом как технологии плавки металлов или сплавов, так и конструктивных особенностей разрабатываемой печи.

Если задана полезная емкость печи, то полная емкость определяется по выражению

$$G = G_n / (1 - k_{\sigma}), \text{ кг.}$$

### 3.3.1.2 Объем ванны печи, заполняемый жидким металлом (сливаемым)

Объем ванны печи

$$V_{en} = \frac{G}{\gamma_{мж}}, \text{ м}^3,$$

где  $\gamma_{мж}$  - плотность металла в жидком состоянии, кг/м<sup>3</sup>.

Сечение ванны печи  $S_{en}$  определяется после расчета канала печи. Высота ванны печи  $h_{en}$  определяется по выражению

$$h_{en} = \frac{V_{en}}{S_{en}}, \text{ м.}$$

### 3.3.1.3 Выбор формы ванны печи

По форме ванны различают четыре основных класса канальных печей:

*Шахтного* типа – плавильная камера выполнена в виде вертикального цилиндра (рис. 3.3, а), т.е. шахтная печь имеет ванну в форме цилиндрической шахты с вертикальной осью. Преимущества: простота ремонта и замены футеровки ванны и удобство механизированной загрузки печи.

*Барабанного* типа – плавильная камера выполнена в виде горизонтального цилиндра, т.е. ванна барабанной печи выполнена в виде цилиндра с горизонтальной осью. Индукционные единицы располагаются по обе стороны барабана. Может использоваться в качестве электромиксера или копильника жидкого металла для подогрева и выравнивания его температуры перед разливкой, когда объем отливки больше емкости плавильной печи, допускающих одновременно заливку и разливку металла (рис. 3, б);

Ванна может наклоняться в обе стороны вокруг горизонтальной оси. Можно менять индукционные единицы без полного слива металла.

*Двухкамерного* типа – горизонтальные или наклонные каналы соединяют две ванны, одна из которых является плавильной, а другая разливочной. Каналы вместе с примыкающими участками ванн образуют замкнутый вторичный виток (рис. 3, в).

*Печи с прямоугольной ванной* – такая конструкция применяется редко: при стационарной ванне, когда печь не должна опрокидываться, а жидкий металл, такой как цинк, может быть легко вычерпан из печи или же выкачан, если форма ванны определяется технологическими соображениями (рис. 3.32, г).

Различаются печи с вертикальными, горизонтальными и наклонными каналами.

Печи с вертикальными каналами широко распространены. Перемешивание в них происходит интенсивно, производить чистку каналов несложно. Недостатком конструкции, особенно при достаточной глубине ванны, является большое гидростатическое давление в канале, ухудшающее условия работы подового камня.

Печи с горизонтальными каналами характеризуются малым гидростатическим давлением в канале, циркуляция металла в верхней части ванны ослаблена. Очистка каналов в таких печах затруднена.

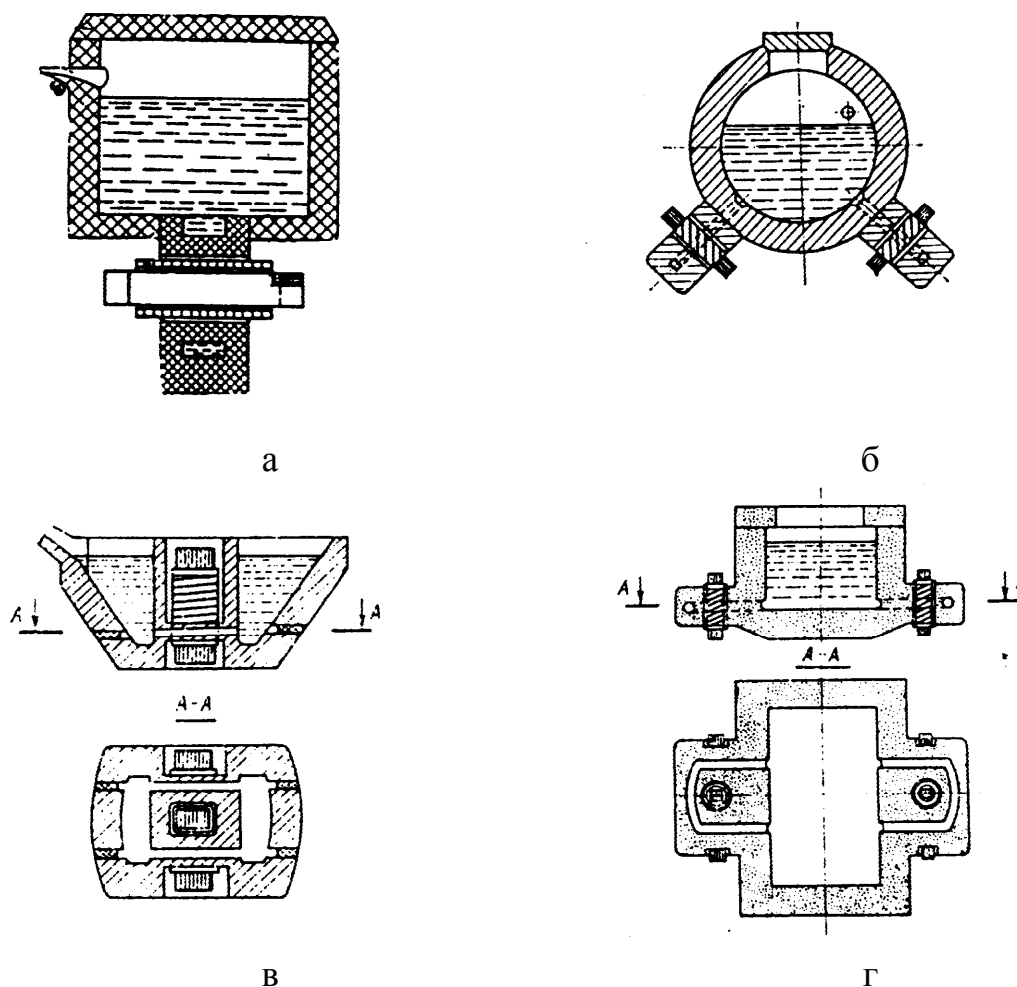


Рис. 3.32. Основные типы конструкций индукционных каналных печей:

а - шахтная; б – барабанная; в – двухкамерная; г – с ванной прямоугольной формы

Печи с наклонными каналами можно рассматривать как компромиссную конструкцию, сочетающую качества печей с вертикальными и горизонтальными каналами.

На рис. 3.33 [20] представлены конструктивные варианты исполнения каналов индукционных каналных печей.

Для плавки меди и ее сплавов при загрузке до 3 тонн применяют шахтные печи, а при загрузке более 3 тонн – барабанные печи и миксеры, их максимальная емкость достигает 35 тонн.

Для плавки цинка, как правило, используют печи с прямоугольной ванной небольшой глубины, индукционные единицы которых имеют

горизонтальные каналы. Ванна разделяется на плавильную и разливочную камеры внутренней перегородкой.

Для плавки алюминия используются печи, как с вертикальными каналами, так и с горизонтальными каналами. Емкость печей от 0,2 до 40 тонн.

Для плавки чугуна применяются шахтные печи емкостью до 16 тонн. Печи большей емкости бывают шахтные, но чаще барабанного типа. В основном находят применение индукционные каналные печи в качестве миксеров, емкость которых лежит в пределах от 0,5 до 250 тонн.

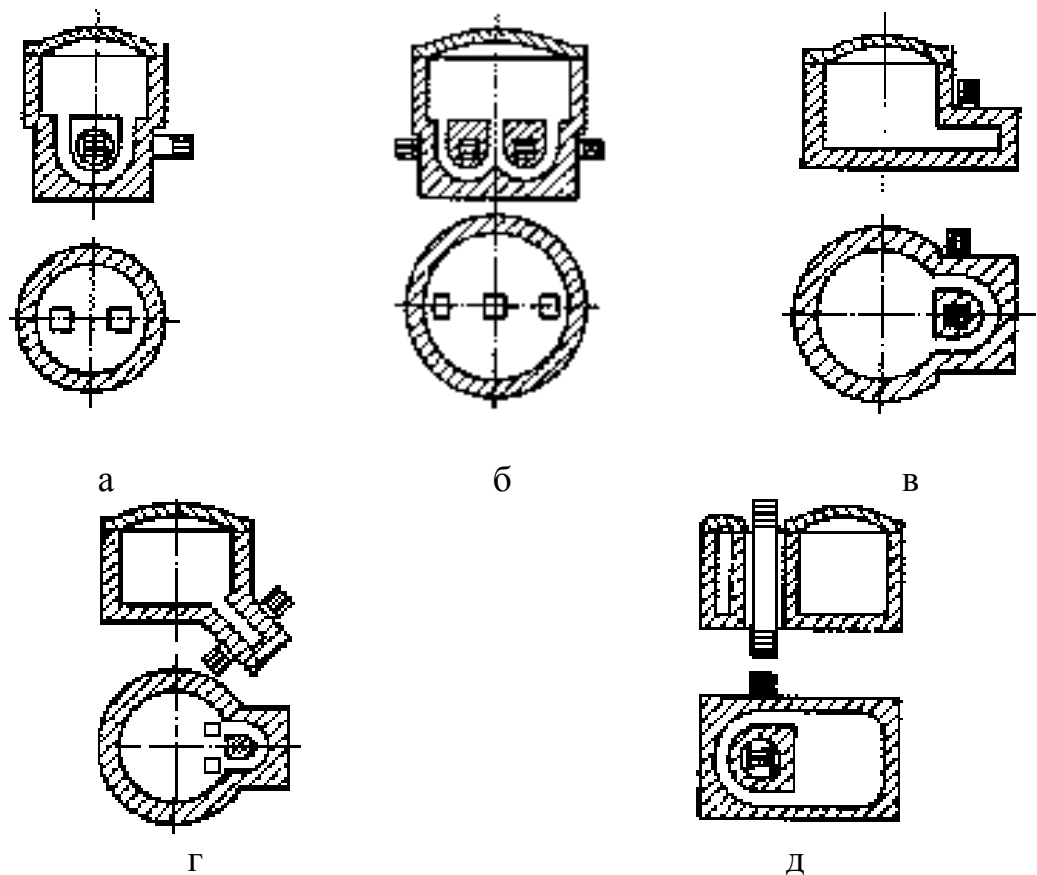


Рис. 3.33. Конструктивные варианты типов каналов индукционных каналных печей:

- а – один вертикальный канал; б – вертикальный сдвоенный канал;  
 в – горизонтальный канал; г – наклонный канал; д – открытый канал

#### 3.3.1.4 Определение мощности печи

На рис. 3.34 представлена в общем виде энергетическая диаграмма электротермической печи.

Для оценки полезной мощности необходимо знать количество тепловой энергии, достаточной для осуществления технологического процесса плавки металла или сплава.

Расчет тепловой энергии с использованием теплоемкости  $C$  и скрытой теплоты плавления  $\lambda$  представлен в виде трех составляющих на блок-схеме, приведенной ниже.



Рис. 3.34. Энергетическая диаграмма электротермической печи

Полезная активная мощность печи может быть определена через теплосодержание [7]

$$P_{\text{пол}} = \frac{Q}{3,6\tau_1} \Rightarrow$$

$$P_{\text{пол}} = G_n(q_2 - q_1)/3,6\tau_1, \text{ Вт},$$

где  $Q$  - количество тепловой энергии, необходимой для расплавления металла или сплава;

$G_n$  - полезная емкость печи, т;

$q_1$  и  $q_2$  - начальное и конечное удельное теплосодержание металла, Дж/кг<sup>2</sup>;

$\tau_1$  - длительность плавки и подогрева жидкого металла, ч.

Подводимая к печи активная мощность

$$P_n = P_{\text{пол}} + \Delta P_{m.в} + \Delta P_{m.и} + \Delta P_u, \text{ Вт},$$

$$P_n = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_n}, \text{ Вт},$$

где  $\Delta P_{m.в}$  - тепловые потери ванны печи,

$\Delta P_{m.и}$  - тепловые потери индукционных единиц,

$\Delta P_u$  - тепловые потери в меди индуктора,

$\eta_n$  - общий коэффициент полезного действия (КПД) печи.

Общий КПД печи

$$\eta_n = \eta_{\text{э}}\eta_m = P_{\text{пол}}/P_n,$$

где  $\eta_{\text{э}}$  - электрический КПД печи,

$\eta_m$  - тепловой КПД печи.

<sup>2</sup> По [16] теплосодержание – количество тепловой энергии, содержащейся в теле при определенной температуре. Удельное теплосодержание – количество тепловой энергии, отнесенное к единице массы тела. Единица измерения в системе «СИ» - Дж/кг, в практических расчетах Вт·ч/кг. По [14] 1Дж =  $2,78 \cdot 10^{-4}$  Вт·ч;

$$\frac{\text{Дж}}{\text{т}} = \frac{2,78 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} = \frac{1}{3,597} \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}.$$

На начальном этапе в предварительном расчете значением  $\eta_n$  обычно задаются в пределах  $0,6 \div 0,9$  в зависимости от емкости, мощности и назначения печи по известным из практики данным (табл. 3) [3]. Более высокие значения КПД относятся к печам большей емкости.

Таблица 3.3

Ориентировочные значения коэффициента полезного действия индукционных канальных печей

Расплавляемый металл	Медь	Томпак (90%Cu +10%Zn)	Латунь (67,5%Cu +32,5%Zn)	Бронза (93%Cu +3%Zn + 4%Sn)	Алюминий	Цинк	Чугун
Общий КПД печи	0,60 – 0,72	0,75 – 0,85	0,75 – 0,90	0,70 – 0,80	0,60 – 0,85	0,80 – 0,90	0,80 – 0,86

Величину подводимой к печи активной мощности также можно определить через энтальпию по выражению [6]

$$P_n = \frac{G_n c_p}{\tau_1 \eta_n}, \text{ Вт,}$$

где  $G_n$  - полезная емкость печи, кг;

$c_p$ <sup>3</sup> - энтальпия металла или сплава при температуре разливки, Вт·ч/кг.

Если величина теплосодержания (энтальпия) не известна, то подводимая к печи мощность определяется в соответствии с блок-схемой по выражению [3]

$$P_n = \frac{Q_m}{864 \eta_n \tau_1}, \text{ кВт,}$$

где  $Q_m$  - тепло, теоретически необходимое для расплавления и доведения до температуры разливки  $G$  кг сплава, [ккал].

<sup>3</sup> Энтальпия – тепловая функция, теплосодержание [3, 6, 11, 16]



В свою очередь величина  $Q_m$  определяется по выражению

$$Q_m = Q_1 + Q_2 + Q_3, \text{ ккал,}$$

где  $Q_1$  - тепло, необходимое для нагрева сплава массой  $G$  кг при теплоемкости  $C_1$  от начальной температуры  $t_n$  до температуры плавления  $t_n$ , ккал;

$Q_2$  - тепло, необходимое для перевода сплава массой  $G$  кг при  $t_n$  в расплавленное состояние при скрытой теплоте плавления  $\lambda$ , ккал;

$Q_3$  - тепло, необходимое для доведения сплава массой  $G$  кг при теплоемкости  $C_2$  от температуры плавления  $t_n$  до температуры разливки  $t_p$ , ккал.

$$Q_1 = GC_1(t_n - t_n),$$

$$Q_2 = G\lambda,$$

$$Q_3 = GC_2(t_p - t_n).$$

Опыт расчетов показывает, что значения подводимой к печи активной мощности, рассчитанные по выражениям (8, 10, 12, 13), имеют расхождения.

Полная мощность печи

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi}, \text{ В}\cdot\text{А,}$$

где  $\cos \varphi$  - коэффициент мощности индукционной канальной печи.

При предварительном расчете коэффициентом мощности печи обычно задаются в зависимости от расплавляемого металла или сплава, для которого предназначена печь. В табл. 3.5 приведены ориентировочные значения, подтвержденные практикой эксплуатации, коэффициентов мощности индукционных канальных печей по [3, 7] без компенсации реактивной мощности, предназначенных для плавки некоторых металлов и сплавов.

Активная мощность одной индукционной единицы

$$P = P_n/n, \text{ Вт,}$$

где  $n$  - число индукционных единиц (индукционной единицей называется система, состоящая из печного трансформатора и подового камня с каналами).

Число индукционных единиц выбирают, исходя из мощности печи с учетом условий их размещения при принятой конструкции ванны. Мощность однофазной единицы может достигать от 50 до 1000 кВт, но во избежание несимметрии напряжений питающей сети уже при мощности печи 250 – 300 кВт рекомендуется [3, 7] переходить к двухфазным или трехфазным единицам либо применять несколько однофазных единиц.

Полная мощность одной индукционной единицы

$$S = P / \cos \varphi, \text{ В}\cdot\text{А}.$$

### 3.3.2 Расчет и проектирование индукционной тигельной печи

Вопросы проектирования ИТП широко раскрыты многими авторами, однако предложенные методики расчета все же отличаются друг от друга, в них даются различные рекомендации по выбору тех или иных параметров печи. Поэтому предложенные методики имеет смысл обобщить, выработать общие рекомендации по проектированию ИТП и сопутствующих устройств (шинопроводов, батарей конденсаторов, систем охлаждения).

В техническом задании на проектирование плавильной установки с индукционной тигельной печью содержатся следующие данные:

1. О расплавляемом металле или сплаве:
  - а) наименование,
  - б) марка,
  - в) состав,
  - г) плотность в твердом и жидком состояниях, насыпная плотность,
  - д) температуры плавления и разлива,
  - е) теплосодержание (энтальпия) или теплоемкость в зависимости от температуры,
  - ж) удельное сопротивление в зависимости от температуры,
  - з) гранулометрический состав шихты (средний размер кусков).
2. Требуемая производительность или требуемое время цикла плавки и режим плавки (с несливаемым остатком или "болотом" или полным сливом перед каждой новой загрузкой).
3. Параметры питающей сети:
  - а) напряжение,
  - б) ограничение по мощности,
  - в) ограничение по частоте.

Последние данные необходимы для выбора напряжения двигателя и способа его запуска при питании от машинного преобразователя частоты или выбора первичного напряжения входного силового трансформатора при питании печи от других источников, а также для решения вопроса о применении симметрирующего устройства для печей частоты 50 Гц.

Кроме вышеперечисленных исходных данных, при проектировании может быть дано ограничение на габаритные размеры плавильного комплекса, если проектирование ведется для конкретного предприятия и для конкретного технологического участка, имеющего конечные размеры.

Задачами проектирования являются выбор оптимальной конструкции печи, определение ее размеров, электрических параметров и технико-экономических показателей, разработка системы охлаждения и механизмов печи, а также подбор комплектующего оборудования: источника питания, компенсирующей конденсаторной батареи, коммутирующей и измерительной аппаратуры, устройств автоматизации, гидравлических или электрических приводов механизмов печи и т. д.

Индукционная тигельная печь является совокупностью ряда систем, каждая из которых требует расчета:

1) тепловой системы, в которой наряду с полезным теплом имеются тепловые потери различных видов, требующие отвода без перегрева конструкций;

2) электромагнитной системы, предназначенной для эффективной передачи энергии в загрузку и преобразования ее в тепловую;

3) механической системы, детали и узлы которой испытывают нагрузки и должны проверяться на прочность;

4) гидравлической системы, которая должна обеспечить расчетный расход воды для охлаждения индуктора, а иногда и других элементов конструкции печи при питании, как правило, от источника технической воды с определенными параметрами, входящего в замкнутую схему оборотного водоснабжения.

Методика расчета механических систем не является специфической для индукционных тигельных печей. Поэтому ниже изложены лишь вопросы, относящиеся к определению параметров остальных систем тигельной печи.

Часто при проектировании в расчетах отталкиваются от уже имеющихся в наличии систем плавильного комплекса. Например, имеется готовый преобразователь частоты, который планируется использовать для питания печи, известны его мощность, напряжение и частота; требуется спроектировать печь требуемой производительности или требуемой емкости. Или, наоборот, имеется печь с известными габаритами и к ней необходимо подобрать преобразователь частоты с учетом обеспечения режима плавки, т.е. технологических условий дальнейшей работы печи. Пути, по которым следует пойти проектировщику, разнообразны и зависят от исходных данных. Очевидно, что в рамках данного пособия трудно раскрыть каждый из путей, так как вариантов комплекта исходных данных может быть достаточно много. Поэтому ограничимся лишь некоторыми из них:

1. Известны параметры технологического процесса. Требуется спроектировать печь и выбрать преобразователь частоты или симметрирующее устройство.

2. Известны параметры имеющегося в наличии преобразователя, а также параметры технологического процесса. Требуется спроектировать печь.

Внутри этих вариантов при раскрытии словосочетания "параметры технологического цикла" могут быть подварианты. Например, в одном случае следует спроектировать печь для работы в практически непрерывном производстве. Остановки печи производятся лишь для ремонта футеровки. В этом случае печь, очевидно, будет работать с "болотом", питаясь от источника промышленной частоты, так как такой режим обеспечит максимальную производительность. В другом случае, печь включают относительно редко. Тогда печь всегда работает с кусковой загрузкой, в начале плавки холодной, и поэтому при проектировании необходимо рассчитать печь таким образом, чтобы она имела максимальную мощность при наложенных на расчет ограничениях. В этом случае такой параметр, как максимальная производительность печи, отходит на второй план, поскольку печь за весь период эксплуатации в таком режиме никогда ее не достигнет.

Итак, в большинстве случаев проектирование индукционной тигельной печи можно разбить на следующие этапы:

1. Определение основных геометрических размеров печи.
2. Тепловой расчет печи и определение энергетических параметров печи.
3. Электрический расчет печи.
4. Расчет сопутствующих устройств плавильного комплекса (расчет и выбор батареи компенсирующих конденсаторов колебательного контура печи, расчет жестких стационарных и гибких шинопроводов, гидравлический и теплотехнический расчет системы охлаждения печи).

### 3.3.2.1. Определение основных геометрических размеров печи

В задании на проектирование могут быть указаны либо полезная емкость тигля  $G$  (в тоннах) и время плавки, либо суточная (сменная) производительность  $M_{сут}$  ( $M_{см}$ ), время плавки и время загрузки и разливки. Во втором случае полезная емкость тигля определяется по формулам:

$$G = M_{сут} \frac{(\tau_{пл} + \tau_{до})}{24}$$

$$G = M_{см} \frac{(\tau_{пл} + \tau_{до})}{\tau_{см}}$$

где  $\tau_{см}$  – продолжительность смены, ч;

$\tau_{пл}$  – время плавки, ч;

$\tau_{до}$  – время дополнительных операций (загрузки и разливки), ч.

Если печь работает с остаточной емкостью, то величина остаточной емкости для большинства печей промышленной частоты при плавке малогабаритной шихты составляет (60÷80)% от полной емкости печи. В этом случае, если задана суточная производительность и время цикла, емкость печи можно определить по формуле

$$G = \frac{M_{сут} (\tau_{пл} + \tau_{до})}{1 - G_{бол}^{отн} \tau_{см} \cdot n_{см}},$$

где  $G_{бол}^{отн} = \frac{G_{бол}}{G} = 0,6 \div 0,8$  - относительная емкость "болота";

$n_{см}$  - число смен работы печи в сутки.

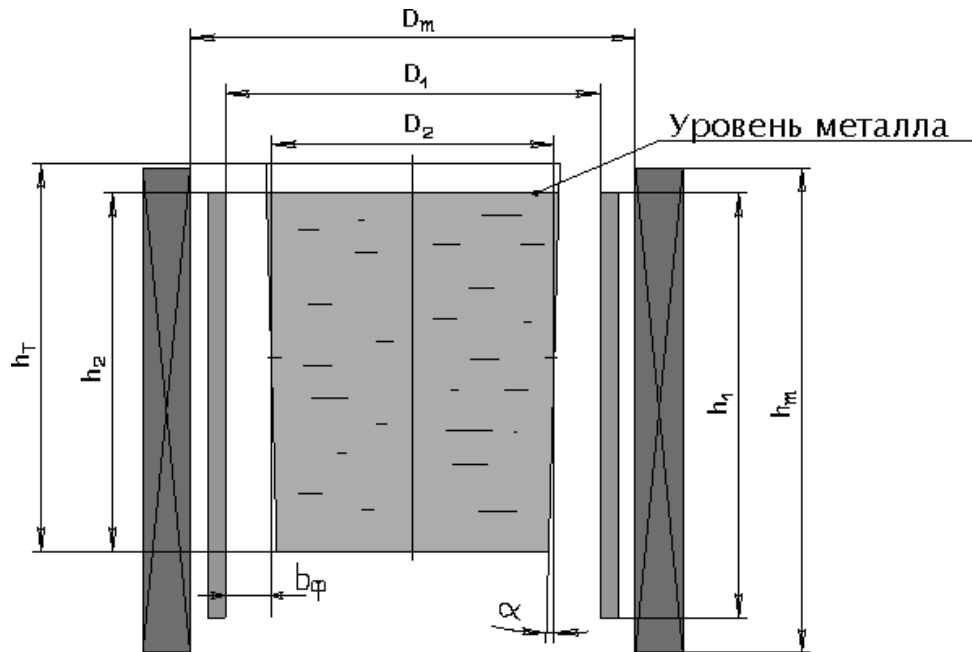


Рис. 3.35. Эскиз индукционной тигельной печи

По весу загрузки или садки определяется полезный объем тигля, м<sup>2</sup>

$$V_T = \frac{G \cdot 10^3}{\gamma_{уд}},$$

где  $\gamma_{уд}$  - плотность расплавленного металла, кг/м<sup>3</sup>.

Для расчета основных размеров элементов печи (рис. 3.35) разные авторы дают различные рекомендации. Это вызвано главным образом

совершенствованием футеровочных материалов, применяемых в электропечестроении. В целом рекомендации по выбору толщины стенки футеровки и соотношения высоты и внутреннего диаметра тигля у разных авторов находятся в одном диапазоне.

Наиболее простую формулу для определения необходимой толщины стенки футеровки,  $m$ , дает А.Н. Вайнберг [3.4]:

$$b_{\phi} = (6 + G) \cdot 10^{-2}.$$

Формула, которая дает несколько большее значение, относительно (3.4) предложена в книге Н.И. Фомина, Л.М. Затуловского [3.2]:

$$b_{\phi} = 0,084\sqrt{G}.$$

Наиболее полную картину дают графики, предложенные А.Е. Слухоцким [3.1], по которым можно определить соотношения основных геометрических размеров элементов печи. Эти графики изображены на рис. 3.36.

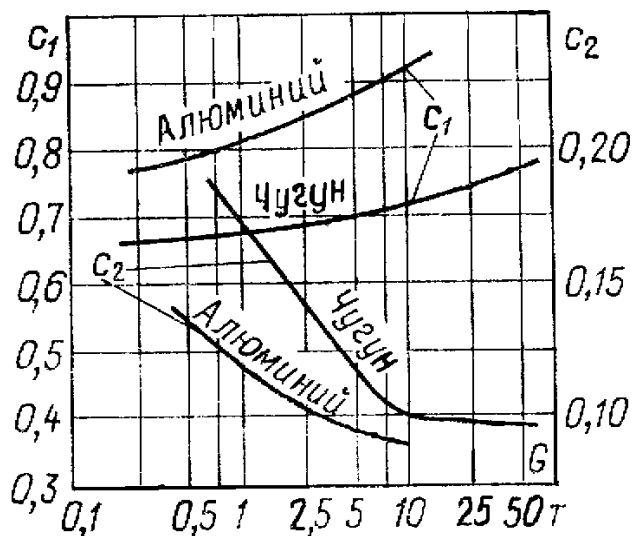


Рис. 3.36. Оптимальные значения коэффициентов геометрии тигля

На рис. 3.36 обозначено:

$c_1 = \frac{D_2}{h_2}$  - соотношение среднего диаметра тигля и высоты металла в нем;

нем;

$c_2 = \frac{b_{\phi}}{D_2}$  - соотношение толщины футеровки и внутреннего диаметра тигля.

ТИГЛЯ.

Для полного описания геометрии печи рекомендован еще один коэффициент:

$$c_3 = \frac{h_1}{h_2} - \text{соотношение высоты индуктора и высоты металла в тигле.}$$

Выбор значений коэффициентов  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$  основывается на технико-экономических факторах. Для удобства ведения металлургического процесса и из условия минимизации тепловых потерь диаметр и глубина загрузки должны быть приблизительно одинаковыми; для повышения же электрического КПД следует увеличивать высоту загрузки, уменьшая диаметр (пока сохраняется достаточно большое отношение радиуса садки к глубине проникновения тока). Требования к толщине футеровки также противоречивы: с ее увеличением термический КПД печи растет, а электрический падает. Кроме того, толщина футеровки должна быть достаточной для того, чтобы ее механическая прочность обеспечила надежную эксплуатацию тигля. В частности, при наклоне печи вес загрузки переносится с относительно прочной и толстой подины на относительно тонкую стенку тигля.

По соображениям механической прочности внутреннюю поверхность тигля делают не цилиндрической, а конической (см. рис. 3.35) – с углом  $\alpha$  между образующей конуса и осью тигля в пределах 2-5°; при этом толщина стенки растет от поверхности металла к дну тигля в соответствии с ростом гидростатического давления.

В условиях противоречивых требований целесообразно для выбора коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$  применить экономический критерий.

Значения коэффициента  $c_1$  должны лежать в таком диапазоне, чтобы соотношения между диаметром и высотой загрузки были приемлемы с точки зрения удобства ведения плавки. Диапазон значений коэффициента  $c_2$  должен обеспечивать достаточную механическую прочность футеровки. Внутри этих диапазонов оптимальными являются значения коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$ , при которых имеет место максимум полного КПД печи, равного производству электрического и термического КПД.

В результате решения задачи оптимизации с помощью ЭВМ построены графики (рис. 3.36), представляющие собой зависимости оптимальных значений коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$  от емкости печи для черных металлов и алюминия.

Что касается коэффициента  $c_3$ , то с возрастанием его в пределах от 0,5 до 1,5 полный КПД печи повышается, хотя и незначительно. Поэтому коэффициент  $c_3$  следует принимать равным 1,1—1,3, располагая индуктор симметрично относительно загрузки для всех печей, кроме тех, у которых верхний торец индуктора приходится опускать ниже зеркала ванны для ослабления циркуляции металла в верхней части тигля и уменьшения высоты

мениска. В последнем случае в электрическом расчете печи под величиной  $h_2$  следует понимать расстояние от дна тигля до верхнего торца индуктора.

Поскольку угол конусности стенки тигля мал, полезный объем тигля можно рассчитать как объем цилиндра диаметром  $D_2$  и высотой  $h_2$ :

$$V = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} h_2 = \frac{\pi \cdot D_2^3}{4 \cdot c_1},$$

откуда

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot c_1 \cdot V}{\pi}}.$$

Высота загрузки  $h_2$ , толщина футеровки  $b_\phi$ , высота индуктора  $h_1$  и его внутренний диаметр  $D_1$  могут быть легко определены по следующим формулам:

$$h_2 = \frac{D_2}{c_1};$$

$$b_\phi = c_2 \cdot D_2;$$

$$h_1 = c_3 \cdot h_2;$$

$$D_1 = D_2 + b_\phi.$$

Практически те же рекомендации по выбору основных соотношений геометрических размеров элементов печи дают Н.И. Фомин и Л.М. Затуловский [3.2]. Здесь, однако, коэффициент  $c_1$  заменен обратной величиной  $\bar{h}_2$  и представлен графиком (см. рис. 3.37).



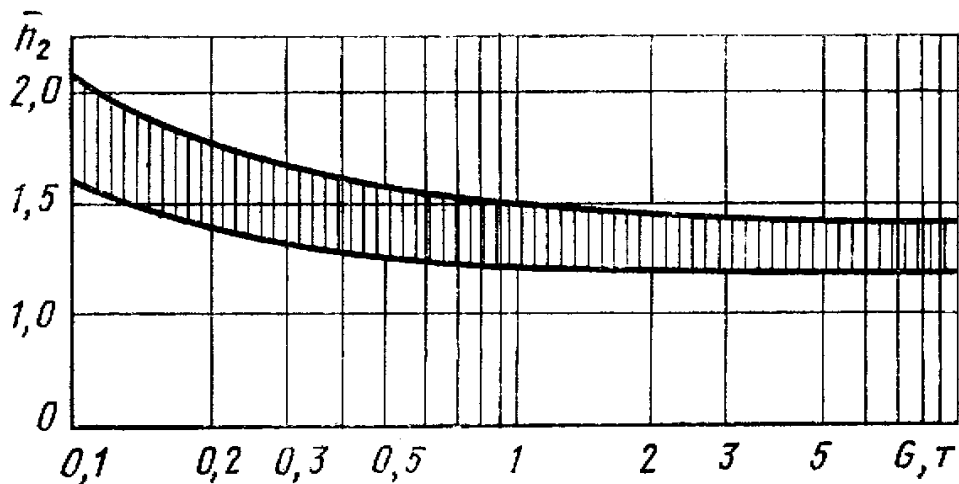


Рис. 3.37. График к определению геометрии тигля

По аналогии с графиком на рис. 3.36, являющимся по сути обратным графиком на рис. 3.37 для коэффициента  $c_1$ , верхние значения – для печей, плавящих относительно легкие металлы, нижние – для стали и чугуна.

Формула для внутреннего диаметра, м, примет вид:

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot \bar{h}_2}}$$

### 3.3.2.2 Тепловой расчет тигельной печи

Задачей теплового расчета является определение температуры наружной поверхности футеровки крышки и подины печи, расчет тепловых потерь и теплового КПД печи.

Для расчета необходимы следующие данные:

- состав футеровки и тип тепловой изоляции;
- геометрические размеры футеровки;
- зависимости теплопроводности каждого из видов футеровочных материалов, применяемых в печи;
- зависимости теплоемкости каждого из видов футеровочных материалов, применяемых в печи<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Этот параметр нужен для определения тепла, накопленного футеровкой за время плавки, если печь работает в режиме, содержащем длительные остановки.

Тепловой расчет печи целесообразно разбить на несколько этапов, так как в различных зонах футеровки наблюдаются физически различные процессы теплопередачи.

### 3.3.2.3 Определение мощности печи

Этот пункт расчета необходим, если неизвестна мощность источника питания для данной печи, т.е. если плавильная установка проектируется в комплексе. Полезную мощность, Вт, необходимую для нагрева шихты до температуры плавления, расплавления загрузки и перегрева расплава до конечной температуры  $t_k$ , зная удельную теплоемкость расплавляемого металла при различных температурах и температуры плавления и разливки металла, можно найти по формуле:

$$P_{пол} = \frac{G[c_{ш}(t_{пл} - t_{ш}) + c_{ж}(t_k - t_{пл}) + q_{пл}]}{t_{пл}},$$

где  $t_{ш}$  – температура загрузки шихты;

$t_{пл}$  – температура плавления шихты;

$t_k$  – температура разливки или температура перегрева металла;

$c_{ш}$  – среднее значение теплоемкости металла в интервале температур от  $t_{ш}$  до  $t_{пл}$ , Дж/(кг·К);

$c_{ж}$  – среднее значение теплоемкости металла в интервале температур от  $t_{пл}$  до  $t_k$ , Дж/(кг·К),

или через энтальпию (теплосодержание) расплавленного и перегретого до конечной температуры металла  $q_k$  :

$$P_{пол} = \frac{G \cdot q_k}{t_{пл}}.$$

При решении обратной задачи, т.е. отталкиваясь в расчетах от имеющегося в наличии преобразователя, определяем время, за которое вся масса металла будет расплавлена и перегрета до конечной температуры.

Зная тепловые потери и необходимую полезную мощность, можно определить активную мощность, которую следует подвести к загрузке, чтобы обеспечить заданные параметры по времени плавки:

$$P_2 = P_{пол} + P_{ТЭ}.$$

Отсюда легко получить тепловой КПД печи:

$$\eta_T = \frac{P_{пол}}{P_2}.$$

Далее следует приближенно оценить величину удельной мощности  $p_{уд}$  разрабатываемой печи и сопоставить ее с предельно допустимым значением для данной частоты.

Предел мощности при заданной геометрии системы индуктор — загрузка обусловлен интенсивностью электродинамических явлений: скоростью циркуляции расплава у стенки тигля и величиной мениска (опасностью возникновения выбросов металла из печи). Предельные значения удельной поверхностной мощности лежат в определенном диапазоне при заданной частоте для различных металлов. Эти значения можно представить в виде графика (рис. 3.38)

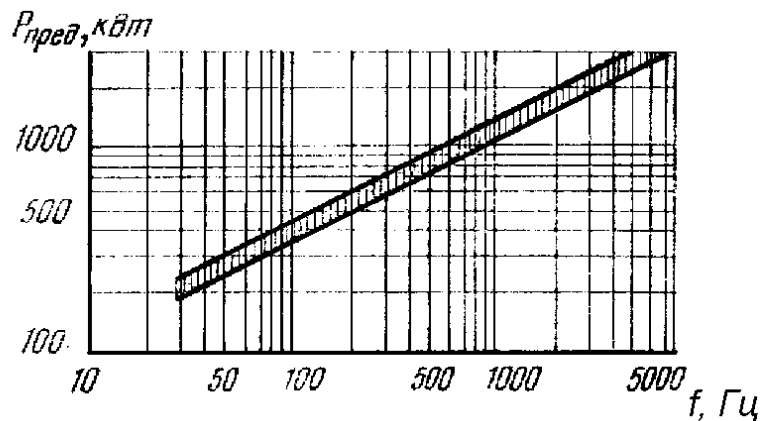


Рис. 3.38. Зависимость предельной мощности печи от частоты питания

В ряде случаев предел мощности обусловлен чисто технологическими требованиями. Так, например, при плавке чугуна в крупных печах удельная мощность ограничивается интенсивностью образования газовых пузырей  $CO$ , способствующих появлению выбросов металла из тигля. При плавке чистого алюминия удельная мощность ограничивается значением, при котором происходит разрыв окисной пленки на зеркале и замешивание ее в металл, ведущее к повышенному содержанию окислов в металле и ухудшающее его качество.

Поэтому при выборе величины  $p_{уд}$  необходимо иметь информацию о целесообразном уровне циркуляции металла и особенностях технологического процесса.

В связи со сказанным необходимо оценить величину  $p_{уд}$ , Вт/кг:

$$P_{y\partial} = \frac{P_2}{\eta_{\partial} \cdot \eta_T \cdot G},$$

где  $\eta_{\partial}$  - электрический КПД тигельной печи (при плавке алюминия можно принять  $\eta_{\partial} = 0,5 \div 0,6$ , при плавке чугуна и стали  $\eta_{\partial} = 0,6 \div 0,7$ ).

Выбор оптимального значения  $P_{y\partial}$  (как и частоты источника питания  $f$ ) следует осуществлять на основании технико-экономических расчетов с учетом упомянутых выше ограничений.

В случаях, если технологией, или исходя из финансовых соображений, исключается возможность снижения мощности печи или увеличения частоты питающей сети, применяются специальные способы снижения электромеханического воздействия на жидкий металл или даже методы, позволяющие управлять движением расплава в печи.

### 3.3.2.4 Выбор частоты питания индуктора

Определение оптимальной частоты питания освещено многими авторами, описывающими проектирование индукционных тигельных печей. Рекомендации по выбору оптимальной частоты практически у всех авторов исходят из максимального электрического КПД печи при минимальной частоте.

Главными критериями при выборе частоты (как и при выборе других параметров) являются экономичность эксплуатации и минимальная величина капитальных затрат.

Показателем экономичности эксплуатации является полный КПД индукционной установки, включающий тепловой и электрический КПД. Так как тепловой КПД не зависит от частоты тока, то достаточно исследовать зависимость электрического КПД установки от частоты. В большинстве случаев тигельные индукционные печи питаются током повышенной частоты, генерируемым специальным преобразователем или (редко) ламповым генератором. Поэтому при определении электрического КПД индукционной установки следует учитывать не только КПД системы индуктор—металл (садка), но и КПД преобразователя частоты. Коэффициент полезного действия машинных преобразователей при возрастании частоты в общем уменьшается вследствие увеличения потерь в стали и меди.

С другой стороны, КПД системы индуктор—металл с увеличением частоты, т. е. с увеличением аргумента  $m_2 = \frac{D_2}{\sqrt{2}\Delta_m}$ , растет (см. гл. 1), хотя при частоте, соответствующей аргументу  $\sqrt{2} \frac{R_2}{\Delta_m} > 3$ , рост КПД замедляется.

Поэтому должно существовать такое значение частоты, которое

обеспечивает максимальную величину общего электрического КПД. Эта частота может быть найдена вычислением полного электрического КПД установки для сравниваемых частот:

$$\eta_{эл.п} = \eta_{эл.п} \cdot \eta_{пр},$$

где  $\eta_{эл}$  — электрический КПД системы индуктор—металл,  
 $\eta_{пр}$  — КПД преобразователя частоты.

Поэтому зачастую при определении оптимальной частоты пользуются формулами, не учитывающими КПД преобразователя частоты .

Приведем, например, следующие формулы:

1. Формула Нортрупа:

$$f_{\min} = 2,5 \cdot 10^7 \frac{\rho}{\mu \cdot D_2},$$

где  $\rho$  - в Ом·м,  $D_2$  - в м, полученная из условия  $\frac{D_2 \sqrt{2}}{2\Delta} \geq 7$ .

2. Формула, приведенная в [3.1], подобная формуле Нортрупа:

$$f_{\min} = \frac{10^6 \rho \cdot F_0}{D_2^2},$$

где  $F_0 = f\left(\frac{D_2}{h_2}\right)$  - функция, выражающая зависимость частоты от отношения диаметра загрузки к высоте и приведенная для равных высот индуктора и загрузки:

$D_2/h_2$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0
$F_0, \text{ м}^2/\text{с}$	3	5,6	8,3	11,3	15,3	19	53

При  $D_2/a_2 = 0,8 \div 1$ , что характерно для тигельных печей, выражению (29) соответствует  $m_2 = \frac{D_2}{\sqrt{2\Delta_m}} \approx 6$ .

3. Формула минимальной частоты для печей с кусковой загрузкой.

В печах, загружаемых кусковой шихтой, в начале плавки индуцированные токи замыкаются внутри отдельных кусков, поскольку они имеют плохой электрический контакт между собой. Для таких печей следует

выбирать приемлемое значение параметра  $\frac{D_{ш}}{\sqrt{2\Delta_{ш}}}$ , где  $D_{ш}$  — средний диаметр кусков шихты, а  $\Delta_{ш}$  — глубина проникновения тока для кусковой шихты в наиболее неблагоприятный момент плавки. Таким является момент, предшествующий сплавлению отдельных кусков шихты в монолит, когда относительная магнитная проницаемость равна единице, а удельное сопротивление существенно возросло по сравнению с исходным холодным состоянием. Приняв для этого момента  $\frac{D_{ш}}{\sqrt{2\Delta_{ш}}} = 2$ , что обеспечивает минимально приемлемые условия нагрева, получим формулу для расчета частоты печей с кусковой завалкой:

$$f_{\min} = 2 \cdot 10^6 \frac{\rho_{ш}}{D_{ш}^2},$$

где  $\rho_{ш}$  — удельное сопротивление расплавляемого материала при температуре, несколько меньшей точки плавления, Ом·м.

Определив  $f_{\min}$ , производят предварительный выбор частоты, исходя из шкалы частот источников питания электротермических установок.

В тех случаях, когда выбор частоты ограничен в связи с наличием определенных источников питания, может оказаться целесообразным изменить гранулометрический состав шихты, увеличив средний диаметр кусков, если это возможно [3.1].

Существует также формула для начального момента времени плавки. Из практики эксплуатации плавильных среднечастотных комплексов известно, что наименьшую активную мощность печь потребляет именно в начальный момент времени, тогда же наблюдается и минимальный электрический КПД печи, поэтому важно правильно оценить минимальную рабочую частоту на этом этапе:

$$f_{\min} = \pi \cdot 10^6 \frac{\rho_{ш}}{\mu_{ш} \cdot D_{ш}^2}$$

Для немагнитной шихты  $\mu_{ш} = 1$ . Для магнитной -  $\mu_{ш} = 1$  будет наблюдаться при температуре шихты, близкой к температуре сплавления кусков [3.2].

Обобщая предложенные рекомендации по выбору частоты питания печи, можно сказать, что при проектировании не стоит ограничиваться одной из формул. Для печей с кусковой загрузкой следует определить частоту как

при температуре перед спеканием кусков шихты, так как малый размер кусков может сильно повлиять на значение оптимальной частоты. После определения частоты по двум формулам: для горячего и холодного состояния шихты, из полученных частот выбирают наибольшую. Применение формулы, учитывающей магнитные свойства магнитной шихты, нецелесообразно при проектировании печи, работающей от источника питания стабильной частоты (например машинного генератора), так как эта формула дает наименьшее значение. При работе же печи от источника питания, ведомого нагрузкой, минимальные частоты на всех стадиях плавки желательнее определить, чтобы знать, при какой частоте на данной стадии режим плавки становится резко неэкономичным.

Во всех перечисленных выше формулах не учитывается зависимость КПД источника питания, КПД и количества конденсаторных батарей, КПД шинпровода от частоты. Поэтому все приведенные выше формулы можно считать лишь ориентировочными.

Влияние частоты на величину капитальных затрат сказывается в том, что стоимость преобразователей частоты и конденсаторной батареи, являющихся основными составляющими стоимости индукционной установки, зависит от частоты. Так как стоимость преобразователя частоты (на 1 кВт) с увеличением частоты растет, а стоимость 1 квар конденсаторной батареи с увеличением частоты, наоборот, снижается, то суммарная стоимость преобразователя и конденсаторной батареи не остается неизменной при изменении частоты. Как доказывают подсчеты, минимальная суммарная стоимость этих двух элементов оборудования соответствует частотам порядка тысяч герц. Поэтому, хотя печи емкостью порядка 250 кг и выше можно питать током частотой 500 Гц и ниже, вплоть до промышленной частоты 50 Гц при электрическом КПД, близком к предельному, тем не менее из соображения удешевления установки для питания печей даже сравнительно большой емкости (порядка 1000 кг) в большинстве случаев применяют частоты не ниже 500 Гц. Для обоснованного выбора частоты следовало бы просчитать два-три варианта печной установки с преобразователями разных частот и, подсчитав общий электрический КПД (с учетом потерь в преобразователе и конденсаторной батарее) и величину капитальных затрат для этих вариантов, выбрать оптимальный вариант [3.4].

### 3.4 Индукционные нагревательные установки

Впервые задача индукционного нагрева металлов для термообработки и ее техническое решение были сформулированы Е. Ф. Northrup в 1918 году. В дальнейшем начались интенсивные исследования в этой области, которые привели к созданию в настоящее время мощной и высоко эффективной промышленной отрасли мирового хозяйства. В России это направление возглавил выдающийся ученый В. П. Вологдин [41]. Современный этап развития отрасли характеризуется наличием в технических университетах и других учреждениях развитых научных школ в области индукционного нагрева, родоначальниками и руководителями которых являются: ЛЭТИ и ВНИИТВЧ (Санкт-Петербург) – В. П. Вологдин, Г. И. Бабат, А. Н. Шамов; УПИ (Екатеринбург) – Н. М. Родигин; СамГТУ (Самара) – Э. Я. Раппопорт; НЭТИ (Новосибирск) – В. С. Чередниченко; МЭИ (Москва) – А. Д. Свенчанский, А. В. Нетушил, М. Г. Лозинский; КГТУ (Красноярск) – В. Н. Тимофеев.

Разработаны научные направления:

- создание аналитических методов расчета электромагнитных индукционных систем и решение тепловых задач, при индукционном нагреве, легших в основу современных численных методов расчета;
- теоретические основы разработки схем источников питания индукционных систем и методов их анализа;
- численные методы анализа электромагнитных процессов.

Необходимо отметить, что уже решено большое количество фундаментальных проблем в области индукционного нагрева металлов. Однако интенсивное развитие промышленного производства ставит все новые теоретические и прикладные задачи, требующие новых подходов, разработки современных методов и методик, а также компьютерных технологий и инструментов для их решения.

#### 3.4.1 Основные понятия и определения в технике индукционного нагрева

Установки индукционного нагрева являются электротермическим оборудованием. *Электротермическим оборудованием (ЭТО)* согласно терминологии, установленной действующими стандартами, называется комплекс технологического оборудования и устройств, для осуществления электротермического процесса. *Электротермический процесс* – технологический процесс тепловых воздействий на загрузку при помощи электронагрева. Кроме ЭТО, различают такие понятия, как электротермическая установка, электропечь, электротермическое устройство и электротермический агрегат. *Электротермическая установка* –



совокупность электротермического и другого технологического оборудования вместе с сооружениями и коммуникациями, обеспечивающими проведение электротермического процесса. *Электротермическое устройство* – часть электротермического оборудования, в которой осуществляется электротермический процесс в открытом рабочем пространстве. *Электротермический агрегат* – совокупность электротермического оборудования и других устройств, объединенных технологическим процессом.

*Индукционное электротермическое устройство* – электротермический агрегат, в котором электротермический процесс осуществляется индукционным нагревом. Под *индукционным* понимают нагрев тел в электромагнитном поле за счет теплового действия электрического тока, индуцированного в нагрузке или промежуточном устройстве (например, в электропроводном тигле) благодаря явлению электромагнитной индукции.

Под *индукционными установками* понимают комплекс устройств, обеспечивающих осуществление электротермического процесса (включая источники питания, устройства автоматики и управления, комплектующее оборудование, токопроводы, некоторые вспомогательные устройства). Индукционная нагревательная установка отличается от плавильной тем, что конечная температура нагрева загрузки всегда ниже температуры плавления материала.

Важнейшим элементом любой *установки индукционного нагрева* (УИН) является *индуктор*, представляющий собой проводник или систему проводников определенной конфигурации, подключаемый к внешнему источнику переменного тока и предназначенный для дистанционного (бесконтактного) наведения в нагреваемом изделии переменного электромагнитного поля и электрического тока, разогревающего изделие. Индуктор обычно навивают из медного провода в виде одновитковой или многовитковой катушки, конструкция которой определяется размерами и конфигурацией нагреваемых изделий, а также требований технологии нагрева. Сами изделия, помещенные в индуктор и подвергаемые индукционному нагреву, принято называть *загрузкой*. В некоторых случаях загрузку целесообразно нагревать, возбуждая электрический ток не непосредственно в ней, а в каком-либо промежуточном устройстве (например, в муфеле или в электропроводном тигле). Такой вид нагрева загрузки называют *косвенным индукционным нагревом*, а печь служащую для его реализации, называют *индукционной печью косвенного нагрева*. На практике используют также понятие *индукционный нагреватель* (ИН). В его состав входят все элементы индукционной установки, кроме источников питания.

Для компенсации реактивной мощности индуктора используют группу силовых конденсаторов, соединенных между собой, как правило,

параллельно, и оформленных в обособленный конструктивный модуль, который принято называть конденсаторной батареей (КБ).

Индуктор, соединенный токопроводом с конденсаторной батареей, образует *силовой резонансный контур* индукционной установки. Упомянутый токопровод, выполняемый обычно в виде пакета шин и кабелей (контурные токи могут составлять несколько десятков тысяч ампер), иногда называют *короткой сетью* установки, по аналогии с короткой сетью дуговых печей.

### 3.4.2 Особенности индукционных установок сквозного нагрева

Особенностью индукционных установок сквозного нагрева для термообработки под пластическую деформацию (прессовка, ковка, гибка, прошивка и прочие), или для химико-термической обработки (закалка, отжиг, правка и другие) является необходимость обеспечения прогрева загрузки по всему объему с определенной допустимой неравномерностью, при минимально возможном времени нагрева и высоких энергетических показателях. Температуры основных процессов металлообработки приведены в таблице 3.4. На рис. 3.39 представлены графики поглощения энергии различными материалами, в зависимости от температуры нагрева.

Таблица 3.4

Температура основных процессов металлообработки

Процесс	<i>Сталь</i>	Сталь нерж. $\mu \gg 1$	Сталь нерж. $\mu = 1$	Ni	Cu	Латунь	Al
Горячая штамповка	1220	1083	1137	1083	890	807	532
Закалка	917	972	–	752	807	642	477
Нормализация	862	807	1027	917	522	532	367
Тепловая штамповка	752	–	642	642	–	–	–
Снятие напряжений	587	587	587	587	257	285	367
Отжиг	312	312	312	312	–	–	–
Упрочнение поверхности	230	230	230	230	230	230	230

При сквозном нагреве обычно применяют способ одновременного нагрева всех заготовок, когда индуктор охватывает всю поверхность детали, подлежащей термообработке, причем во всех точках загрузки нагрев происходит

одновременно. Температура поверхности и ее распределение по глубине зависит от времени нагрева и энергии, передаваемой в деталь за это время.

Малое время нагрева обеспечивают подведением к загрузке индукционно большой удельной мощности. Частоту тока индуктора при сквозном нагреве выбирают достаточно низкой, чтобы существенная часть заготовки (на глубину более 30 % ее радиуса) нагревалась непосредственно током, созданным в поверхностном слое. Внутренний объем заготовки нагревается за счет теплопроводности.

Существует возможность дополнительного сокращения времени нагрева путем соответствующего изменения мощности, подводимой к загрузке в ходе нагрева. Так, например, на рис. 3.39 приведены графики изменения температуры поверхности  $T_0$  и центра  $T_c$  цилиндрической загрузки при обычном индукционном нагреве стальной загрузки, выполняемом при примерно постоянной во времени удельной мощности и при ускоренном нагреве. В последнем случае в начальный период времени к заготовке подводится максимально возможная удельная мощность. Благодаря этому добиваются быстрого нагрева поверхностного слоя до заданной конечной температуры. Образовавшийся значительный перепад температур и соответственно большой тепловой поток между поверхностью и центром заготовки способствует быстрому прогреву внутренних слоев заготовки. В дальнейшем подводимую к заготовке мощность снижают таким образом, чтобы температура поверхности оставалась постоянной и равной заданной конечной величине.

Как видно из рис. 3.39 благодаря управляемому изменению подводимой к загрузке мощности удастся значительно (обычно в 2 – 3 раза) сократить время нагрева загрузки до конечной температуры при заданном перепаде температуры  $\Delta T$  между поверхностью и центром заготовки. Если мощность, передаваемая в загрузку, превышает потери с ее поверхности, и по истечении короткого времени, температура по всему сечению заготовки окажется в заданном интервале, то нагрев прекращают, а заготовку выдают для последующих в технологическом процессе операций. После отключения установки при остывании заготовки температура поверхностного слоя вскоре становится ниже температуры центра.

В отдельных случаях для сокращения времени нагрева и уменьшения удельного расхода энергии используют две различные частоты тока. Двухчастотный нагрев иногда применяют для создания равномерного распределения температуры в загрузке прямоугольного или более сложного поперечного сечения. При индукционном нагреве тепло генерируется непосредственно в нагреваемом объекте и скорость нагрева выше, чем в пламенных печах и печах сопротивления.

### **3.4.3 Особенности индукционного нагрева черных и цветных металлов**

Различные металлы имеют различную восприимчивость к нагреву индукционным методом. Это обусловлено содержанием или отсутствием железа в структуре металла, а также наличием магнитных свойств у нагреваемого металла. Черные металлы за счет содержания в своей структуре железа обладают высоким удельным сопротивлением по сравнению с цветными металлами, удельное сопротивление которых в десятки раз меньше. Наличие магнитных свойств у ряда черных металлов вносит свои особенности в процесс индукционного нагрева [12, 13, 14, 15].

При индукционном нагреве магнитных материалов, таких как углеродистая сталь, по сравнению с немагнитными металлами возникают некоторые специфические аспекты. У магнитных металлов существует две стадии цикла нагрева. На первой стадии, когда магнитная проницаемость нагреваемого металла  $\mu_2$  в любой точке сечения определяется кривой намагничивания, достаточно ярко выражен скин-эффект и эффективность индукционного нагрева обычно достигает 80 – 90%. В начале процесса нагрева глубина проникновения тока в углеродистую сталь увеличивается незначительно из-за увеличения электрического сопротивления металла с ростом температуры. С дальнейшим повышением температуры (около 550 С<sup>0</sup>) магнитная проницаемость стали все больше и больше уменьшается, а при переходе температуры заготовки через точку Кюри (для стали  $\approx 750$  С<sup>0</sup>) сталь теряет свои магнитные свойства.

На второй стадии, когда температура заготовки выше точки Кюри, магнитная проницаемость стали резко падает до единицы. В результате глубина проникновения тока значительно увеличивается (до 15 раз), поверхностный эффект ослабевает, что приводит к понижению электрического сопротивления, а следовательно, и мощности, поглощаемой загрузкой. Вследствие этого эффективность процесса нагрева снижается [16, 17].

Для создания хорошо работающей установки необходимо выявить путем моделирования индукционных процессов ее наилучшие параметры. Критерием для выявления таких параметров является электрический коэффициент полезного действия, который в случае цилиндрического тела может быть найден по выражению:

$$\eta_o = \frac{P_2}{P_2 + P_1} = \frac{1}{1 + \frac{D_1 \cdot l_1}{D_2 \cdot l_2 \cdot F\left(\frac{D_2}{\Delta}\right)} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot \mu_1}{\mu_2 \cdot \rho_2 \cdot g}}}, \quad (3.4)$$

где  $P_2$  и  $P_1$  – мощность в загрузке и мощность потерь в индукторе, Вт;  
 $D_1$ ,  $l_1$  и  $D_2$ ,  $l_2$  – диаметр и длина индуктора и загрузки, м;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельное сопротивление материала индуктора и загрузки, Ом·м;  $g$  –

коэффициент заполнения индуктора и  $F(D_2/\Delta)$  – поправочный коэффициент, зависящий от относительных размеров поперечного сечения загрузки.

В зависимости от частоты тока отношение между диаметром загрузки  $D_2$  и глубиной проникновения  $\Delta$  изменяется, что сильно влияет на процесс нагрева. Если  $\Delta$  очень мала по сравнению с диаметром загрузки  $D_2$ , электрический коэффициент полезного действия весьма высок. С увеличением глубины проникновения или с понижением частоты коэффициент полезного действия уменьшается. При этом распределение температуры по сечению загрузки становится более равномерным [7, 18].

Таким образом, за счет выбора компромиссной частоты, дающей удовлетворительные результаты в отношении расхода электроэнергии для широкого диапазона температур и позволяющей достигать требуемой температуры с заданным температурным перепадом (обычно  $50\text{ C}^0$ ), удается добиться 70-80% коэффициента полезного действия при нагреве стали до температур выше точки Кюри и немагнитных материалов с большим удельным сопротивлением, близким к удельному сопротивлению ферромагнитной стали (немагнитная сталь, никель, титан) [18, 19, 20].

Для немагнитных металлов ( $\mu=1$ ) характерен слабо выраженный поверхностный эффект. В сочетании с высокой удельной электропроводностью таких металлов это приводит к значительному снижению мощности, потребляемой загрузкой, а соответственно, невысокому коэффициенту полезного действия процесса сквозного нагрева цветных металлов [7, 21, 22].

На практике для наиболее распространенных диаметров загрузок с низким удельным сопротивлением (алюминий, латунь, медь) от 125 до 300 мм используют частоту 50 Гц, при которой глубина проникновения тока большая. Фактически нагреватели промышленной частоты применяются для алюминиевых заготовок диаметром от 50 мм. Преимущества работы на промышленной частоте часто превышают неэффективность, связанную с низким КПД. Тем не менее, для каждой установки тщательно проверяется, не может ли преобразовательное оборудование повысить производительность и оказаться выгодным [18, 22].

Опыт разработки и эксплуатации установок индукционного нагрева цилиндрической загрузки позволяет сформулировать рекомендации по выбору частоты нагрева, в зависимости от материала и диаметра загрузки [9, 23]. Указанная зависимость частоты индукционного нагревателя от материала и диаметра загрузки приведена в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Зависимость частоты нагревателя от свойств загрузки

<b>Материал</b>	Сталь магнитная	Сталь немагнитная	Латунь	Медь	Алюминий	Рекомендуемая частота, кГц
Температура, °С	1200	700	800	850	500	
Диаметр загрузки, мм	150–500	27–75	110–	50–	50–	0,05
	60–250	8–35	35–440	22–800	22–800	0,5
	40–175	6–25	30–300	15–600	15–600	1,0
	30–100	3,5–14	15–180	9–350	9–350	2,4
	20–85	2,5–10,5	10–130	7–260	7–260	4,0
	14–60	2–8,5	8–100	5–180	5–180	8,0; 10,0

Однако важное для практики влияние частоты на КПД не является единственно определяющим при индукционном нагреве. Наибольшее влияние на электрический КПД оказывают физические свойства нагреваемых материалов и материала индуктора. Из выражения (3.4) становится ясно, почему индукторы обычно выполняют из немагнитного материала ( $\mu_1 = 1,0$ ) с минимальным удельным электросопротивлением. В этом случае, особенно при нагреве магнитных материалов ( $\mu_2 \gg 1,0$ ) с высоким удельным электросопротивлением ( $\rho_2 \gg \rho_1$ ) достигается высокое значение электрического КПД и, наоборот, нагрев загрузки из немагнитного металла с низким удельным сопротивлением (например, золота, серебра, меди и т. п.) энергетически невыгоден, так как при  $\rho_2 < \rho_1$  КПД не может быть выше 50%, в то время как при нагреве магнитной стали в медном индукторе он может достигать значений, превышающих 90% [24, 25, 26]. Зависимости КПД индуктора от рода нагреваемого материала приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Характерные значения КПД индуктора

Материал	Температура нагрева, °С	КПД
Сталь углеродистая	1250	0,75
Сталь углеродистая	700	0,90
Сталь нержавеющая	1250	0,70

Латунь	800	0,50
Медь	900	0,40
Алюминий	500	0,40

Несмотря на довольно низкий КПД при нагреве цветных металлов индукционный метод наиболее широко распространен по сравнению с другими методами, поскольку обладает такими преимуществами как высокое качество нагрева, уменьшение расхода металла, возможность автоматизации процесса, улучшение условий труда и другими [18, 22, 26].

### 3.4.4 Классификация индукционных нагревателей для сквозного нагрева по принципу действия

По принципу действия индукционные нагреватели разделяют на нагреватели методического (полунепрерывного), периодического и непрерывного действия (рис. 3.40) [50, 89, 105]. В серийном производстве, когда велики партии однотипных заготовок, для нагрева заготовок большого диаметра (свыше 130 мм) обычно используют нагреватели методического действия.

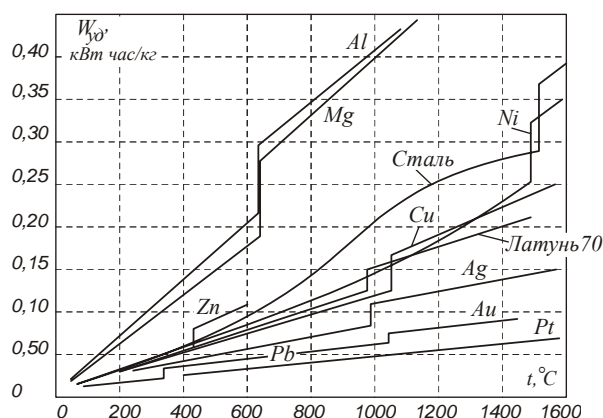


Рис. 3.39. Характеристики поглощения энергии различными материалами

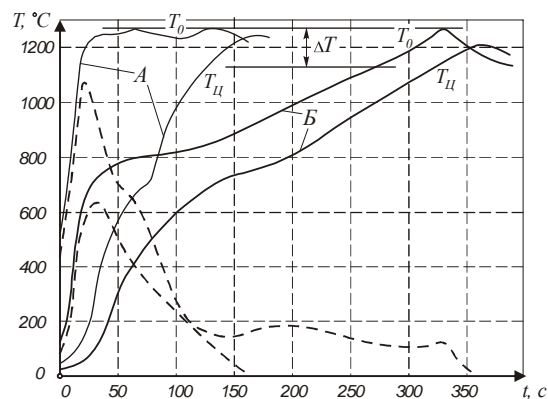


Рис. 3.40. Изменение температуры нагрева стальной магнитной заготовки в процессе обычного (А) и ускоренного индукционного нагрева (Б)

Общий вид методического индукционного нагревателя средней частоты для нагрева мерных заготовок показан на рис. 3.41, а. Заготовки 1 из бункера 2 с отсекателем 4 поступают на исходную позицию перед входом в индуктор 3.

Перемещаемый с помощью привода транспортер с прижимными роликами 5 вводит холодную заготовку в индуктор, продвигая одновременно на один шаг весь находящийся в индукторе ряд заготовок. Последняя нагретая заготовка выходит из индуктора, поступая на разгрузочный лоток /21/.

Нагрев заготовок до конечной температуры в нагревателях полунепрерывного действия осуществляют по мере их продвижения в индукторе с шагом, равным длине заготовки. При введении в индуктор очередной холодной заготовки, уже нагретая до заданной температуры заготовка, выталкивается из индуктора.

В методических нагревателях ускоренного индукционного нагрева для обеспечения режима, индуктор должен иметь переменный шаг навивки. Практически шаг намотки меняется ступенчато. Число ступеней не превышает четырех, и часто ограничивается тремя, а в некоторых случаях двумя ступенями. Температура поверхности загрузки поднимается до конечного значения в течение 10 – 30 % общего времени и далее почти не меняется. При этом необходимо, чтобы на каждом участке размещалось целое число заготовок.

Перебои в работе прессового оборудования являются серьезной трудностью для работы методического индукционного нагревателя. В отличие от печей с внешним источником тепла, где максимальная температура заготовок не превышает заданной температуры в камере печи (установки с резистивным или газовым нагревом), в случае высокоинтенсивного индукционного нагрева при прекращении выдачи нагретых заготовок, необратимо нарушается температурный режим в находящемся в индукторе ряде заготовок. Это приводит к тому, что при относительно длительных паузах приходится полностью освобождать индуктор от частично нагретых заготовок и начинать работу с запуска установки на холодных заготовках. При запуске методического индукционного нагревателя для получения номинального электрического режима индуктор полностью загружают слитками, которые в заданном темпе продвигаются вдоль нагревателя.

Однако все слитки, кроме последнего, не могут быть использованы для обработки давлением, так как они не прошли полного цикла нагрева. Эти слитки называют балластными и применяют лишь для запуска установки. Аналогично, по окончании работы установки не используют находящиеся в индукторе нагретые до различной температуры заготовки [43].

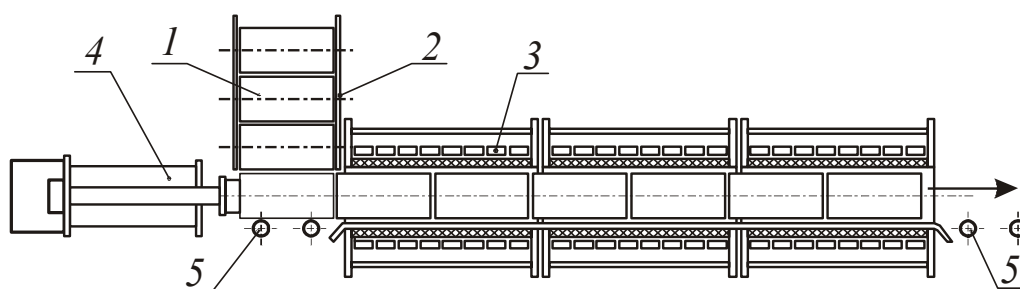
Этих недостатков лишены индукционные нагреватели периодического действия (рис. 3.41, б). Основные элементы в них такие же, как и в нагревателях методического действия. Но такие нагреватели удобнее при мелкосерийном производстве, когда часто требуется переналадка режима нагрева из-за меняющихся размеров заготовок. Кроме того, они допускают



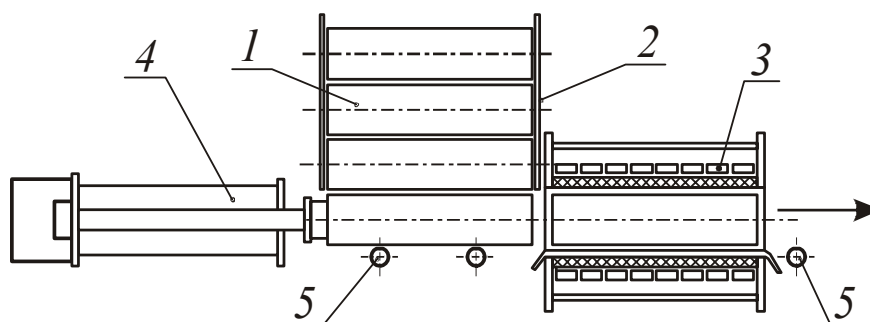
поддержание нагреваемой заготовки в режиме «ожидания» при перерывах в работе технологического оборудования. При нагреве особо крупных слитков в периодических установках легче выполнить теплоизоляцию и механизмы перемещения загрузки.

Нагревательные установки периодического действия обычно состоят из нескольких отдельных ИН, в каждом из которых находится один слиток, и объединены общей системой механизации, питания и управления. Нагретые слитки выдаются к обрабатывающему оборудованию из нагревателей поочередно.

Нагреватели непрерывного действия применяют для нагрева слитков из стали, цветных металлов и сплавов под обработку давлением (рис. 1.5, в). В них заготовка 1 протягивается через индуктор 3 с помощью тянущих клетей 4 и прижимных роликов 5. Нагреватели непрерывного действия, обеспечивают наиболее высокую производительность, полную загрузку источника питания во времени и стабильность электрического режима. Преимуществом таких нагревателей является возможность нагрева заготовок практически неограниченной длины.



а)



б)

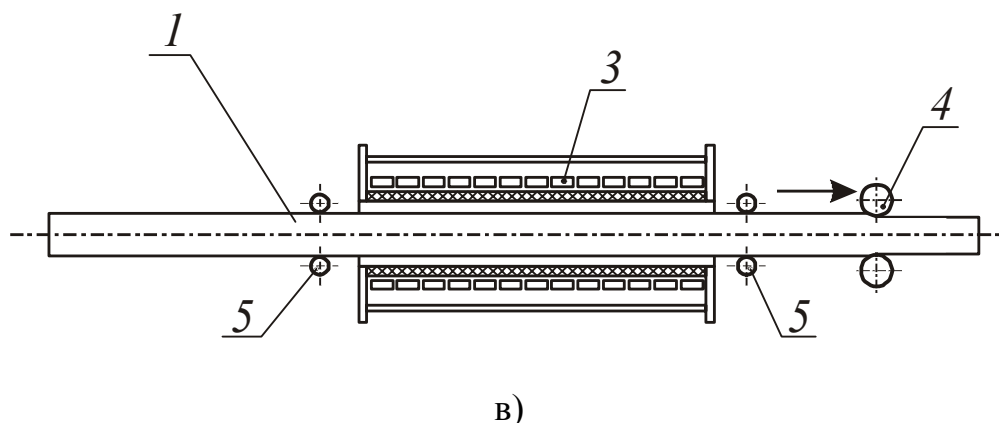


Рис. 3.41. Схемы индукционных нагревателей: методического- (а), периодического- (б) и непрерывного действия (в)

### 3.4.5 Индукторы нагревателей для сквозного нагрева

При сквозном нагреве используют обычно соленоидные многослойные индукторы. Обмотку индуктора изготавливают из медной водоохлаждаемой трубки или медной шинки. В установках средней частоты используют однослойные обмотки, а в установках промышленной частоты обмотка может быть как однослойной, так и многослойной. Это связано с возможным уменьшением электрических потерь в индукторе и с условиями согласования параметров нагрузки и с параметрами источника питания по напряжению и коэффициенту мощности [38].

Для обеспечения жесткости катушки индуктора чаще всего применяют ее стяжку между торцовыми асбоцементными плитами. Иногда вместо этого используют крепление витков индуктора к продольным текстолитовым, гетинаксовым или деревянным брускам с помощью латунных шпилек.

Между катушкой индуктора и нагреваемой загрузкой размещают электрическую и тепловую изоляцию индуктора. Чем меньше зазор между индуктором и загрузкой, тем выше электрический КПД, однако, из-за малой толщины теплоизоляции уменьшается тепловой КПД. Чем выше температура нагрева и соответственно относительно больше тепловые потери, тем большим принимается зазор между индуктором и загрузкой.

Тепловая изоляция, снижая тепловые потери, должна одновременно уменьшить температуру электрической изоляции индуктора до допустимой величины. Тепловая и электрическая изоляции индуктора должны надежно работать при имеющих место больших температурных перепадах по толщине, частых теплосменах, высоких скоростях нагрева и остывания. Для механической защиты теплоизоляции нередко ее наматывают на трубу из нержавеющей стали с продольным разрезом для предотвращения наведения в ней вихревых токов.

Витки индуктора, работающего на промышленной частоте, испытывают значительные электродинамические усилия, вызывающие их вибрацию. Электродинамические усилия пропорциональны квадрату напряженности поля. Так как размеры тел, нагреваемых на частоте 50 Гц, относительно велики, полные усилия достигают десятков килоньютон. Эти усилия, имеющие постоянную составляющую и переменную с частотой 100 Гц, действуют как на обмотку индуктора, так и на магнитопроводы и нагреваемые тела. Обмотки испытывают разрывающие радиальные и сжимающие осевые усилия. Вибрация обмоток под действием динамических сил приводит к разрушению тепловой и электрической изоляции и паяных соединений, создает шум. В трехфазных нагревателях, кроме электродинамических сил от пульсирующего поля, появляются осевые силы от бегущего поля. Крепление индуктора, его электро- и теплоизоляция в этих случаях должны выбираться с учетом вибрационных нагрузок.

В установках промышленной частоты обычно применяют внешние магнитопроводы для защиты от магнитного поля механизмов и каркаса с декоративным кожухом, в котором установлен индуктор, а также для повышения коэффициента мощности и КПД. Магнитопроводы, как правило, не насыщенные и используют одновременно для крепления индуктора и придания жесткости всей конструкции нагревателя. Методика расчета режима установки с магнитопроводом отличается от традиционных методов расчета электрических машин, работающих в режимах, близких к насыщению.

В коротких индукторах или при нагреве магнитной загрузки магнитопроводы способствуют некоторому повышению энергетических показателей системы индуктор – нагрузка. Для внешних индукторов с длиной, большей диаметра, влияние магнитопровода на энергетические параметры, особенно на КПД, мало.

Несмотря на общность теории расчета и проектирования обмоток /44/ индукционных устройств, а также применения методов теории электрических машин, разработка установок индукционного нагрева отличается рядом особенностей. Существенные особенности имеются при проектировании обмоток индукторов. Для однослойных обмоток применяют трубчатые проводники со смещенным отверстием круглого или прямоугольного сечения. Когда витки не укладываются в один слой, используют двухслойные и трехслойные конструкции.

В отдельных случаях применяют многослойные соленоидные индукторы с параллельным соединением секций. Это позволяет повысить электрический КПД, однако существенно усложняет изготовление и эксплуатацию индуктора. Иногда для усиления нагрева два слоя витков выполняют лишь в торцовых частях индуктора.

Потери в многослойной обмотке [24] зависят от ее конструкции и при

правильном выборе токопроводов могут быть значительно меньше, чем в однослойной. Очевидно, что простым увеличением сечения индуктирующего провода повысить КПД затруднительно, потому, что ток в индукторе распределяется неравномерно по сечению проводника благодаря поверхностному и кольцевому эффектам. Решить эту проблему можно, сделав намотку катушки из нескольких концентрических слоев [24]. Применяя для намотки индуктора медную шинку, можно добиться равномерного распределения плотности тока по сечению провода, чем в конечном итоге, улучшить энергетические характеристики устройства [25].

Конструкция индуктора во многом определяется схемой силового питания, которая в свою очередь зависит от частоты питающего напряжения (промышленная или средняя) и количества фаз нагрузки (однофазная, двухфазная или трехфазная). Установки большой мощности обычно делают в трехфазном исполнении, чтобы обеспечить равномерную загрузку цеховой сети. Кроме того, установки выполняют с совмещенными и разнесенными фазами. В первых, - индукторы отдельных фаз располагают в стык друг к другу, что обеспечивает большую компактность установки. У вторых, - в промежутках между индукторами располагают механизмы для перемещения слитков [14, 21].

При проектировании трехфазных индукторов приходится кроме равномерности загрузки фаз обеспечивать равномерность теплового поля по сечению нагреваемого слитка. Для этого индукторы располагают друг за другом с возможно малым осевым зазором, чтобы уменьшить провал кривой распределения удельной мощности в загрузке в зоне стыка. Провал мощности зависит и от сдвига фаз токов в соседних обмотках, от зазора между ними, от длины обмоток, от характера нагрузки и наличия магнитопровода. Так, например, уменьшения провала мощности удастся добиться, уменьшив сдвиг фаз в соседних обмотках со 120 до 60 град. путем инверсного включения средней обмотки (рис. 3.41, а).

На основании вышесказанного можно сделать заключение, что важнейшим элементом установки сквозного индукционного нагрева является обмотка индуктора, конструкция которой в основном определяет физические процессы в электромагнитной системе индукционного нагревателя и технические характеристики и энергетические показатели процесса термообработки.

#### **3.4.6 Схемы силового электропитания установок индукционного нагрева**

Установки индукционного нагрева в зависимости от их назначения, мощности, а также мощности системы электроснабжения выполняют с различными схемами электропитания. Схему выбирают по условию

согласования параметров нагрузки (индукционного нагревателя) с параметрами источника питания по напряжению и коэффициенту мощности. Приемлемость варианта схемы определяется, в конечном счете, результатами технико-экономического анализа. Схемы силового питания установок индукционного нагрева представлены на рис. 3.42.

Наиболее распространенной схемой питания индукционных нагревателей промышленной частоты является схема, показанная на рис. 3.42, а. В этой схеме резонансный контур индукционной установки, состоящей из индуктора И и компенсирующей батареи конденсаторов  $C_K$  (БК), подключен к сети через трансформатор Т (или автотрансформатор), имеющий несколько ступеней вторичного напряжения, а БК  $C_K$  имеет регулируемую часть для подстройки контура в процессе нагрева. Индукционный нагреватель здесь является однофазной нагрузкой для питающей сети. Трансформатор в схеме рис. 3.42, б может быть нерегулируемым, а мощность индукционного нагревателя можно регулировать с помощью специального тиристорного выключателя – регулятора ВР. На практике для согласования напряжений применяют автотрансформаторную схему (рис. 3.42, в).

В автотрансформаторной схеме напряжение источника питания подают на часть витков индуктора И, а компенсирующую БК  $C_K$  подключают к выводам индуктора И, то есть на полное число витков (рис. 3.42, в). За счет автотрансформаторного эффекта напряжение на индукторе и на конденсаторной батарее будет больше, чем напряжение источника питания [43].

Схема силовой установки индукционного нагревателя с вольтодобавочным трансформатором ВТ показана на рис. 3.42, г. Первичная обмотка вольтодобавочного трансформатора подключена к сети, а вторичная обмотка соединена последовательно с резонансным контуром индукционного нагревателя. Такую схему применяют, как при непосредственном включении резонансного контура на сетевое напряжение (см. рис. 3.42, з), так и при питании контура через промежуточный трансформатор или автотрансформатор. Включая вольтодобавочный трансформатор согласно или встречно с сетевым напряжением, получают широкий диапазон изменения напряжения:

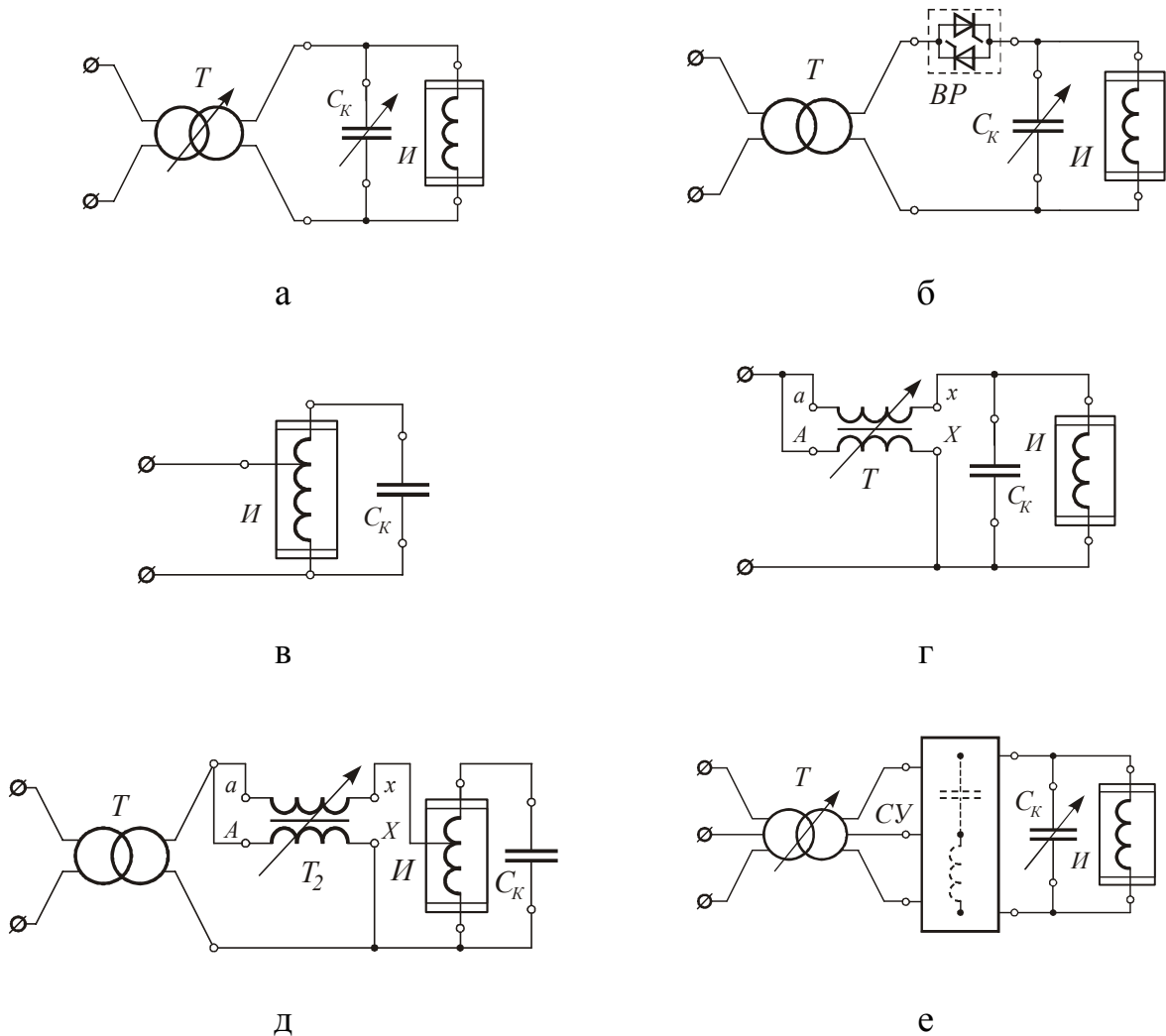
$$U_{\kappa} = U_c \pm U_d,$$

где  $U_c$  – напряжение сети или первичного трансформатора;  $U_d$  – напряжение на вторичной обмотке вольтодобавочного трансформатора, которое изменяют путем изменения числа витков вторичной обмотки.

Встречаются силовые установки индукционных нагревателей, построенные по автотрансформаторной схеме с использованием вольтодобавочного трансформатора (рис. 3.42, д).

Для установок индукционного нагрева с однофазными индукционными нагревателями большой мощности применяют трехфазные печные трансформаторы с симметрирующими устройствами, которые предназначены для равномерного распределения однофазной нагрузки по трем фазам питающего напряжения. Наиболее распространено симметрирующее устройство по схеме Штейнмеца (рис. 3.42, *е*) [43]. Эту схему используют также с нерегулируемым трансформатором и с выключателями – регуляторами (рис. 3.42, *ж*).

На рис. 3.42, *з* представлена схема трехфазного индукционного нагревателя промышленной частоты. Каждый индуктор подключен к линейному напряжению через вольтодобавочный трансформатор по автотрансформаторной схеме. Индукционные установки повышенной частоты подключают к таким источникам питания (ИП), как электромашинным или статическим преобразователям частоты.



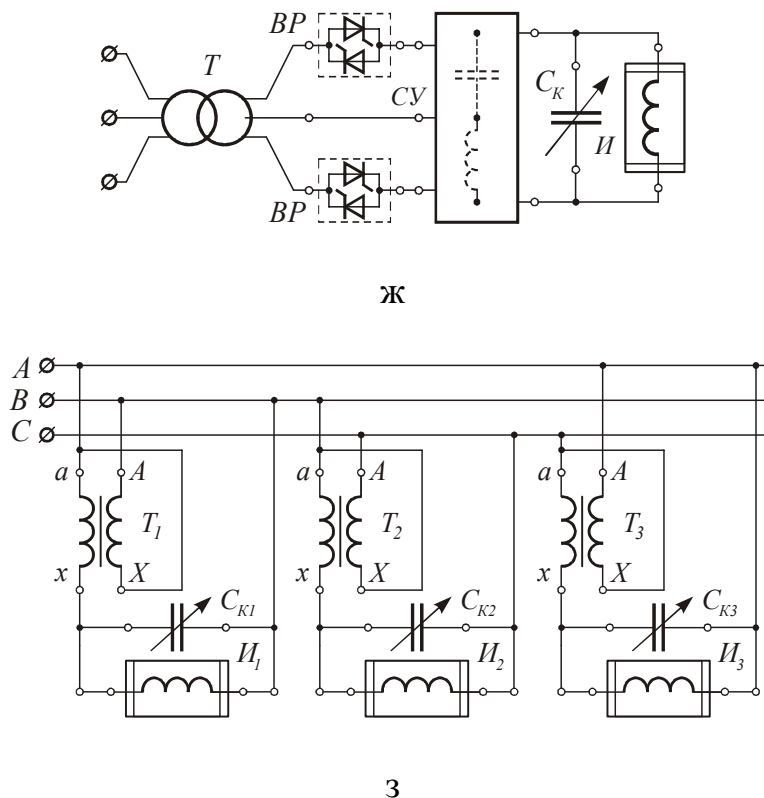


Рис. 3.42 – Принципиальные схемы силовых установок индукционных нагревателей промышленной частоты

Схема питания индукционного нагревателя от электромашинного преобразователя частоты показана на рис. 3.43, *а*. Установка состоит из электродвигателя Д на общем валу с генератором повышенной частоты Г. Регулирование напряжения генератора и мощности, потребляемой индукционным нагревателем, в этом случае выполняют изменением тока возбуждения обмотки ОВ генератора. В схеме на рис. 3.43, *б* в качестве источника питания используется статический преобразователь частоты с явно выраженным звеном постоянного тока.

Резонансный контур индукционного нагревателя подключен к сети через выпрямитель В, разделительный дроссель Др и инвертор, в котором постоянный ток преобразуется в переменный заданной частоты с возможностью ее регулирования. Конденсаторная батарея при этом не требует регулирования, поскольку контур настраивают изменением рабочей частоты статического преобразователя. При использовании токов высокой частоты, также, как и для промышленной частоты, применяют схемы согласования параметров источника питания с параметрами нагрузки (рис. 3..44).

Наиболее простой является схема, показанная на рис. 3.44, *а*, применяемая в том случае если выходное напряжение ИП соответствует напряжению нагрузки. Схему на рис. 3.44, *б* применяют в том случае, когда напряжение источника питания меньше напряжения нагрузки. В противном

случае применяют схему на рис. 3.44, в. Для согласования низковольтного ИП с высоковольтной нагрузкой применяют схему на рис. 3.44, г. Схему, показанную на рис. 3.44, д используют для согласования низковольтного ИП и низковольтного индуктора при наличии высоковольтной компенсирующей батареи. Для согласования низковольтного ИП с высоковольтной нагрузкой при использовании низковольтной компенсирующей батареи применяют схему на рис. 3.44, е.

В каждом конкретном случае при проектировании установок индукционного нагрева выбирают силовые схемы электропитания и настройку колебательного контура, наиболее полно соответствующие изменяющимся параметрам нагрузки в ходе всего процесса нагрева, что позволяет существенно улучшить технические и энергетические показатели работы установок индукционного нагрева.

В процессе согласования параметров загрузки с параметрами источника питания с помощью одной из представленных схем кроме сложных физических явлений в системе «индуктор – нагрузка» необходимо учитывать степень использования оборудования, графики нагрузок, расход электроэнергии, работу вспомогательного оборудования и ряд других факторов, определяющих энергетические показатели индукционной установки.

Решение о целесообразности использования той или иной силовой схемы электропитания индукционной установки принимают после изучения перечисленных данных и технико-экономического обоснования.

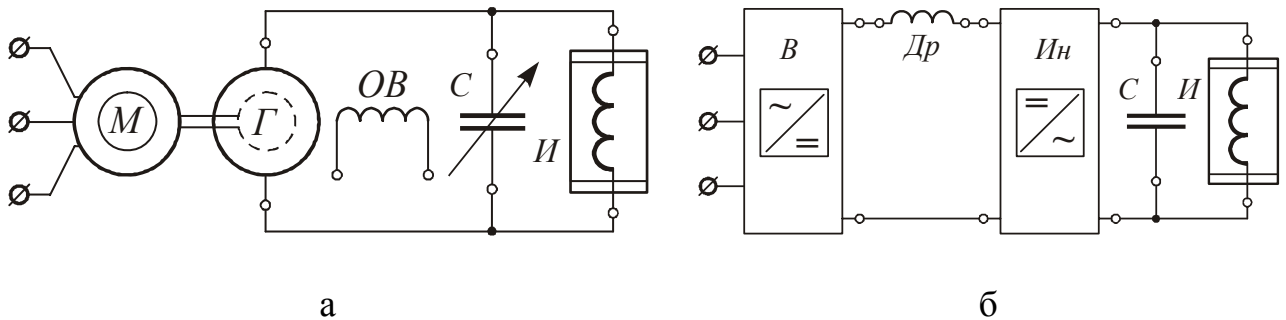
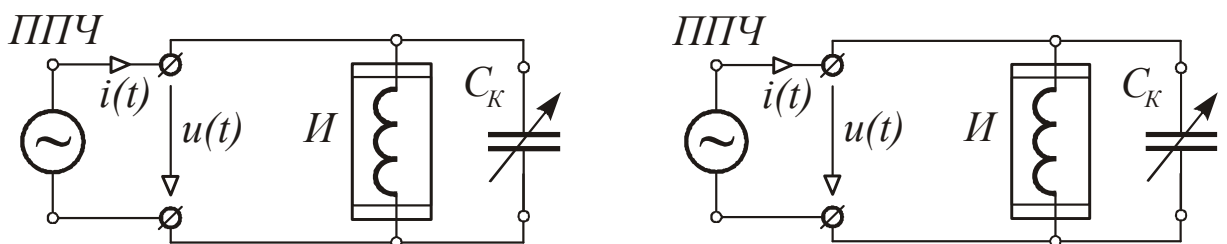


Рис. 3.43. Схемы силовых установок индукционных нагревателей повышенной частоты





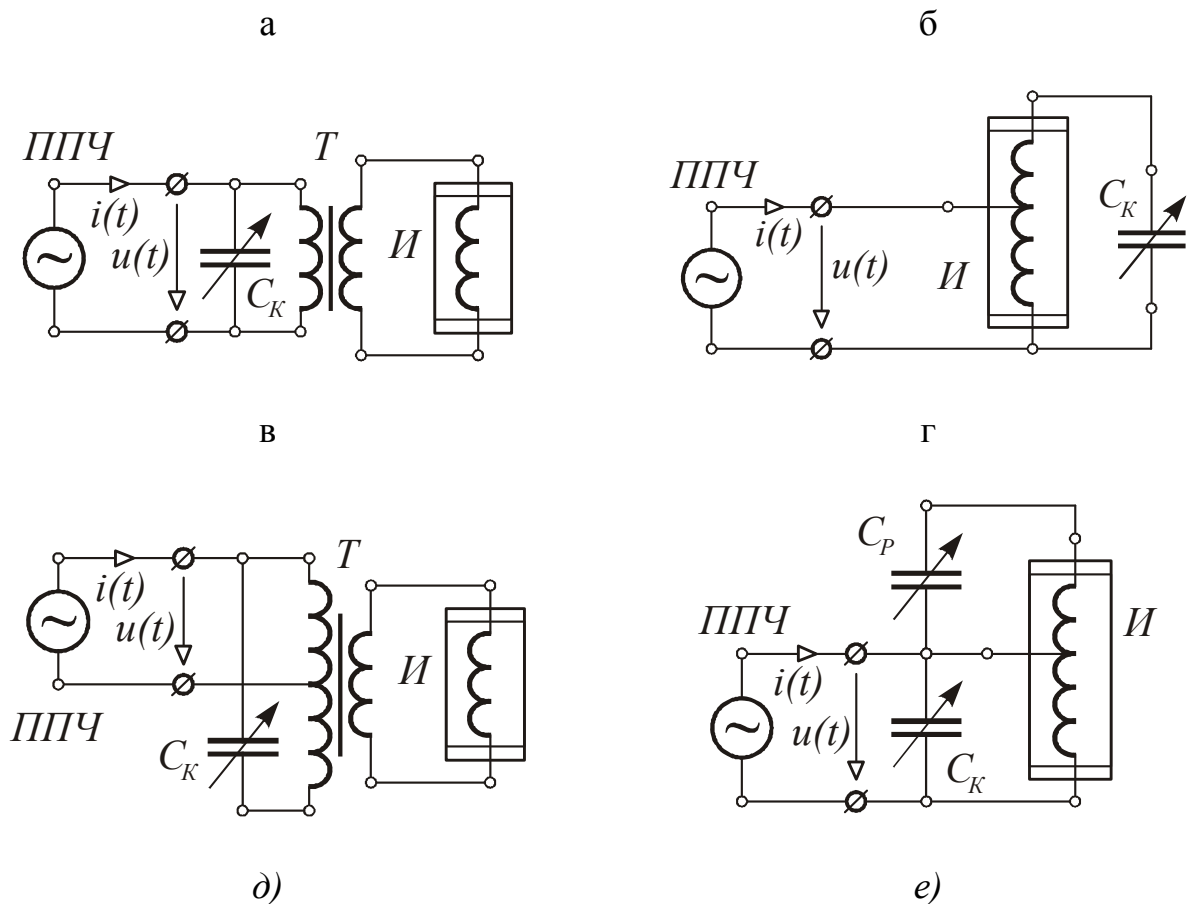


Рис. 3.44. Типовые схемы силовых полупроводниковых установок индукционных нагревателей повышенной частоты

### 3.4.7 Требования к индукционным установкам сквозного нагрева

Индукционный метод сквозного нагрева имеет ряд преимуществ по сравнению с пламенными печами или печами сопротивления. Эти преимущества обуславливают основные требования по совершенствованию характеристик УИН:

1. Основным требованием является необходимость обеспечения технологических условий нагрева загрузки. Например, равномерность нагрева по радиусу и по длине, либо заданная неравномерность теплового поля по длине для градиентного нагрева. В трехфазных УИН длина индуктора методического действия может превышать величину 3 м. Длина слитков может варьироваться в широких пределах. Каждая партия слитков может быть разной длины. Согласно технологическим требованиям перепад температуры по длине загрузки не должен превышать  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Короткие и длинные слитки должны быть прогреты равномерно, вне зависимости от их расположения в каждой секции индуктора и от интенсивности подачи заготовок в пресс.

2. Установка индукционного нагрева должна обладать высокими энергетическими показателями. При нагреве цилиндрической загрузки в продольном магнитном поле токов промышленной частоты энергетические параметры УИН зависят от диаметра и материала слитков, а также температуры нагрева. Так, например, электрический КПД индуктора при нагреве алюминиевой или медной загрузки диаметром более 50 мм может достигать 40 %, а при нагреве стальной загрузки до 600 °С – величины 85 %. Конструкция индуктора и схема его включения в каждом случае должна обеспечивать лучшие энергетические показатели.

3. Мощности современных УИН весьма существенны, поэтому установки могут стать причиной несимметричного режима питающей сети, вследствие неравномерного распределения нагрузки по фазам. Особенно сильно искажение симметрии проявляется при однофазном исполнении нагревателей. Поэтому для несимметричной нагрузки необходимо принимать технические решения для ограничения коэффициента несимметрии токов в установленных пределах. Согласно ГОСТ 13109–97 коэффициент несимметрии не должен превышать 4 %.

4. Индукционные установки являются сложным и высокоэнергоёмким электротехнологическим оборудованием. Поэтому для повышения надёжности УИН необходимо максимальное упрощение ее конструкции. Например, для охлаждения индуктора всегда предпочтительней применение принудительного охлаждения, даже при увеличении единовременных капитальных вложений на изготовление установки. Поэтому следует использовать водяное охлаждение и обеспечить соответствующую конструкцию индукционного нагревателя.

5. Уменьшение длительности нагрева при сохранении приемлемого качества и предотвращении опасности аварийного плавления слитков внутри индуктора – весьма важное требование, обусловленное увеличением производительности установки в целом и повышением ее надёжности. При суммарном времени в 250 секунд для одного цикла прессования коротких слитков, сокращение времени нагрева со 160 до 132 секунд приводит к увеличению производительности на 15 %.

Кроме перечисленных требований технологии нагрева и энергетических показателей существуют вопросы, связанные с обеспечением ремонтпригодности, постоянной готовности к работе, рационального конструирования и автоматизации, высоких показателей использования материалов, удовлетворительных санитарно-гигиенических характеристик и др.

В настоящей работе рассмотрено решение важнейших вопросов из перечня: повышения качества нагрева, улучшения технических характеристик и энергетических показателей установок индукционного нагрева.

### 3.4.8 Способы повышения эффективности установок индукционного нагрева

Зависимость КПД от физических свойств нагреваемого материала и материала индуктора в основном обусловлена электрическими потерями в обмотках индукторов. Так при нагреве стали выше точки Кюри потери в обмотках составляют 15 – 20 % общей мощности, а при нагреве слитков из цветных сплавов достигают 50 – 60% подводимой мощности [9, 22, 27].

Таким образом, очевидным фактом является то, что наиболее целесообразным способом повышения эффективности УИН является максимальное снижение потерь в обмотке индуктора. Потери в обмотках во многом зависят от конструкции токоведущих частей, геометрии системы, частоты тока и свойств нагреваемых тел.

На радиочастотах обмотки индукторов обычно состоят из небольшого числа (1-5) витков медной трубки, охлаждаемой водой. Поверхностный эффект в витках сильно выражен, и активное сопротивление зависит от распределения тока по периметру токопровода, которое, в свою очередь, зависит от распределения поля во всей системе [6, 27].

На средних частотах используются индукторы как с малым числом витков (1-5), что характерно для нагрева под закалку, пайку и другие технологии, так и многослойные конструкции, подключаемые без трансформатора к источнику питания. Однако почти всегда обмотки делаются однослойными из-за увеличения потерь во внутренних слоях, так как радиальный размер токопровода всегда значительно больше глубины проникновения тока в медь из-за водяного охлаждения [6, 9, 22].

Наибольшим разнообразием конструкций отличаются обмотки индукторов промышленной частоты. У слабонагруженных индукторов, применяемых, например, для обогрева оборудования, используют многослойные обмотки из сплошных проводников прямоугольного сечения с теплостойкой изоляцией. Охлаждение используется воздушное, естественное или принудительное [9, 27, 28].

Потери в многослойной обмотке существенно зависят от ее конструкции и при правильном выборе индуктирующего провода могут быть заметно меньше, чем в однослойной. Так, например, в работах профессора Немкова В.С. приведены сведения о том, что наиболее приемлемой является обмотка из плотно намотанных сплошных проводников прямоугольного сечения с толщиной, определяемой по следующему выражению:

$$d_1 = \frac{1,32 \cdot \Delta_1}{\sqrt{n}},$$

где  $\Delta_1$  – глубина проникновения тока в медь,  $\Delta_1 \approx 10$  мм;  $n$  – число слоев обмотки.

Если не учитывать роста диаметра витков от слоя к слою, то потери в многослойной обмотке длинного индуктора при количестве слоев равном  $n$  будут примерно в  $\sqrt{n}$  раз меньше, чем у оптимальной однослойной обмотки при том же токе, следовательно, и той же мощности в нагрузке. Изготовление обмотки с переменной по слоям толщиной проводников, уменьшающейся к внутренним слоям, (рис. 3.45, а) позволяет снизить потери еще на 12 – 15 % [22]. Одним из недостатков многослойной обмотки является перегрев внутренних слоев как из-за худшей теплоотдачи, так и из-за больших потерь в них. Разгрузить внутренние слои можно способом, предложенным Буканином В.А. и Немковым В.С., за счет переменной ширины проводников по слоям, увеличивающейся от наружного слоя к внутреннему (рис. 3.45, б). При естественном или принудительном воздушном охлаждении индуктирующих обмоток используются сплошные проводники прямоугольного поперечного сечения, а при водяном охлаждении – неравностенная полая трубка специального профиля. Если при изменении ширины витка выбирается оптимальная толщина для каждого слоя (рис. 3.45, в), то общие потери дополнительно снижаются на 3 – 5 % [29].

Однако в теории устройств индукционного нагрева не существует адекватной методики, которая позволяла бы провести расчет электрических параметров многослойной обмоточной структуры с высокой степенью достоверности, полученных результатов. В настоящее время электрический расчет многослойного индуктора, согласно инженерным методикам, рекомендуется выполнять так же, как и расчет однослойного индуктора. Для этого многослойную обмотку заменяют эквивалентной однослойной с суммарным числом витков и активным сопротивлением. Диаметр  $D_9$  этой обмотки определяется из условия равенства индуктивности пустого однослойного и многослойного индукторов. Дальнейший расчет ведется, как для однослойных индукторов диаметром  $D_9$ , с тем отличием, что внутреннее реактивное сопротивление принимается равным нулю, так как оно учитывается при определении эквивалентного диаметра [9].

Эффективность многослойных катушек была проверена экспериментально на индукторе для нагрева стали мощностью 2МВА, сконструированном, построенном и испытанном в научно-исследовательском центре Британского Совета по электричеству [30]. При том, что индукционные установки для нагрева стали имеют довольно высокий КПД, который при нагреве стали до температуры 700 °С достигает 80%, а до температуры 1250 °С – 65%, использование индукционного нагревателя с многослойной обмоткой из медной шины позволяет увеличить эффективность нагрева еще на 7 – 15 %. Более значительного увеличения технико-экономических показателей можно добиться при использовании

подобных конструкции при индукционном нагреве загрузки с высокой удельной электропроводностью.

Таким образом, существует сложная зависимость энергетических параметров индуктора (напряжение на зажимах индуктора, потребляемая мощность при данном напряжении, КПД индуктора и удельный расход электроэнергии) от геометрических параметров (внутренний диаметр обмотки, длина обмотки в собранном состоянии и размеры сечения индуктирующего провода и др.). Поэтому выбор конструкции нагревателя, определение способов и средств обеспечения оптимальных режимов его работы являются сложными взаимосвязанными задачами проектирования. И для их эффективного решения применяют расчетные методы анализа, методы математического моделирования и методы оптимизации.

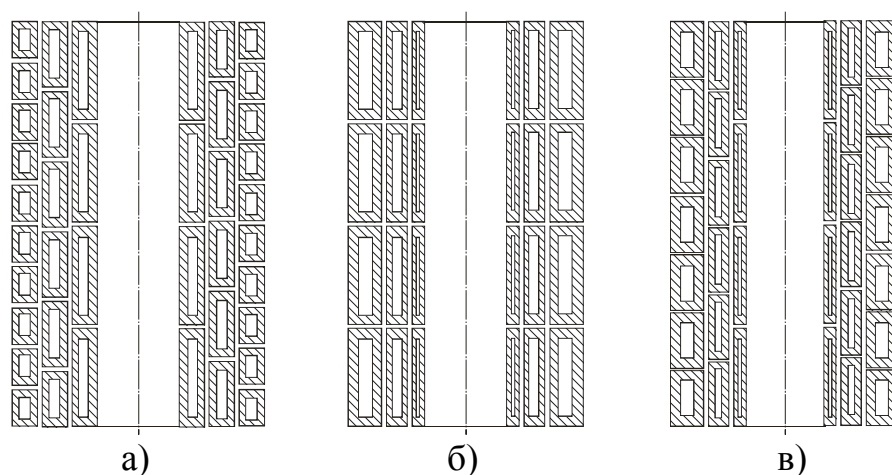


Рис. 3.45 – Многослойная цилиндрическая обмотка с переменной шириной и толщиной проводников по слоям

Практически общими для всех моделей являются электромагнитные и тепловые процессы. В некоторых случаях есть необходимость, кроме электромагнитных и тепловых процессов, исследовать электрические процессы в силовой электрической схеме электропитания. Математическую модель, позволяющую учитывать физические процессы в разных областях устройства, при сочетании разнородных подходов к построению отдельных модулей (подсистем) будем называть комбинированной моделью.

Комбинированная модель создается на базе различных расчетных методов – приближенных, аналитических и численных. Выбор метода зависит от конкретных условий и во многом определяет эффективность

Рис. 1.5 – Многослойная соленоидальная катушка для нагрева стали

ЛЬ МОЖЕТ  
(модуле  
, – или 1

Рис. 1.6 – Графики изменения КПД в зависимости от конструкции нагревателя

блоками двухкомпонентной модели используют модуль электрического расчета.

В тепловом, электромагнитном и электрическом модулях производят расчет соответствующих процессов. Информационно – логический модуль осуществляет ввод и вывод информации, а также взаимодействие остальных частей системы, определяемое конкретной структурой нагревателя и режимом его работы.

При исследовании индукционного нагрева ограничим задачу рассмотрением установившихся электромагнитных и электрических и изменяющихся тепловых процессов, поскольку основную роль играет стационарный режим работы установки.

При моделировании нагревателя периодического действия весь процесс нагрева разделяют на временные интервалы. В пределах каждого интервала распределение источников тепла и физические свойства металла считают постоянными. По окончании расчета в логическом модуле системы анализируется полученное температурное поле. Если конечные перепады температуры по радиусу или длине загрузки превышают заданные, изменяют число витков индуктора и его длину, после чего расчет повторяется, пока заданные перепады не будут достигнуты.

Из решения электромагнитной задачи определяют источники тепла. Затем производят тепловой расчет одного из слитков по мере продвижения его в индукторе, учитывая условия стационарной теплоотдачи с боковых сторон и теплообмена между торцевыми плоскостями слитков. При передаче распределения источников тепла из модуля расчета магнитного поля учитывают положение слитка в заданном интервале времени. По окончании теплового расчета проверяют соответствие распределения температуры по радиусу выходного слитка требуемого по условиям технологии. В случае несоответствия предусмотрено изменение мощности индуктора или темпа проталкивания слитков. После достижения заданного распределения по радиусу проверяется перепад температуры по длине выходного слитка. Если необходимо, изменяют длину индуктора или положение слитков в нем и расчет повторяется.

Когда требуемая равномерность нагрева слитка на выходе достигнута, проверяют соответствие распределения температуры по длине столба слитков принятому в начале расчета. При значительных расхождениях распределение корректируется и расчет повторяется. Предусмотрен расчет температурного поля при транспортировке слитка из нагревателя в пресс.

### **3.5.1.1 Методы электромагнитных расчетов индукционных систем**

Разнообразие систем индукционного нагрева, не позволяет использовать какой – либо один метод для всех случаев. В большинстве случаев методы расчета являются приближенными.

Все приближенные методы расчеты основаны на раздельном определении сопротивлений отдельных участков системы с последующим приближенным учетом конечной длины индуктора и детали и их взаимного расположения. Некоторые из этих методов были предложены еще в 20 – 30-х годах применительно к индукционным плавильным печам. В большинстве случаев индукторы и нагреваемые детали представляют собой системы, имеющие неизменное по длине поперечное сечение той или иной формы. Сопротивления отдельных участков таких систем находят для плоскопараллельного поля (то есть как для отрезков бесконечно длинной системы) и затем пересчитывают (приводят) к параметрам цепи индуктора. Ими являются: активное  $r_2$ , внутреннее реактивное  $x_{2M}$  сопротивление детали и сопротивление  $x_S$ , обусловленное потоком в зазоре между индуктором и нагреваемой загрузкой. Активное  $r_1$  и реактивное  $x_{1M}$  сопротивления индуктирующего провода рассчитывают отдельно и считают независимыми от вида нагреваемых изделий.

Основное различие многочисленных приближенных методов заключается в способе приведения сопротивлений детали и реактивности рассеяния  $x_S$  обусловленной зазором, к току короткого индуктора. По этому признаку их можно разделить на следующие группы: методы, основанные на аналогии системы индуктор – деталь двум связанным контурам; метод поправочных коэффициентов; методы, использующие схемы замещения.

Электрический расчет индуктивно-связанных контуров является разделом теории цепей [35], в котором зачастую подразумевается, что вторичный контур в виде тонкостенного соленоида замкнут на определенное сопротивление нагрузки. В результате оказывается, что сопротивление нагруженного индуктора вообще не зависит от внутреннего реактивного сопротивления  $x_{2M}$ , что приводит к значительной ошибке при относительно низких частотах.

Расчет по методу связанных контуров приводит даже к качественно ошибочным результатам, так как при этом реактивное сопротивление нагруженного индуктора всегда меньше, чем пустого. Иногда наблюдается обратное, особенно при большой магнитной проницаемости и относительно низких частотах, когда загрузка начинает играть роль магнитопровода. Аналогия системы «индуктор – загрузка» и связанных контуров выполняется лишь для загрузки в виде тонкостенных труб или сплошных немагнитных тел при ярко выраженном поверхностном эффекте, обеспечивая близкое совпадение результатов расчета и опытов.

Значительное распространение получил метод поправочных коэффициентов. Метод дает во многих случаях результаты, близкие к

опытным, но практически пригоден лишь для загрузки цилиндрической формы, для которой вычислены поправочные коэффициенты или известны характеристики взаимной индуктивности.

Метод, использующий схемы замещения основан на применении схем замещения системы «индуктор – нагрузка», и на аналогии внешнего поля нагруженного индуктора полю пустого индуктора. Интегральные параметры элементов определяют из рассмотрения магнитного сопротивления нагруженного индуктора. Расчет дает весьма точные результаты при переходе к бесконечной длине системы и пустому индуктору, и применим для деталей с любыми свойствами (магнитные, немагнитные, двухслойные), а также сложной загрузки (пучок цилиндров, пластин, разрезанная труба и т. д.). Отмеченный метод достаточно прост, поскольку для приведения сопротивлений необходим только хорошо известный поправочный коэффициент  $k_I$ . Порядок расчета аналогичен для загрузки некругового сечения (овальной, прямоугольной).

Расчет интегральных параметров коротких индукторов приближенными методами может привести к значительным ошибкам из-за сильной неоднородности электромагнитного поля в индукторе. Основываясь на вышесказанном можно заключить, что разработка достоверных методов расчета ЭМП приемлемой точности в системе «индуктор – нагрузка» является актуальной, поскольку указанная задача не в полной мере решена приближенными методами, отмеченными выше.

Расчет ЭМП в осесимметричных системах с переменным сечением или неоднородным по длине и радиусу свойствами целесообразно выполнять численным методом. Для этого все проводящие тела разбивают на отдельные кольца, являющиеся трубками тока. Наибольший интерес представляет применение этого метода для расчета систем, имеющих переменные по длине параметры, таких, как нагреватели методического действия, для непрерывно – последовательного нагрева, а в некоторых случаях и для расчета нагревателей периодического действия .

Перспективным методом исследования индукционных нагревателей является непосредственное численное решение дифференциальных уравнений с учетом конечной длины индуктора. Сравнительно легко это решение получается, если постоянное значение одной из координат описывает границу раздела сред. Расчет входных параметров индуктора производят через ЭДС, наведенную в витках индуктора полем всех токов в системе, то есть методом наведенных ЭДС.

Решение дифференциального уравнения двумерного электромагнитного поля получается в виде рядов или интегралов с бесконечными пределами. При этом вычисление суммы ряда или интеграла в общем виде, обычно, не представляется возможным. Однако применение ЭВМ позволяет составить необходимые таблицы и графики и сделать указанный метод пригодным для практических расчетов.



Расчеты электромагнитных полей становятся эффективными при реализации численных методов анализа. Например, применение метода дискретизации свойств сред расчетная область, состоящая из кусочно-неоднородных сред заменяется дискретным аналогом, в котором электрические и магнитные свойства сред, а также источники электромагнитного поля сосредоточены в бесконечно тонких слоях. Пространство между слоями заполнено средой относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости которой равны нулю. На основе граничных условий, полученных при наличии на границе раздела сред, слоя с физическими свойствами, строится итерационный процесс для определения напряженностей электрического и магнитного полей.

### 3.5.1.2 Методы расчета температурного поля в загрузке

Для улучшения качества нагрева и повышения энергетических показателей индукционной установки решающим является выбор приемлемого режима работы нагревателя [25]. Режим выбирают на основе анализа возможных температурно-временных характеристиках процесса нагрева.

Указанные характеристики получают по результатам теплового расчета. При таких условиях, повышаются требования к точности расчета и проектирования нагревательных установок. Тепловой расчет должен учитывать ряд факторов, существенно влияющих на температурное поле в загрузке: изменение интенсивности магнитного поля по длине загрузки, наличие тепловых потерь с поверхности заготовки; зависимость теплофизических свойств материала загрузки от температуры; изменение мощности в процессе нагрева, возможность регулирования мощности при управлении скоростью нагрева и другие [25].

Методы расчета процесса индукционного нагрева основаны на решении дифференциальных уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и теплового полей соответственно. Распределение температуры во времени описывается уравнением Фурье в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{a}{\lambda} \varpi, \quad (3.5)$$

где  $T$  – температура в точке пространства с координатами  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$ , достигшая значения за время  $t$ , соответственно  $^{\circ}\text{C}$  и  $\text{с}$ ;  $a$  – температуропроводность материала в точке пространства с координатами  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda$  – теплопроводность,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $\varpi = f(\rho, \varphi, z)$  – функция

распределения плотности внутренних источников энергии в материале, Вт/м<sup>3</sup>.

Плотность внутренних источников тепла представляет собой удельную электромагнитную энергию, выделяющуюся в единицу времени в единице объема. В силу наличия поверхностного эффекта распределение внутренних источников резко неоднородное и зависит от электрофизических свойств загрузки, которые изменяются в процессе нагрева.

Инженерные методы расчета процесса нагрева основаны на аналитическом решении уравнения (3.5). При этом весь процесс нагрева разделен на интервалы, в каждом из которых физические свойства загрузки принимают неизменными. Считается, что точность аналитического решения определяется числом взятых интервалов линейности. Однако, на практике, при расчете нагрева неферромагнитной загрузки принимают один интервал линейности, а ферромагнитной загрузки – три: «холодный» режим; промежуточный режим, когда загрузка теряет свои магнитные свойства; «горячий» режим. Поскольку длина загрузки обычно всегда в несколько раз превышает ее диаметр, то считают, что температурное поле в загрузке одномерное и совпадает с полем цилиндра бесконечной длины. Существенным допущением при аналитическом решении является отсутствие теплоотдачи с поверхности загрузки, то есть на поверхности тепловой поток равен нулю [32].

Для интегрирования нелинейного уравнения теплопроводности различные авторы используют различные методы математической физики [14, 16]. Среди методов наиболее эффективны интегральные преобразования Лапласа, Фурье и Ханкеля, а также метод интегрирования по распределению источников тепла, основанный на применении функции Грина. Решения уравнения теплопроводности для безразмерных чисел подобия сведены в таблицы и широко используются для определения времени нагрева и необходимой полезной удельной мощности.

Однако изучение опыта применения различных методов расчета показывает, что инженерные методы позволяют получить приемлемую точность расчета лишь для узкого класса устройств индукционного нагрева и для частных схем включения установок, например для низкотемпературного нагрева неферромагнитной загрузки в индукторе периодического действия. Более точное решение нелинейного уравнения Фурье для широкого класса устройств получают численными методами [32]. Весьма широкое распространение получило решение уравнений Максвелла и Фурье с помощью метода конечных разностей [16]. Оно основано на замене дифференциальных уравнений разностными соотношениями [33]. Учитывая высокую эффективность указанного метода в совместном анализе электромагнитных и тепловых процессов, при построении машинных

алгоритмов решения поставленной задачи, его реализации в комбинированной математической модели будет уделено особое внимание.

### **3.5.1.3 Методы анализа электрических процессов в схемах силового питания установок индукционного нагрева**

Для исследования электрических процессов в схемах индукционных установок используют известные, хорошо автоматизированные методы, наиболее эффективными из которых следует считать топологический анализ при помощи сигнальных графов [34, 40] и узловой анализ [112]. При этом наилучшие результаты дает, метод расширенных узловых уравнений (РУУ), в котором классическая система узловых уравнений расширена, за счет компонентных уравнений ветвей схемы.

Именно последний метод является предпочтительным, поскольку, несмотря на большую размерность систем уравнений, свободен от ограничений на типы элементов при формировании математических моделей схем. Он пригоден для анализа установившихся и переходных режимов электрических схем. Кроме того, метод РУУ относительно легко автоматизируется, а его дополнение вычислительными алгоритмами анализа нелинейных цепей, например алгоритмом последовательных приближений или алгоритмом метода Ньютона – Рафсона, позволяет запрограммировать задачу и получить мощный инструмент машинного моделирования режимов практически любых электрических схем [34].

Особенностью построения алгоритма расчета схем замещения электротехнологических установок в переходном режиме, с использованием специализированного программного обеспечения, следует считать применение в анализе динамических режимов реактивностей дискретных резистивных схем замещения. Использование дискретных моделей индуктивностей и емкостей позволяет реализовать преимущества узлового анализа электрических процессов.

Применение в качестве основного расчетного инструмента модифицированного метода узловых потенциалов приводит к формированию больших, слабо заполненных систем алгебраических уравнений. Для эффективного управления вычислительными ресурсами в таком случае прибегают к алгоритмам редукции разреженных матриц. В программе машинного моделирования применены алгоритмы оптимального упорядочивания элементов структурно-симметричных матриц, подробно описанные в [34]. Преимущество отдано оптимальному алгоритму Краута программированием задачи LU-разложения в среде Fortran.

Повышения эффективности расчета режимов схем добиваются при введении в программное обеспечения алгоритмов машинного формирования уравнений переменных состояния (УПС). Автоматизация этапов построения и

решения уравнений метода переменных состояния позволяет расширить возможности анализа динамических режимов схем в фазовой области. Особенно существенно проявляются достоинства указанного метода при исследовании режимов цепей с нелинейными реактивностями. Это актуально, поскольку изменение индуктивности электротехнологической установки даже в небольшом диапазоне ( $\pm 15\%$ ) может привести к неверным результатам.

Для решения уравнений состояния в запрограммирован алгоритм метода численного интегрирования УПС Адамса – Маултона, часто называемого неявным методом Эйлера. Для автоматического управления шагом численного интегрирования и обеспечения устойчивости в соответствии с рекомендациями [45] предпочтение отдано неявным методам полиномиальной аппроксимации.

Использование ПО анализа цепей, построенного на основе перечисленных методов и алгоритмов, позволяет эффективно рассчитать установившийся и переходный режимы индукционной установки по ее схеме замещения. На этапах решения электромагнитной и тепловой задач уточняются интегральные параметры элементов схемы, а также их характерные зависимости во времени.

### 3.5.1.4 Применение коммерческих пакетов программ

Коммерческие программы анализа и моделирования полей получили широкое распространение. Можно перечислить самые известные названия программных продуктов подобного назначения – *ELCUT*, *ELTA*, *UNIVERSAL 2D*, *ANSYS* и др.

Не вызывает сомнения, что в основе всех продуктов лежат эффективные вычислительные алгоритмы и сверхмощный математический аппарат [2, 18]. Однако, сравнительный анализ возможностей применения перечисленного программного обеспечения к решению задачи анализа и моделирования режимов индукционных установок сквозного нагрева алюминиевой загрузки в продольном магнитном поле промышленной частоты показывает, что в каждой из систем удастся решить локальные исследовательские задачи. Определенные проблемы в применении коммерческих программ возникают не только на этапе «извлечения» результатов проведенного анализа, в приемлемых для дальнейшего использования форматах, но уже на этапах собственно постановки задачи. Это относится к построению моделей многослойных обмоточных структур [24], к особенностям корректного описания расчетных областей с магнитопроводом (даже при двухмерной постановке). Значительные трудности возникают при построении моделей, учитывающих ослабление поля на стыке обмоток разных фаз.

При количественном определении интегральных резистивных и реактивных параметров схемы замещения УИН в перечисленных

программных средах также возникают существенные расхождения, порой достигающие величин 50-100%.

Особые затруднения вызывает специфическое условие взаимодействия ПО анализа полей с программами схемотехнического моделирования при построении относительно сложных схем силовых цепей УИН, учитывающих резонансные режимы и перенос мощности между фазами индукционной установки, а также перенос мощности в пределах секции одной фазы.

Еще более громоздкой оказывается математическая модель созданная с применением для анализа уравнений цепей математического программного обеспечения *MathCAD*, *MathLAB*, *Mathematica* и др. Если для анализа полевых задач применение подобно программного обеспечения вполне оправдано, то при переходе в область анализа схемотехники УИН, вследствие большого числа схемных решений и многообразия схемных моделей, формирование и решение уравнений локальных схем в таких программных системах теряет практический смысл.

Для исследования электрических процессов в схемах индукционных установок возможно применение коммерческого программного обеспечения схемотехнического моделирования, например, широко распространенных программных продуктов *MicroCAP*, *Electronic Work Bench* и других аналогичных продуктов для графических операционных систем.

Нужно заметить, что достоинства и привлекательность этих программ заключены не столько в эффективном математическом аппарате, сколько в наличии развитого интерфейса и библиотек моделей, пригодных для исследования разнообразных типовых устройств. В тоже время в основе ПО лежит однотипный математический аппарат. В таких программах реализованы известные алгоритмы топологического анализа, методы уплотнения разреженных матриц, а также численные методы анализа нелинейностей и численный анализ во временной области. Необходимо заметить, что построение корректных схемных моделей сложных устройств, для их включения в библиотеки моделей коммерческих программ и последующего использования, является здесь самым существенным ограничением. Столь же затруднительно эффективно применение указанного ПО при сопряжении различных продуктов в решении единой цепно-полевой задачи.

В связи с изложенным, представляется, что построение специализированного, авторского программного обеспечения, на основе столь же эффективных математических моделей, методов и алгоритмов, является реальной альтернативой применению коммерческих программных продуктов.

### **3.5.2 Инженерная методика расчёта индукционных установок для нагрева цилиндрической немагнитной загрузки**

### 3.5.2.1 Определение размеров индуктора, мощности и частоты питающего напряжения

По размерам заготовки определим размеры установки индукционного нагрева по его эскизу (рис. 3.46).

Внешний диаметр индуктора выберем исходя из условия максимального КПД установки, см

$$D_1 = 1.5D_2.$$

где  $D_2$  – диаметр заготовки.

Внутренний диаметр индуктора, см

$$D_3 = 1.2 \cdot D_2.$$

Длина индуктора, см

$$a_1 = a_2 + 1.5D_1.$$

где  $a_2$  - длина заготовки.

Толщина футеровки, см

$$b_{\phi} = (D_1 - D_3) / 2.$$

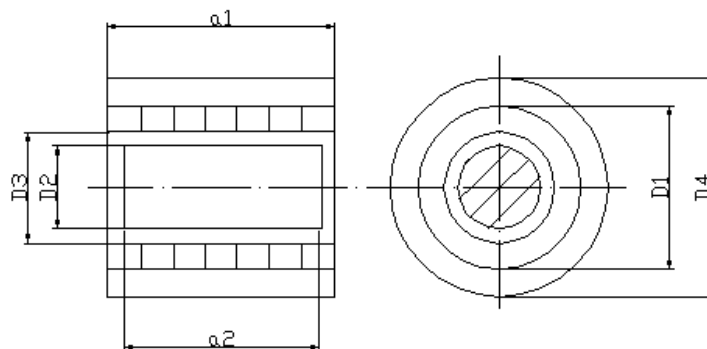


Рис. 3.46 - Эскиз установки индукционного нагрева

### 3.5.2.2 Определение частоты питающего напряжения

Выбор частоты производится, исходя из двух условий: электрический К.П.Д. установки должен не отличаться от К.П.Д. предельного и время

нагрева заготовки должно быть минимальным. Эти два условия обеспечивает неравенство, исходя из которого и выбирается частота:

$$\frac{3 \cdot 10^6 \cdot \rho_2}{D_2^2 \cdot \mu_{r2}} < f < \frac{6 \cdot 10^6 \cdot \rho_2}{D_2^2 \cdot \mu_{r2}},$$

где  $\rho_2 = 10^{-6}$  Ом·м – удельное сопротивление заготовки,

$\mu_{r2} = 1$  – магнитная проницаемость среды.

Глубину проникновения тока, см, определим из формулы

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_2 f}}.$$

### 3.5.2.3 Определение времени нагрева и средней мощности, подводимой к заготовке

Возьмём средний перепад температуры между центром заготовки и её поверхностью  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ .

Величина воздушного зазора, см

$$b_3 = (D_3 - D_2) / 2.$$

Мощность тепловых потерь, Вт

$$P_{\text{тп}} = \frac{2\pi(T_{\text{к}} - T_{\text{н}})D_1}{\frac{1}{\lambda_{\phi}} \cdot \ln \frac{D_1}{D_1 - 2b_{\phi}}},$$

где  $\lambda_{\phi}$  – теплопроводность среды, Вт/м·к

$$\lambda_{\phi} = 0.6 + 0.38 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}.$$

$T_{\text{к}}$  – конечная температура нагрева заготовки,

$T_{\text{н}}$  – средний перепад температур по толщине заготовки.

Средняя мощность, кВт, подводимая к заготовке равна

$$P_{2\text{ср}} = 1.05(P_{\text{т}} + P_{\text{т.п}}).$$

Здесь  $P_T$  – средняя полезная мощность, кВт, равная

$$P_T = 840G/t_k,$$

где  $G$  - масса заготовки, кг

$t_k$  - время нагрева, с

$$G = \pi D_2^2 a_2 \gamma 10^{-3} / 4.$$

### 3.5.2.4 Расчет параметров схемы замещения интегральных характеристик системы «индуктор-деталь»

Удельное сопротивление заготовки, Ом×м,

$$\rho_2 = 2,5 \cdot 10^{-8} \cdot \left( 1 + 0,0046 \cdot t_{cp} \right).$$

где  $t_{cp}$  – средняя температура за период нагрева, °С

Горячая глубина проникновения, м,

$$\Delta_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}},$$

где  $f$  - частота питающего тока, Гц.

Определение параметров схемы замещения. Схема замещения показана на рис. 3.47.

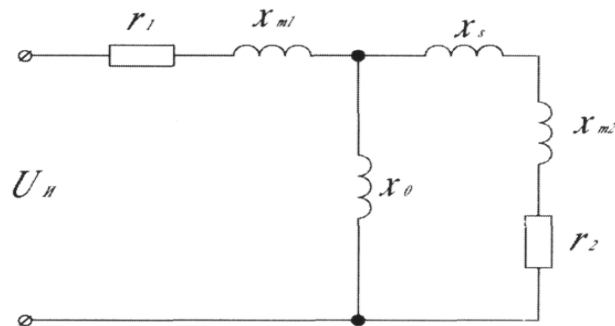


Рис. 3.47 - Схема замещения индуктора



Промежуточная величина  $m_2$  требуется для определения сопротивлений заготовки

$$m_2 = \frac{D_2}{\sqrt{2} \cdot \Delta_k}$$

Активное сопротивление заготовки, Ом,

$$r_2 = \frac{\pi \cdot \rho_2 \cdot m_2^2 \cdot A}{a_2}$$

Значения  $A$  и  $B$  выбираем из таблицы в /3/.

Внутреннее реактивное сопротивление заготовки, Ом,

$$x_{2m} = \frac{r_2 \cdot B}{A}$$

Реактивное сопротивление, Ом,

$$x_0 = \frac{x_{10} \cdot k_1 \cdot a_1}{a_1 - a_2 \cdot k_1}$$

где  $x_{10}$  - реактивное сопротивление пустого индуктора, Ом;

$k_1$ -поправочный коэффициент, учитывающий конечную длину индуктора, зависит от отношения  $D_1$  к  $a_1$  и определяется по графику в /2/.

$$x_{10} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \pi^2 \cdot D_1^2 \cdot 10^{-7}}{a_1}$$

Реактивность рассеяния индуктора, Ом,

$$x_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \pi^2 \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot 10^{-7}}{a_1}$$

Коэффициент приведения активного сопротивления заготовки

$$c_{\text{пр}} = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_{2m}}{x_0}\right)^2}.$$

Приведенное активное сопротивление заготовки, Ом,

$$r_2' = c_{\text{пр}} \cdot r_2.$$

Приведенное реактивное сопротивление, Ом,

$$x_2' = c_{\text{пр}} \cdot \left( x_s + x_{2m} + \frac{(x_s + x_{2m})^2 + r_2^2}{x_0} \right).$$

Активное и внутреннее реактивное сопротивления индуктирующего провода, Ом,

$$r_{1r} = \sum_{i=1}^{n_c} r_{li} \cdot w_c,$$

$$x_{1r} = \sum_{i=1}^{n_c} x_{li} \cdot w_c,$$

где  $w_c$  - количество витков в слое;

$r_{li}$  и  $x_{li}$  - активное и реактивное сопротивления витка обмотки в  $i$ -том слое, которое определяется с помощью численного математического моделирования.

$$w_c = \frac{W}{n_c}.$$

Приведенное активное и реактивное сопротивление индуктора, Ом,

$$r_1 = \frac{r_{1r}}{W_0^2},$$

$$x_{1m} = \frac{x_{1r}}{W_0^2}.$$

Эквивалентное активное, реактивное и полное сопротивления индуктора, Ом,

$$r_{\text{э}} = r_1 + r_2',$$

$$x_{\text{э}} = x_{1m} + x_2',$$

$$z_{\text{э}} = \sqrt{x_{\text{э}}^2 + r_{\text{э}}^2}.$$

Коэффициент полезного действия индуктора

$$\eta_{\text{и}} = \frac{r_2'}{r_{\text{э}}}.$$

Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi = \frac{r_{\text{э}}}{z_{\text{э}}}.$$

Средняя полезная мощность, Вт,

$$P_{\text{T}} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \vartheta \cdot \rho_{\text{ал}} \cdot c_{\text{ал}} \cdot \Delta T}{4},$$

где  $c_{\text{ал}}$  - удельная теплоёмкость алюминия;

$\rho_{\text{ал}}$  - плотность алюминия.

Тепловые потери через изолирующий цилиндр, Вт,

$$\Delta P_T = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ac} \cdot a_1 \cdot (t_k - t)}{\ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)},$$

где  $\lambda_{ac}$  - коэффициент теплопроводности изолирующего цилиндра.  
Полезная средняя мощность в заготовке, Вт,

$$P_2 = P_T + \Delta P_T.$$

Ток в одновитковом индукторе, А,

$$I'_и = \sqrt{\frac{P_2}{r'_2}}.$$

Напряжение на одном витке индуктора, В,

$$U'_и = I'_и \cdot z_{\text{э}}.$$

Ток в индукторе, А,

$$I_и = \frac{I'_и}{W_0}.$$

Напряжение на индукторе, В,

$$U_и = U'_и \cdot W_0.$$

Тепловой КПД индуктора

$$\eta_t = \frac{P_T}{P_2}.$$

Полный КПД индуктора

$$\eta = \eta_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{т}}.$$

Мощность подводимая к индуктору, Вт,

$$P_{\text{и}} = \frac{P_2}{\eta_{\text{и}}}.$$

Активное, реактивное и полное сопротивление индуктора, Ом,

$$r_{\text{и}} = W_0^2 \cdot r_{\text{э}},$$

$$x_{\text{и}} = W_0^2 \cdot x_{\text{э}},$$

$$z_{\text{и}} = W_0^2 \cdot z_{\text{э}}.$$

### 3.5.2.5 Расчёт конденсаторной батареи

Для компенсации реактивной мощности установки применяют конденсаторные банки, которые обычно объединяют в конденсаторную батарею. При этом часть банок постоянно подключена к индуктору, а часть банок включена через коммутирующие устройства - эти банки подключаются по мере необходимости для подстройки колебательного контура в резонанс при изменении параметров загрузки вовремя нагрева.

Задачей расчёта является определение необходимого числа конденсаторных банок, а так же электрических потерь в конденсаторах.

Реактивная мощность конденсаторной батареи, Вар,

$$P_{\text{кб}} = P_{\text{и}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{и}} \cdot k_{\text{б}},$$

где  $k_{\text{б}}$  – коэффициент запаса ( $k_{\text{б}}=1,1 - 1,3$ ).

Общая ёмкость конденсаторной батареи, Ф,

$$C_{\text{кб}} = \frac{P_{\text{кб}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_{\text{и}}^2}.$$

Необходимое число конденсаторных банок

$$N_{\text{б}} = \frac{C_{\text{кб}}}{C_{1,0}},$$

где  $C_{1,0}$  - номинальная ёмкость одной банки, Ф.

Электрические потери в конденсаторной батарее, Вт,

$$P_{\text{э.б}} = P_{\text{кб}} \cdot \text{tg}\delta,$$

где  $\text{tg}\delta$  - тангенс угла диэлектрических потерь.

### 3.5.2.6 Расчет водоохлаждения индуктора

В задачу расчета входит определение потребного расхода воды необходимого для отведения тепла, вызываемого электрическими потерями в индукторе и тепловыми потерями от загрузки через футеровку, а также проверка допустимой температуры меди индуктора.

Мощность, отводимая водой, Вт,

$$\Delta P = P_{\text{T}} \cdot \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right).$$

Гидравлический эквивалент диаметра канала охлаждения, м,

$$D_0 = \frac{4 \cdot S_{\text{в}}}{\Pi_{\text{в}}},$$

где  $S_{\text{в}}$  – площадь отверстия трубки, м<sup>2</sup>;

$\Pi_{\text{в}}$  – внутренний периметр трубки, м.

Коэффициент, учитывающий влияние качества поверхности трубки на гидравлическое давление

$$\lambda_1 = 10^{-2} \cdot \left( \frac{k}{D_0} \right)^{0,314},$$

где  $k$  – коэффициент шероховатости, равный 1,5 – 2 м; принимаем  $k=2$ .  
Скорость воды в канале охлаждения, м/с,

$$v_B = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot D_0}{4,9 \cdot 10^2 \cdot \lambda_1 \cdot l_1}},$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое давление, необходимое для пропускания требуемого количества воды по каналу длиной  $l_1$ ; принимаем равным  $2 \cdot 10^5$  Па.

Расход охлаждающей воды, м<sup>3</sup>/с,

$$Q_{\text{охл}} = v_B \cdot S_B \cdot n,$$

где  $n$  – число ветвей охлаждения.

Температура воды на выходе  $t_{\text{вых}}$  не должна превышать  $65$  °С.

$$t_{\text{вых}} = \frac{0,24 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P}{Q_{\text{охл}}} + t_{\text{вх}}.$$

При расчете охлаждения индуктора следует проверить, является ли характер движения воды вихревым, обеспечивающим хороший отвод тепла с поверхности трубки.

Для этого определяется число Рейнольдса  $Re$ , которое характеризует режим течения жидкости в канале

$$Re = \frac{v_B \cdot D_0}{\mu'},$$

где  $\mu'$  – кинематическая вязкость воды.

### 3.5.2.7 Расчет воздушного охлаждения индуктора

По принципу работы различают вентиляторы радиальные и осевые. В зависимости от разности полных давлений, создаваемых при перемещении воздуха, радиальные вентиляторы делят на группы низкого давления,

среднего давления, высокого давления и вентиляторы специального назначения.

Вентиляторы, как правило, приводят в действие электродвигателями, с которыми они соединяются одним из следующих способов:

- а) непосредственно на одном валу или через эластичную муфту;
- б) клиноременной передачей с постоянным передаточным отношением;
- в) регулируемой бесступенчатой передачей через гидравлические и индукторные муфты скольжения.

В зависимости от состава перемещаемой среды вентиляторы изготавливают:

- а) обычного исполнения;
- б) коррозионностойкие;
- в) взрывобезопасного исполнения;
- г) пылевые.

Вентиляторы следует подбирать по сводному графику или индивидуальным характеристикам, разработанным с учетом оптимальных технико-экономических показателей.

Диаметры каналов охлаждения, мм,

$$d_i'' = d_{i-1} + 2 \cdot h_k,$$

$$d_i' = d_{i-1} + 2 \cdot h_v,$$

где  $h_k$  – высота канала охлаждения;

$h_v$  – высота витка.

Площади каналов охлаждения, мм<sup>2</sup>,

$$S_i = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ (d_i'')^2 - (d_i')^2 \right].$$

Суммарная площадь каналов охлаждения, мм<sup>2</sup>,

$$S_k = \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^{N_k} S_i.$$

Допустимый перепад температуры, °С,

$$\Delta t = t_k - t_0,$$



где  $t_k$  – температура воздуха на выходе;

$t_0$  – температура окружающей среды.

Масса воздуха, прокачиваемого через каналы охлаждения, г,

$$m_B = \frac{P_1 - P_2}{\Delta t \cdot C_p},$$

где  $C_p$  – теплоемкость воздуха.

Плотность воздуха на выходе каналов охлаждения, г/м<sup>3</sup>,

$$\rho_B = \frac{273 \cdot M}{V_m \cdot (273 + t_k)},$$

где  $M$  – средняя молекулярная масса воздуха;

$V_m$  – объем одного моля газа при 20<sup>0</sup>С.

Расход воздуха на одну секцию, л/сек,

$$Q_1' = \frac{m_B \cdot V_m \cdot (273 + t_k)}{273 \cdot M}.$$

Общий расход воздуха, м<sup>3</sup>/час,

$$Q_1 = \frac{m_B \cdot V_m \cdot (273 + t_k) \cdot 3600}{273 \cdot M \cdot 10^3} \cdot n_c,$$

где  $n_c$  – количество секций.

Скорость воздуха на выходе канала охлаждения, м/с,

$$V_B = \frac{Q}{S_k \cdot 10^{-3}}.$$

Кинетическая энергия для перекачки одного литра воздуха, Дж,

$$W_k = \frac{\rho_B \cdot V_B \cdot 10^{-3}}{2}.$$

Давление прокатки, атм,

$$\Delta P' = \frac{W_k}{S_k \cdot 10^{-2}}.$$

Давление прокатки, Па,

$$\Delta P = \Delta P' \cdot \frac{10^5}{1,02}.$$

Расчет параметров индукционных установок для нагрева тел с другой конфигурацией (полый цилиндр, плоская пластина и т.д.) полностью аналогичен приведенному здесь расчету с той лишь разницей, что для вычисления значений активного и реактивного сопротивлений, а также активной и реактивной мощностей в системе «индуктор–загрузка» должны использоваться другие, соответствующие заданной конфигурации, формулы, приведенные, в частности, в литературе [3] по библиографическому списку.

## 3.6 Индукционные установки для поверхностной закалки

### 3.6.1 Основные типы закалочных индукторов

Индуктор является основным элементом высокочастотной закалочной установки, определяющим качество закалки и экономичность процесса. Можно условно выделить следующие основные типы индукторов:

- 1) для внешних цилиндрических поверхностей;
- 2) для плоских поверхностей;
- 3) для внутренних цилиндрических поверхностей;
- 4) индукторы для тел сложной формы.

Любой индуктор содержит индуктирующий провод, создающий магнитное поле, токоподводящие шины, контактные колодки для подсоединения к закалочному трансформатору, устройства для подачи воды, охлаждающий индуктор и нагретую поверхность. Индукторы для нагрева плоских и внутренних цилиндрических поверхностей часто снабжают магнитопроводами, повышающими КПД и  $\cos\varphi$  индуктора. Магнитопроводы применяются также для формирования магнитного поля, обеспечивающего требуемую форму закаленного слоя. Основными параметрами индуктора являются ширина индуктирующего провода  $a$ ; его толщина  $d_1$  и зазор между индуктором и деталью.

Различают два способа закалки: одновременный и непрерывно - последовательный. При одновременном способе весь участок поверхности, подлежащий закалке, нагревается одним или несколькими неподвижными индукторами, а затем охлаждается закалочной жидкостью. При непрерывно – последовательном способе нагреваемая деталь перемещается относительно индуктора, нагреваясь за время нахождения его в магнитном поле до температуры закалки, после чего охлаждается.

Одновременный способ используется, когда мощность генератора достаточна для нагрева всей детали. Меняя зазор  $h$  и ширину индуктирующего провода или применяя магнитопроводы, можно добиться требуемого распределения температуры даже при закалке тел сложной формы. Ширина индуктирующего провода при нагреве всей детали или отдельного его элемента берется примерно равной ширине нагреваемой зоны. Если нагревается участок детали, то ширина провода  $a_1$  берется на 10-20% большей ширины участка, что позволяет компенсировать теплоотвод в соседние зоны и ослабление магнитного поля у краев индуктора. Индукторы для одновременного нагрева обычно не имеют постоянного охлаждения. Тепло, выделяющиеся в индукторе во время

нагрева, аккумулируется медью индуцирующего провода, толщина которого выбирается из условия нагрева до температуры не свыше 250 °С. Это требование обычно выполняется при  $d_1 = (2.5 \div 4)x_k$  при средних частотах и при  $d_1 = (5 \div 6)$  мм при радиочастотах.

Непрерывно – последовательный нагрев используется, когда одновременный нагрев требует слишком большой мощности генератора или дает избыточную производительность. Непрерывно – последовательный способ применяется для нагрева тел простой конфигурации с плоской или цилиндрической поверхностью. Ширина индуцирующего провода определяется мощностью генератора или требуемой производительностью. При заданной мощности генератора:

$$a_1 = \frac{10^3 \cdot P_2 \cdot \eta_u \cdot \eta_{mp}}{p_0 \cdot l},$$

где  $P_2$  – мощность генератора, кВт;

$\eta_u$  и  $\eta_{mp}$  – КПД индуктора и трансформатора;

$p_0$  – удельная мощность, необходимая для закалки;

$l$  – длина индуцирующего провода.

Если задана производительность, то ширина индуктора и мощность генератора:

$$a_1 = \mathcal{G} \cdot t_k,$$

$$P_2 = 1,56 \cdot 10^{-3} \cdot p_0 \cdot l \cdot a_1,$$

где  $p_0$  и  $t_k$  – определяются из теплового расчета.

Индукторы для непрерывно – последовательного нагрева делают из прямоугольной медной трубки с постоянным водяным охлаждением. Оптимальная толщина стенки трубки  $d_1 = \frac{\pi}{2\Delta_1}$ . При радиочастоте толщина трубки выбирается из условий механической прочности ( $d_1 \geq 1$ ). Закалочная вода подается из специального спрейера расположенного на выходе из индуктора. Расстояние от индуктора до зоны охлаждения

должно быть минимальным, чтобы температура нагретого слоя не успела опуститься ниже температуры закалки.

### **3.6.1.1 Индукторы для внешних цилиндрических поверхностей**

Наружные индукторы для закалки цилиндрических тел имеют высокий КПД и  $\cos\varphi$  даже без применения магнитопроводов, т.к. нагреваемое изделие расположено в зоне сильного магнитного поля. Магнитопроводы иногда применяют для усиления нагрева в какой – либо части нагреваемой детали, или для экранирования соседних элементов от поля индуктора.

### **3.6.1.2 Индукторы для закалки плоских поверхностей**

Равномерный закаленный слой на плоской поверхности получить сложнее, чем на цилиндрической. Равномерный слой можно получить за счет непрерывного перемещения индуктора относительно изделия.

Индукторы для нагрева плоских поверхностей делятся на два типа. Первый тип представляет собой петлю, плоскость которой параллельна нагреваемой поверхности. Индуктирующий провод такого индуктора создают свои зоны нагрева. Для повышения КПД и  $\cos\varphi$  индукторы снабжаются магнитопроводом, концентрирующим поле.

При больших размерах нагреваемой зоны используют зигзагообразные индукторы. Для нагрева дисков и фланцев применяют спиральные индукторы. В центре спирального индуктора ток отсутствует. Этот участок можно уменьшить с помощью магнитного сердечника.

Индукторы второго типа представляют собой петлю, плоскость которой перпендикулярна нагреваемой поверхности. Одна из ветвей является индуцирующим проводом, а другая обратной шиной. Чтобы обеспечить приемлемый КПД такого индуктора без магнитопровода (на радиочастотах), расстояние между ветвями 2 и 3 должно быть взято много больше, чем зазор между индуктором и деталью. Индукторы средней частоты этого типа обязательно снабжаются магнитопроводами. Обратный провод делают большой ширины, чтобы уменьшить его активное сопротивление и индуктивность. Для одновременного нагрева могут использоваться индукторы всех рассмотренных типов.

Для непрерывно – последовательного нагрева обычно используются плоские индукторы.

### 3.6.1.3 Индукторы для внутренних поверхностей

Для нагрева внутренних поверхностей используются три основных типа индукторов. Цилиндрические индукторы применяют для закалки отверстий диаметром не менее 40 мм. Индукторы состоят из одного или нескольких витков индуцирующего провода, магнитопровода и токоподводящих шин. В отдельных случаях, особенно на радиочастоте, индукторы не имеют магнитопровода. Для закалки сквозных отверстий малого диаметра применяют стержневые индукторы, состоящие из толстостенной трубки с отверстиями и токоподводящих шин. Недостатком является наличие контактов, которые необходимо каждый раз, чтобы надеть деталь разбирать.

Отверстие диаметром 20-40 мм нагревают петлевыми индукторами при вращении детали. Индукторы обязательно снабжаются магнитопроводом.

### 3.6.2 Выбор частоты

Поверхностная закалка относится к процессам в которых используется индукционный нагрев. Целью поверхностной закалки является получение высокой прочности и твердости поверхностного слоя при сохранении пластичной сердцевины.

Выбор частоты при поверхностной закалке определяется следующими факторами:

- 1) необходимостью нагрева при котором обеспечивается наименьший период температуры в закаленном слое, наибольший термический КПД и высокая производительность;
- 2) допустимым уровнем потерь в индукторе;
- 3) высоким электрическим КПД индуктора;
- 4) типом высокочастотного оборудования.

Первое требование обеспечивается при соотношении  $x_k \prec \Delta_k$ , где  $x_k$  – глубина закаленного слоя,  $\Delta_k$  - глубина проникновения.

При таком соотношении, распределение плотности тока и энергии по сечению нагреваемого слоя наиболее равномерно и термический КПД часто превышает 40%.

С уменьшением глубины закаленного слоя при неизменной частоте увеличивается необходимая удельная мощность при одновременном уменьшении времени нагрева, и возникают удельные потери в индукторе. Минимальная глубина закаленного слоя, при которой потери в индукторе не превышают допустимого значения ( $0,4 \text{ кВт/см}^2$ ), определяется соотношением:

$$x_{\text{кmin}} \approx 0.25 \cdot \Delta_{\text{к}}$$

Диапазон частоты, обеспечивающий глубинный тип нагрева и допустимые потери в индукторе, определяется неравенством:

$$\frac{0,015}{x_{\text{к}}^2} < f < \frac{0.25}{x_{\text{к}}^2}$$

Как показали экспериментальные исследования, максимум полного КПД обеспечивается при частоте:

$$f_{\text{opt}} \approx \frac{0,06}{x_{\text{к}}^2}$$

Это выражение может служить для уточнения выбора частоты лежащей в диапазоне определяемым предыдущим выражением.

Для наиболее часто встречающегося случая закалки внешней цилиндрической поверхности нижняя граница частоты, при которой КПД мало отличается от предельного, дается соотношением:

$$f > \frac{F_0}{D_2^2}$$

где  $D_2$  – диаметр детали;

$$F_0 = f\left(\frac{D_1}{D_2}; \frac{D_2}{a_1}\right);$$

$D_1$  – диаметр индуктора;

$a$  – ширина индуктора.

В диапазоне средних частот в качестве источников питания применяются магнитные генераторы или статические преобразователи частоты, КПД которых достигает 90 – 92%. Закалочные трансформаторы имеют КПД 85-90%.

При частотах  $f \geq 66 \text{ кГц}$  применяются ламповые генераторы, статические транзисторные преобразователи и воздушные трансформаторы имеющие низкий КПД. Поэтому при закалке на глубину  $x_k > 2 \text{ мм}$  следует использовать средние частоты.

Радиочастоты следует использовать при  $x_k < 2 \text{ мм}$ , а также для установок малой производительности, предназначенных для термообработки широкой номенклатуры деталей.

Более сложен вопрос выбора частоты для закалки деталей сложной формы (шестерни, зубчатые колеса и т.д.).

При закалке зубчатого колеса условия нагрева зубцов и впадин различны. Точка  $O$  в зубце находится под действием большего числа источников тепла, чем точка  $O_1$  у впадины.

При низкой частоте, когда глубина проникновения тока сравнима с толщиной зубца, плотность тока в зубцах падает и впадины нагреваются сильнее зубцов. Существует оптимальная частота, при которой вся поверхность нагревается равномерно, при этом удельная мощность во впадине примерно в два раза больше, чем в зубцах. Оптимальная частота определяется из выражения:

$$f \approx \frac{0.2}{R_2^2},$$

где  $R_2$  – радиус наименьшего закругления.

или



$$f \approx \frac{3 \cdot 10^5}{M^2},$$

где  $M$  – модуль зубчатого колеса.

Эти ограничения можно снять проводя нагрев на двух частотах.

### 3.6.3 Тепловой расчет

Целью теплового расчета является определение удельной мощности  $p_{нов}$ , мощности передаваемой в деталь  $P_2$ , и время нагрева  $\tau_k$ , которые полностью характеризуют режим нагрева.

Глубина активного слоя, величина эквивалентная глубине проникновения тока в изотропное тело, определяется из соотношения:

$$\xi = M\Delta_k$$

$$\text{где } M = f\left(\frac{x_k}{\Delta_k}, \mu_r\right);$$

$\Delta_k = 0,5/\sqrt{f}$  - глубина проникновения тока в сталь нагретую выше  $750^\circ\text{C}$ ;

$\mu_r$  - относительная магнитная проницаемость на глубине  $x > x_k$ .

Для приближенных расчетов достаточно принять среднее значение  $\mu_r = 16$ . В таблице 1 приведены значения  $M$  в зависимости от отношения  $\frac{x_k}{\Delta_k}$  при  $\mu_r = 16$ .

Таблица 3.7

$\frac{x_k}{\Delta_k}$	$M$	$\frac{x_k}{\Delta_k}$	$M$	$\frac{x_k}{\Delta_k}$	
0	0,250	0,4	0,532	0,8	0,
0,1	0,293	0,5	0,614	0,9	834
0,2	0,369	0,6	0,690	1,0	0,
0,3	0,447	0,7	0,770		902
					0,
					953

При  $\frac{x_k}{\Delta_k} > 1$  принимают  $M \approx 1$ . Если  $\xi < 0,3x_k$ , то можно считать  $\xi = 0$ .

Это соответствует чисто поверхностному типу нагрева и обычно такие режимы не рекомендуются.

Время нагрева находится по заданным температурам  $t_{нов}$  и  $t_k$  на основании соотношений:

- для пластины нагреваемой с одной и с двух сторон

$$\frac{F_0 + S(\alpha, 0, F_0)}{F_0 + S(\alpha, \beta_k, F_0)} = \frac{t_{нов}}{t_k}$$

$$\frac{F_0 + S(\alpha, 1, F_0)}{F_0 + S(\alpha, \beta_k, F_0)} = \frac{t_{нов}}{t_k}$$

где  $\alpha$  - относительная глубина активного слоя;

$\beta$  - относительная координата;

$F_0$  - число Фурье.

$\beta_k$  - значение  $\beta$  при  $x = b_k$ .

Для пластины нагреваемой с одной стороны  $\alpha = \xi / d_2$ ,  $\beta = x / d_2$ ,  $F_0 = a\tau / d_2^2$ . Для пластины нагреваемой с двух сторон  $\alpha = 2\xi / d_2$ ,  $\beta = 2x / d_2$ ,  $F_0 = 4a\tau / d_2^2$ . Для цилиндра  $\alpha = 1 - 2\xi / d_2$ ,  $\beta = 1 - 2x / d_2$ ,  $F_0 = 4a\tau / d_2^2$ . Во всех формулах  $d_2$  - толщина пластины или диаметр цилиндра, м;  $x$  - расстояние от поверхности, м;  $\xi$  - глубина активного слоя, м.

Задаваясь значениями  $F_0$  (от 0,05 до 0,3 для пластины и от 0,025 до 0,2 для цилиндра), при известных  $\alpha$  и  $\beta$ , по таблицам приложений П1 и П2 определяется значение вспомогательных функций  $S(\alpha, \beta, F_0)$  соответственно для пластины и для цилиндра. Далее, по выражениям (5) и (6), для каждого значения  $F_0$  рассчитываются отношения  $\frac{t_{нов}}{t_k}$  и строится график

$\frac{t_{нов}}{t_k} = f(F_0)$ . В точке пересечения полученной кривой с заданным в

исходных данных отношением  $\frac{t_{нов}}{t_k}$ , находится требуемое число Фурье  $F_0$  и соответствующее ему время нагрева  $\tau$ .

Если  $F_0 > 0,3$  для пластины или  $F_0 > 0,2$  для цилиндра, то время нагрева определяется аналитически:

для пластины нагреваемой с одной стороны

$$\tau = \frac{d_2^2 \left( S(\alpha, 0) - \frac{t_{нов}}{t_{к}} \cdot S(\alpha, \beta_{к}) \right)}{a \left( \frac{t_{нов}}{t_{к}} - 1 \right)}$$

для пластины нагреваемой с двух сторон

$$\tau = \frac{d_2^2 \left( S(\alpha, 0) - \frac{t_{нов}}{t_{к}} \cdot S(\alpha, \beta_{к}) \right)}{4a \left( \frac{t_{нов}}{t_{к}} - 1 \right)}$$

для цилиндра

$$\tau = \frac{d_2^2 \left( S(\alpha, 1) - \frac{t_{нов}}{t_{к}} \cdot S(\alpha, \beta_{к}) \right)}{4a \left( \frac{t_{нов}}{t_{к}} - 1 \right)}$$

По известным времени нагрева и заданной температуре поверхности определяется удельная мощность:

для пластины нагреваемой с одной стороны

$$P_{нов} = \frac{\lambda \cdot t_{нов}}{d_2 (F_0 + S(\alpha, 0, F_0))};$$

для пластины нагреваемой с двух сторон

$$P_{нов} = \frac{2\lambda \cdot t_{нов}}{d_2 (F_0 + S(\alpha, 0, F_0))};$$

для цилиндра

$$P_{нов} = \frac{\lambda \cdot t_{нов}}{d_2 (F_0 + S(\alpha, 1, F_0))}.$$

Если нагревается часть поверхности или имеется в виду непрерывно последовательный нагрев, то для приближенного учета утечки тепла в осевом направлении полученные значения удельной мощности умножаются на 1,2.

Мощность, передаваемая в нагреваемую деталь, равна:

$$P_2 = S_2 p_{нов}$$

где  $S_2$  - площадь нагреваемой поверхности,  $m^2$ .

### 3.6.4 Определение геометрических размеров индуктора

Основными параметрами индуктора являются ширина индуктирующего провода  $a_1$ , его толщина  $d_1$ , и зазор между индуктором и деталью  $h$ .

Диаметр индуктора определяется из соотношения, м:

$$D_1 = (1,05 - 1,1)D_2$$

При одновременном способе нагрева, может нагреваться как вся деталь, так и ее отдельный участок. При нагреве всей детали ширина индуктирующего провода берется примерно равной ширине нагреваемой зоны:

$$a_1 \approx a_2 .$$

Если нагревается участок детали, то ширина провода берется на 10-20% большей ширины участка:

$$a_1 \approx (1,1 - 1,2)a_2$$

Индукторы для одновременного нагрева обычно не имеют постоянного охлаждения индуктирующего провода. В этом случае толщина токонесущей стенки индуктирующего провода выбирается из соотношения

- при частоте до 10 кГц

$$d_1 = (2,5 - 4)x_K$$

- при частоте более 10 кГц

$$d_1 = 5 - 6 \text{ мм}$$

При непрерывно-последовательном способе нагрева, ширина индуктирующего провода определяется мощностью генератора или требуемой производительностью.

При заданной мощности генератора

$$a_1 = \frac{P_2 \eta_u \eta_{mp}}{P_{нов} l},$$

где  $P_2$  – мощность генератора, Вт;

$\eta_u$  и  $\eta_{mp}$  - КПД индуктора и трансформатора соответственно;

$l$  – длина индуктирующего провода, м.

Для приблизительного расчета можно принять  $\eta_u \approx \eta_{mp} \approx 0,8$ .

Если задана производительность, а следовательно, и скорость  $v$  движения детали относительно индуктора, то ширина индуктора и мощность генератора определяются из выражений

$$a_1 = vt;$$

$$P_2 \approx 1,56 P_{нов} l a_1.$$

Индукторы для непрерывно-последовательного нагрева делают из прямоугольной медной трубки с постоянным водяным охлаждением. Оптимальная толщина стенки трубки определяется

- при частоте до 10 кГц

$$d_1 \approx 1,57 \Delta_1$$

- при частоте более 10 кГц, толщина трубки выбирается из условия механической прочности:

$$d_1 \geq 1 \text{ мм}.$$

Размеры шин индуктора определяются конструктором исходя из особенностей технологического процесса.

### 3.6.5 Закалочное оборудование

Для поверхностной закалки используются установки, состоящие из закалочного станка, источника питания, линии передачи, управляющей и контрольно измерительной аппаратуры. Система водяного охлаждения обеспечивает охлаждение элементов высокочастотной схемы и закалываемой поверхности.

Закалочные станки служат для подачи, крепления и перемещения деталей в процессе нагрева и охлаждения. Закалочные станки делятся на универсальные и специализированные. Универсальные служат для обработки деталей одного вида, отличающихся по длине и диаметру. Специализированные станки служат для закалки одной или нескольких однотипных деталей. Конструкция закалочных станков зависит от типа индуктора и их проектирование должно производиться совместно.

Надежность закалочных установок во многом определяется работой системы охлаждения. Количество воды для охлаждения конденсаторов, трансформаторов и источников питания определяется их паспортными данными. Расход воды для охлаждения индуктора и токопровода определяется по формуле:

$$w_g = \frac{0,24 \cdot 10^{-3} \Delta P_g}{T_2 - T_1} \text{ м}^3 / \text{с}$$

где  $\Delta P_g$  – мощность отводимая водой, кВт;

$T_1$  и  $T_2$  – температура воды на выходе и входе.

Во избежание выпадения солей температура на выходе не должна превышать  $50^\circ\text{C}$ . для закалочных установок расход охлаждающей воды

$$\omega_g = 0,05 \text{ Pr } k_t$$

где  $k_t$  – коэффициент использования генератора по мощности и времени.

Из этого количества на закалку детали идет 65%, охлаждения трансформатора 15%, индуктора 15%, конденсаторов 5%.

### 3.7. Исследование процессов высокочастотной сварки

#### 3.7.1 Общие понятия о высокочастотной сварке металлов

Токи высокой частоты нашли промышленное применение в 30-40-х гг. прошлого века в основном в области электротермии. В это же время были предприняты попытки их применения для сварки металлов. Использование токов высокой частоты для сварки основано на проявлении двух эффектов: поверхностного и близости.

Работы по сварке металлов токами высокой частоты были начаты в 1944 г. в лаборатории профессора В.П. Вологодина применительно к стыковой сварке труб. Развитие этого направления позволило в середине 50-х гг. XX в. разработать промышленную технологию высокочастотной сварки котельных труб. Следующим шагом в развитии этого вида сварки было ее применение для выполнения продольных швов при производстве электросварных труб.

Были разработаны различные методы реализации этого направления развития сварочного производства. К 1965 г. практически все трубоэлектросварочные станы для производства стальных труб малого и среднего диаметров были оборудованы устройствами для высокочастотной сварки (рис. 3.48). Также были пущены в эксплуатацию станы для сварки алюминиевых и латунных труб, оболочек кабелей. Соединяемые части (детали) располагаются под небольшим углом и соприкасаются в зоне сварки, где металл интенсивно нагревается до расплавления, сдавливается обжимными роликами и осаживается, образуя прочное сварное соединение. Аналогичные работы проводились в ряде зарубежных стран: США, Франции, ФРГ.

Высокочастотная сварка широко применяется в производстве сварных труб. Труба непрерывно движется, для повышения интенсивности нагрева в заготовку трубы вводится ферритный магнитный сердечник. Для сварки труб малого диаметра (до 76 мм) используют ток ламповых генераторов с частотой 440 кгц, для труб больших диаметров (до 426 мм) — ток от машинных генераторов с частотой 8 кгц. Скорость сварки 30—50 м/мин.

Известны два способа передачи энергии к свариваемым кромкам: контактный и индукционный. Каждый способ имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации сварочных устройств.

*Контактный способ.* При этом способе (рис. 3.49) на расстоянии 30—200 мм от места схождения свариваемых кромок накладываться непосредственно на свариваемые поверхности в зазоре между кромками. Наиболее простой и надежной получается конструкция сварочного устройства, если контакты накладываются на кромки сверху. Этот вариант и получил наибольшее распространение.

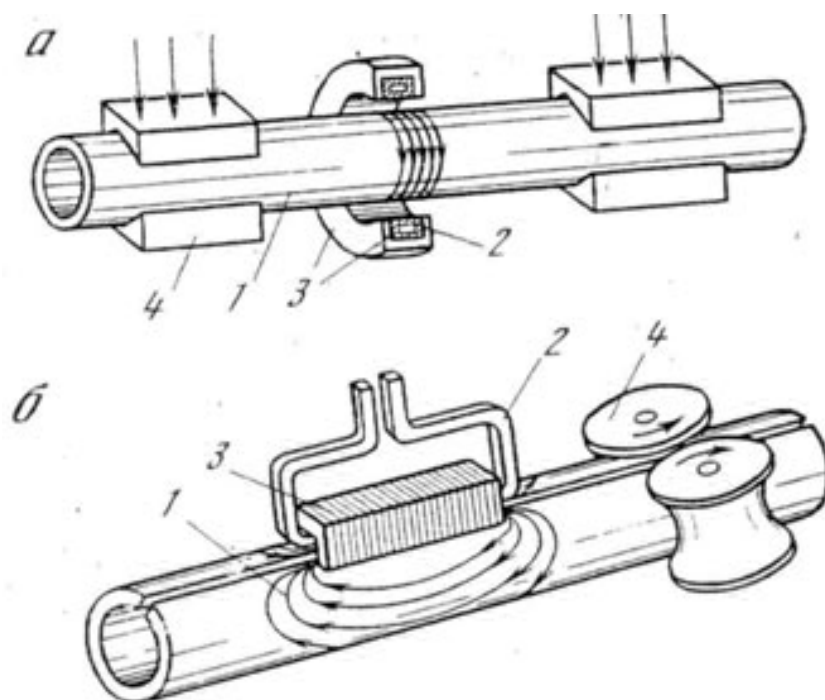


Рис. 3.48. Схемы поперечной (а) и продольной (б) стыковой сварки ТВЧ  
 1 – свариваемые трубы; 2 – индуктор; 3 – магнитопровод;  
 4 – устройство для создания сварочного давления

Контакты могут быть установлены на разных расстояниях от места схождения кромок. Это важно при сварке изделий из несимметричных элементов. К контактам подводится ток высокой частоты. Вследствие поверхностного эффекта ток течет в тонком слое по поверхности заготовки. Вследствие эффекта близости наибольшая часть тока течет вдоль кромок и замыкается в месте их схождения. Кроме того, часть тока течет вдоль кромок в сторону, противоположную от места их схождения, и замыкается по периметру внутри трубной заготовки. Этот ток можно уменьшить, если внутри трубной заготовки расположить магнитопровод из материала с большой магнитной проницаемостью. Кроме внутреннего магнитопровода, целесообразно устанавливать наружный магнитопровод вблизи свариваемых кромок. Длина внутреннего и наружного магнитопроводов определяется расстоянием от контактов до места схождения кромок и должна быть примерно в три - шесть раз больше этого расстояния.

К недостаткам этого способа следует отнести наличие контактов. Контактные наконечники, участвующие в передаче тока к кромкам, работают в весьма напряженных условиях. Средняя плотность тока на контактных наконечниках равна 20 - 70 А/мм<sup>2</sup>.

Однако учитывая, что наконечники могут касаться кромок трубной заготовки в одной точке, которая под действием усилия поджатия контактов к кромкам, равного 20 - 100 кгс, превращается в контактное пятно



площадью 1 - 4 мм<sup>2</sup>, плотность тока в контактном пятне достигает 150 - 1500 А/мм<sup>2</sup>.

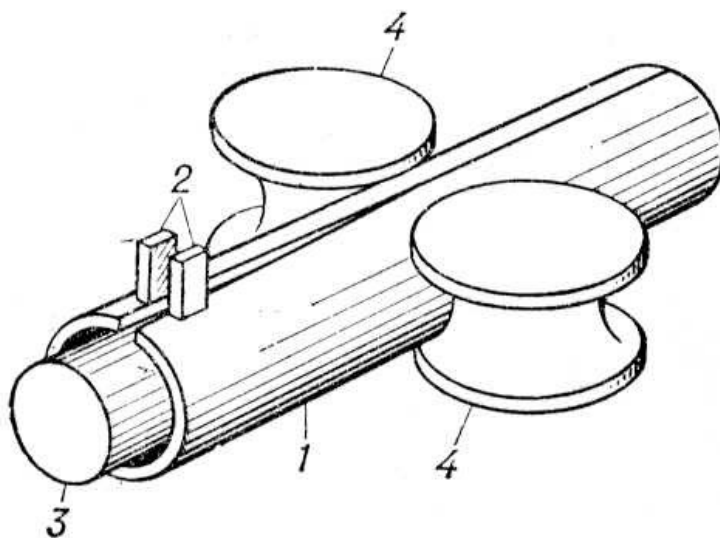


Рис. 3.49. Схема сварки труб контактным способом  
1 — труба; 2 — скользящие контакты; 3 — сердечник;  
4 — обжимные ролики.

В процессе сварки под контактами может образоваться расплавленный металл. В этом случае наряду с контактными пятнами, образуемыми твердым металлом, между контактом и кромкой имеется несколько перемычек из жидкого металла. Как только ток устремляется в эти перемычки, они взрываются. Вместо исчезнувших могут образовываться новые перемычки. Не исключена возможность, что в отдельные моменты электроэнергия к кромкам передается через электрическую дугу.

Контакты должны быть изготовлены из материала, обладающего высокими электро- и теплопроводностью, значительной температурой плавления, достаточной механической прочностью и хорошей стойкостью при возникновении дуги. Контактные наконечники изготавливают, как правило, из вольфрама, его сплавов и бронзы. Обычно контакты выдерживают сварку на длине 20 - 50 км сварного шва при использовании холоднокатаных заготовок и 1—7 км при использовании горячекатаных.

Вместо скользящих контактов могут быть использованы контактные ролики, катящиеся по кромкам. Усилие поджатия контактных роликов к кромкам может быть значительным (1 - 3 тс) и переходное сопротивление при использовании роликов уменьшается. Кроме того, ролики можно зачищать с помощью резцов. Срок службы контактных роликов в установке мощностью 400 кВт при частоте 440 кГц и токе до 3500 А достигает одного месяца. Заточка контактных поверхностей производится один раз в смену.

Контактный подвод тока применяется при частотах радиодиапазона (более 60 кГц). Однако он применим и при частоте 8 - 10 кГц, но первые

попытки использования контактных роликов показали, что основным препятствием является налипание разогретой окалины на контактные поверхности роликов. Это приводит к ухудшению электрического контакта между роликами и кромками, разогреву контактных поверхностей и даже вырыву металла кромок.

**Индукционный способ.** При индукционном способе на расстоянии 30 - 300 мм от места схождения кромок устанавливается кольцевой индуктор, охватывающий трубную заготовку (рис. 3.48, а). Под действием поля индуктора в поверхностном слое заготовки наводится ток. Вследствие эффекта близости наибольшая часть индуцируемого тока течет вдоль кромок и замыкается в месте их схождения (полезный ток). Другая часть тока замыкается по периметру внутри трубы заготовки (бесполезный ток). Как и при контактном способе подвода тока, для уменьшения бесполезного тока применяют внутренние и наружные магнитопроводы. Длина магнитопроводов при индукционном способе должна быть на длину индуктора больше, чем при контактном.

Расход электроэнергии, необходимой для сварки, существенно зависит от расстояния между индуктором или контактами и местом схождения кромок. При увеличении этого расстояния увеличиваются время нагрева и, следовательно, потери мощности за счет теплопередачи от нагретых кромок к соседним слоям металла. Это приводит к снижению скорости сварки. При индукционном способе подвода тока расход электроэнергии несколько выше, чем при контактном, так как наряду с кромками нагревается тело трубной заготовки под индуктором.

Коэффициент использования энергии — отношение энергии, затрачиваемой на разогрев только свариваемых кромок, ко всей энергии, поглощаемой заготовкой, — уменьшается с увеличением ее диаметра, поскольку увеличиваются потери в теле заготовки, в то время как мощность для разогрева кромок остается практически постоянной.

При сварке труб из ферромагнитного материала коэффициент использования энергии ниже, так как под индуктором находится материал при температуре ниже температуры магнитных превращений, и потери в теле трубной заготовки возрастают, а мощность, выделяющаяся в разогретые кромки, возрастает незначительно.

Достоинством индукционного способа является исключительная простота и надежность индукторов.

### **3.7.2 Механизм процесса высокочастотной сварки.**

Исходя из современных представлений о сварке металлов, процессы высокочастотной сварки можно разделить на три группы.

1. Сварка давлением с оплавлением. Осуществляется при

предварительном нагреве и местном расплавлении свариваемых поверхностей. Расплавленный металл удаляется из зоны соединения при осадке; сварное соединение образуется между поверхностями, находящимися в твердом состоянии. Скорость нагрева достигает  $150 \cdot 10^3$  °C/с; осадка — 0,15 - 1,5 мм; скорость осадки - 2000 мм/с.

2. Сварка давлением без оплавления. Осуществляется с предварительным нагревом свариваемых поверхностей до температуры ниже точки плавления свариваемого металла. Скорость нагрева не превышает 400 °C/с; осадка — 2,5 - 6,0 мм; скорость осадки - 20 мм/с.

3. Сварка плавлением без давления. Осуществляется при нагреве свариваемых элементов до оплавления. Ванна расплавленного металла застывает, образуя сварной шов без приложения давления. Скорость нагрева доходит до 8000 °C/с.

*Сварка давлением с оплавлением.* Этот процесс наиболее широко распространен при производстве сварных изделий и полуфабрикатов с непрерывным швом из черных и цветных металлов. Схема свариваемых элементов представлена на рис. 3.50 и 3.51. Свариваемые элементы, показанные на рис. 3.51, а, имеют одинаковые геометрические размеры и материал и расположены симметрично относительно вертикальной плоскости. При симметричном подводе тока к свариваемым элементам обеспечивается полная идентичность нагрева. Такую схему будем называть симметричной. Когда свариваемые элементы имеют неодинаковую геометрию (рис. 3.51, б), даже при симметричном подводе тока к элементам плотность тока на них неодинакова. Различны и условия теплоотвода. Обеспечить одинаковый нагрев обоих элементов без принятия специальных мер невозможно. Такую схему будем называть несимметричной. При сварке элементов с различными теплофизическими свойствами схема, приведенная на рис. 3.51, а, будет также несимметричной.

В рассматриваемых схемах оба элемента сходятся под углом  $\alpha$ , на некотором расстоянии от места схождения к элементам подается ток с помощью контактной или индукционной систем, кромки разогреваются и оплавляются, в месте их схождения происходит осадка. Нагрев и деформация свариваемых элементов происходят последовательно. Для осуществления сварки необходимы физический контакт между поверхностями, создание на них активных центров и предупреждение возможности разрушения образовавшихся узлов схватывания после снятия давления осадки. Нагрев активно влияет на все стадии процесса, и поэтому целесообразно рассмотреть его подробно.

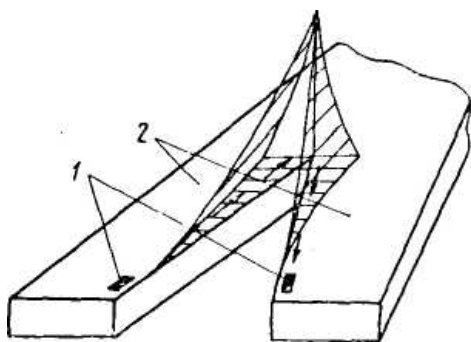


Рис. 3.50. Схема процесса сварки давлением с оплавлением: 1 - место подвода тока; 2 - свариваемые элементы

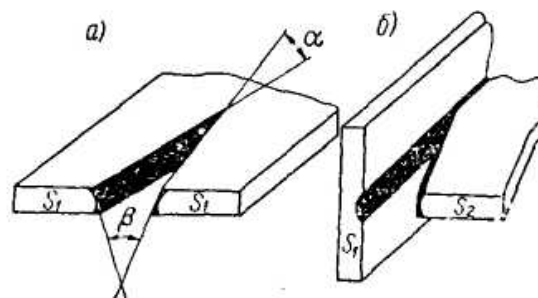


Рис. 3.51. Схемы свариваемых элементов: а - симметричная; б - несимметричная

Расстояние от места токоподвода до места схождения кромок обычно лежит в пределах от 25 до 300 мм. На этом отрезке осуществляется нагрев свариваемых элементов до заданной температуры.

Возможны три варианта нагрева.

1. Участки свариваемых элементов до места схождения нагреваются до температуры ниже  $T_{пл}$ , а вследствие электромагнитных явлений, наибольшая концентрация тока достигается в месте схождения свариваемых элементов, где они оплавляются. Температура в этом месте может достигать  $(1,1 - 1,2) T_{пл}$

2. Участки свариваемых элементов оплавляются до места схождения. Воздействием механических сил электромагнитного поля расплавленный металл удаляется с поверхности нагреваемых элементов. На расстоянии от места выброса расплавленного металла до места схождения элементов происходит дальнейший их нагрев, а в месте перехода с одного элемента на другой повторное оплавление. Как и в первом варианте, температура в месте перехода может достигать  $(1,1 - 1,2) T_{пл}$

3. Свариваемые элементы нагреваются на всем протяжении ниже  $T_{пл}$ , включая и место схождения.

В рассматриваемом процессе нагрев снижает сопротивление пластической деформации, повышает пластичность металла и облегчает удаление окислов со свариваемых поверхностей. Сопротивление пластической деформации растет с увеличением ее скорости при всех температурах и зависит от ее абсолютной величины. При определенных условиях это оказывает существенное влияние на усилия осадки.

Как было показано выше, при высоких градиентах температурного поля нагрев носит чисто поверхностный характер, однако он осуществляется за счет пропуска тока по свариваемым элементам. Плотность тока равномерна по сечению, а глубина прогрева регулируется

частотой тока источника питания, расстоянием между свариваемыми элементами (эффект близости) и временем нагрева. В этом отношении условия высокочастотного нагрева значительно отличаются от условий нагрева при стыковой сварке оплавлением, которая по существующей классификации относится к виду сварки давлением с оплавлением. При стыковой сварке оплавлением нагреваются свариваемые поверхности за счет тепловыделения в контактных перемычках (85 - 90% тепла), в результате чего получается неравномерный нагрев свариваемых поверхностей. Выравнивание температуры происходит во времени при росте количества перемычек, пока свариваемые поверхности не покроются слоем расплавленного металла.

Весьма существенную роль в рассматриваемых схемах нагрева играет удаление со свариваемых поверхностей окислов, образовавшихся за время, предшествующее сварке (при хранении, транспортировке), и появляющихся в ходе нагрева. Все металлы за исключением золота на воздухе окисляются, создавая на поверхности тонкие окисные пленки. Толщина пленки зависит от времени окисления.

Иногда образуются многослойные пленки. При этом на поверхности металла появляется слой окисла, богатого металлом. Например, окисление железа при температуре выше  $600^{\circ}\text{C}$  сопровождается образованием трехслойного окисла  $\text{FeO-Fe}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Соотношение окислов (в массовых долях) при  $T = 700\text{--}900^{\circ}\text{C}$  составляет: 0,66—1,0%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 4,1—5,0%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и около 95%  $\text{FeO}$ .

Еще более сложную картину представляет образование с ростом температуры окисных пленок на сплавах. Так, сплав, состоящий из 23%  $\text{Cr}$ , 7,5%  $\text{Al}$  и 69,5%  $\text{Fe}$ , после окисления на воздухе при  $T = 1200^{\circ}\text{C}$  имел окисную пленку, состоящую из 94,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 3,4%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и 2%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . На чисто, хромистых сталях (20%  $\text{Cr}$ ) при нагреве в слабо окислительной атмосфере окисная пленка состояла из 80%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . С точки зрения возможности разрушения окисных пленок важно иметь представление об их теплофизических и механических свойствах.

Представим себе механизм разрушения окисных пленок при рассматриваемых вариантах нагрева. В первом варианте, когда оплавление происходит в месте схождения свариваемых элементов при достижении температуры, равной  $(1,1 - ) T_{\text{пл}}$ , невозможно расплавление окислов. Исключением являются  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Можно представить, что тонкие пленки окислов быстро разогреваются за счет теплопроводности от сравнительно большого объема контактируемого металла (стартовый нагрев). Далее электрическое сопротивление пленок окислов быстро падает и они начинают разогреваться прямым пропуском тока. В таком случае можно ожидать расплавления пленок окислов, например  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , имеющих большую температуру плавления, нежели основной металл. Окислы, имеющие

высокую температуру плавления, лишь подогреваются, но не расплавляются. Изучением этого явления никто не занимался, и поэтому сказанное следует рассматривать как гипотезу.

При втором варианте нагрева, когда оплавление свариваемых элементов происходит до места их схождения и расплавленный металл удаляется со свариваемых поверхностей механическими силами электромагнитного поля, вероятно разрушение окисных пленок при выбросе металла. В результате повторного нагрева участков свариваемых элементов до места схождения они вновь окисляются, но из-за малого времени подогрева (не более 0,01 с) толщина вновь образовавшейся окисной пленки мала и она может быть разрушена или удалена вместе с жидким металлом в процессе осадки.

При третьем варианте нагрева, когда свариваемые поверхности на всем протяжении, включая место схождения, нагреваются ниже  $T_{пл}$ , очевидно нельзя ожидать разрушения окисных пленок. Исключение может составлять только FeO. Из сказанного следует, что наиболее универсальным является второй вариант нагрева, так как при нем обеспечивается разогрев свариваемых элементов до необходимой температуры и очистка их от окислов, в том числе тугоплавких. Первый вариант нагрева целесообразно применять при сварке малоуглеродистых и малолегированных сталей, на которых окисные пленки состоят из FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Третий вариант нагрева применяется редко.

Вслед за подготовительной фазой образования сварного соединения - нагревом происходит осадка и формирование сварного шва. Скорость осадки и критическая скорость при высокочастотной сварке с оплавлением слабо зависят от частоты тока источника питания, т. е. сварка может быть осуществлена в широком диапазоне частот. Во всех устройствах для высокочастотной сварки предусмотрено плавное бесконтактное регулирование режима нагрева и оплавления свариваемых элементов.

Практика показала, что при высокочастотной сварке оплавлением осадка на порядок меньше, чем при обычной стыковой сварке оплавлением. При стыковой сварке металлов и сплавов с высокой теплопроводностью, оплавление ведется с очень большой скоростью, вследствие чего образуются на свариваемых поверхностях глубокие кратеры. Кроме того, предполагается, что при этом трудно получить на торцах равномерный слой жидкого металла, и поэтому необходимо механически разрушить твердые пленки на твердом металле. Все это ведет к большим деформациям, по существу таким же, как при сварке сопротивлением.

Если эту гипотезу применить к рассматриваемому нами процессу и считать, что в результате протекания тока вдоль кромок происходит равномерный монотонный их нагрев и оплавление, то образование кратеров исключено. Это и может служить причиной малой величины оплавляемого

слоя. Однако при высокочастотной сварке с оплавлением возможен неравномерный нагрев свариваемых элементов вследствие возмущений. При исследованиях характера возмущений и их влияния на температурный режим нагреваемых элементов и оплавляемого слоя установлено, что возмущения связаны с нестабильностью энергетического режима источника питания, работы механизмов подготовки и осадки свариваемых элементов и качества заготовки.

Наиболее типичными и существенными являются возмущения, обусловленные наличием переменной составляющей на выходе выпрямителя, питающего ламповый генератор, и связанные с этим периодические изменения активной мощности, выделяемой в свариваемых элементах (случай сварки на частотах радиодиапазопа).

Третий параметр, зависимый от предыдущих двух,— давление осадки. Как известно, с увеличением скорости осадки растет сопротивление деформированию и, как следствие, повышается давление осадки. С учетом скоростного фактора предлагается для расчета давления осадки при сварке алюминиевых сплавов принимать двукратное его увеличение.

*Сварка давлением без оплавления.* Известно, что процессы сварки давлением без оплавления при отсутствии восстановительной среды могут обеспечить удовлетворительное качество соединения только в узком интервале температур и при деформациях, достаточных для разрушения окисных пленок. Для малоуглеродистых сталей это условие соответствует интервалу  $150 - 200^{\circ} \text{C}$  и  $A_{\text{ос}} = 1,5 - 2,0$  мм, а для алюминиевых сплавов —  $40 - 50^{\circ} \text{C}$  и  $A_{\text{ос}} = 1,2 - 1,4$  мм.

Представим себе два металлических прутка 2, расположенных плотно встык и помещенных в магнитное поле индуктора (рис. 3.52). Если ширина индуктирующего провода достаточно мала (5 - 10 мм), то градиент температуры вдоль оси прутков достаточно большой. При этом ширина зоны нагрева и крутизна фронта температурной кривой слабо зависят от частоты тока источника питания. Для процесса формирования шва при осадке такое распределение температурного поля следует считать благоприятным, так как происходит концентрация пластической деформации в узкой зоне и образуется минимальный грат.

Распределение температурного поля по радиусу прутка всегда резко неравномерно. Приемлемый для условий свариваемости температурный перепад может быть достигнут только при достаточно малых сечениях свариваемого изделия, времени нагрева, исчисляемом секундами или десятками секунд, и низкой частоте тока источника питания. Такие условия распределения температурного поля по сечению свариваемого прутка и условия нагрева в целом следует считать неблагоприятными для процесса сварки. Такие условия распределения температурного поля по сечению

свариваемого прутка и условия нагрева в целом следует считать неблагоприятными для процесса сварки.

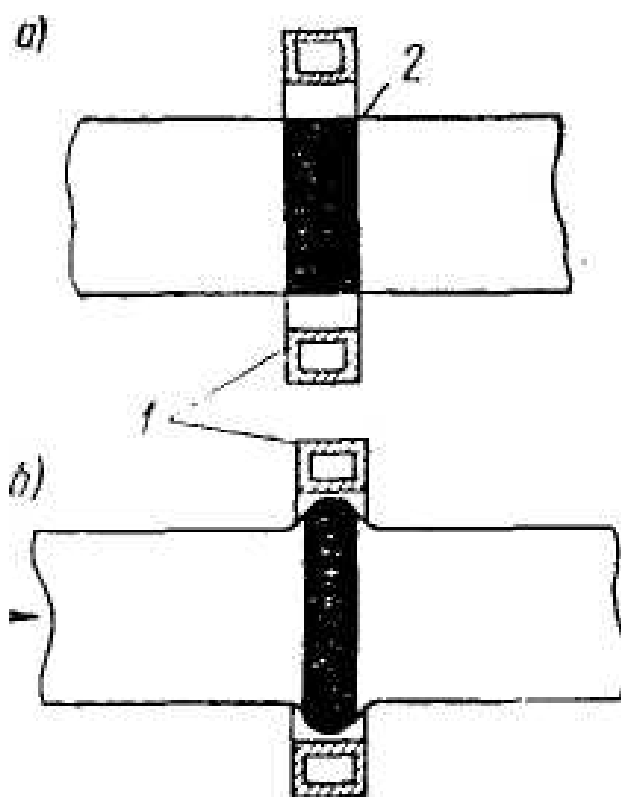


Рис. 3.52. Схема сварки без оплавления: а – нагрев, б – осадка.

Из рассмотрения схемы нагрева нетрудно сделать вывод, что с наименьшим температурным перепадом по сечению и по образующей может быть нагрето цилиндрическое полое тело с тонкой толщиной стенки. Поэтому этот способ имеет ограниченное применение — для стыковой сварки тонкостенных труб.

Очевидно, для достижения узкой зоны нагрева индуктор может быть только одновитковым, но в таком индукторе симметричное поле и, следовательно, симметричное распределение температуры по периметру нагреваемого изделия получить трудно. Кроме того, дополнительную неравномерность температурного поля по периметру вносит разностенность трубной заготовки. Это затрудняет нагрев свариваемых труб в узком температурном интервале. Поэтому указанный способ применяется при стыковой сварке труб из малоуглеродистых сталей.

Значительные трудности связаны с разрушением и удалением окислов при осадке. Делались попытки преодолеть эту трудность следующими способами.

1. Повышением температуры нагрева выше температуры плавления FeO (для ее расплавления). При этом хотя и удастся полностью удалить



расплавленные окислы из зоны сварного соединения, однако происходит рост зерна и образуется видманштеттова структура. Кроме того, происходит частичное оплавление границ зерен, а при кристаллизации появляются осадочные рыхлоты.

2. Применением газовой защиты или флюсов. Удастся при нагреве до  $T = 1200 - 1250 \text{ }^\circ\text{C}$  получить качественное сварное соединение и удовлетворительную микроструктуру околошовной зоны. Защитная среда должна быть восстановительной. Жесткие пределы температурного режима сварки и необходимость применения защитной среды ограничивают применение этого способа.

*Сварка плавлением.* Изделия, подлежащие сварке, плотно прилегают друг к другу отбортованными кромками 2, которые разогреваются и оплавляются с помощью индуктора 1, выполненного по контуру свариваемых кромок (рис. 3.53). По всему периметру изделия создается ванна расплавленного металла, кристаллизация которой происходит без приложения давления. Этот процесс применим для сварки изделий с толщиной стенки от 0,3 до 1,5 мм из малоуглеродистых сталей, сталей аустенитного класса, сплавов титана, а также комбинаций из разнородных металлов и сплавов. Частота тока источника питания выбрана 70 и 440 кГц. Скорость нагрева 250—8000  $^\circ\text{C}/\text{с}$ . Во всех случаях рекомендуется применение защитных сред. Возможна сварка изделий цилиндрической, овальной и прямоугольной форм с максимальной длиной сварного шва 500 мм. Наиболее целесообразно применение процесса в случаях, когда в непосредственной близости от шва находятся элементы из нетеплостойких материалов, а также для массового, автоматизированного производства однотипных деталей.

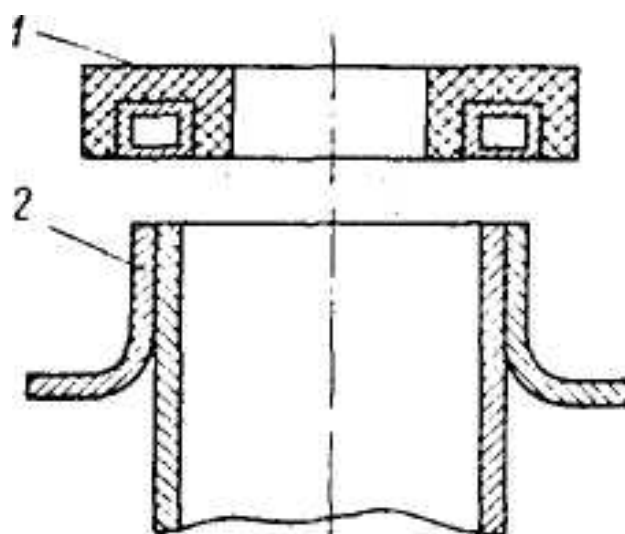


Рис. 8.53. Схема сварки плавлением

Важное значение для рассмотренных вариантов имеют условия свариваемости. Наиболее актуальны они при сварке углеродистых и легированных сталей.

### 3.7.3 Применение высокочастотной сварки

Процессы при высокочастотной сварке характеризуются высокой степенью локализации энергии и возможностью в широких пределах изменять параметры ее режима, что неосуществимо при других методах сварки. Кроме того, энергоемкость процесса высокочастотной сварки значительно ниже, чем при контактной и электродуговой сварке. Нет принципиальных ограничений по скорости сварки. Но при высокочастотном способе трудно сваривать изделия конечной длины, так как неизбежны непроверенные участки в начале и конце сварного шва. Из-за особенностей систем подвода тока и механизмов осадки ограничивается сортамент изделий сложной конфигурации, которые можно сваривать методом высокочастотной сварки.

Применение высокочастотной сварки наиболее эффективно при непрерывных процессах изготовления изделий достаточной конфигурации, выпускаемых массовыми сериями, поэтому этот способ нашел наибольшее распространение в производстве прямо- и спиральношовных труб из черных и цветных металлов, оболочек электрических кабелей, в приварке ребер, изготовлений профилей.

Наиболее эффективными процессами с применением высокочастотной сварки давлением получившими наибольшее развитие в промышленности:

1. Сварка прямошовных труб малого и среднего диаметров;
2. Сварка металлических оболочек электрических кабелей;
3. Сварка прямошовных труб большого диаметра;
4. Сварка спиральношовных труб большого диаметра
5. Сварка стальных тонкостенных спиральношовных труб;
6. Сварка оребренных труб.

## 4 ДУГОВЫЕ ПЕЧИ

### 4.1 Область применения и особенности технологических процессов

В настоящее время сталь выплавляется тремя видами металлургических агрегатов: в мартенах, кислородных конверторах и электропечах. Перспективы их развития определяются использованием

исходного вида энергии и сырья, количеством стадий производства, сортаментом сталей, производительностью агрегатов, экологическими аспектами производства.

Сталеплавильные печи, использующие топливный нагрев (кислородные конверторы и мартены), из-за ограниченного уровня рабочих температур и окислительной атмосферы в принципе не позволяют получать высоколегированные стали, так необходимые технике, работающей в сложных условиях. Кроме того, применяемое топливо (в основном, кокс) дорого и дефицитно. В качестве основного исходного сырья используется доменный чугун, производство которого, в свою очередь, очень энергоемко и обладает значительным негативным воздействием на окружающую среду. Добавление в исходную шихту металлического лома (в наиболее совершенных кислородных конверторах доля лома в шихте составляет 28-29, а в мартенах - 30-60%) не изменяет двухстадийного характера получения жидкой стали. Это определяет высокую суммарную энергоемкость процессов (почти 1,2 т условного топлива на 1 т готовую проката) и значительные капитальные затраты. В то же время в мире в результате интенсивного развития промышленного производства накопился громадный фонд стального лома. Только в России в 1990 г. металлофонд составлял 2,35 млрд. т, аналогичной величиной запасов лома обладали и США. Немаловажным фактором является и значительное снижение его стоимости. Электрические печи полностью работают на ломе, что исключает необходимость получения доменного чугуна, как полупродукта для дальнейшего получения стали.

Дуговые печи высокопроизводительны, высокомеханизированы и автоматизированы, что обеспечило резкое улучшение условий труда и снижение потребных людских ресурсов. Немаловажным обстоятельством является значительное улучшение экологической обстановки на металлургических предприятиях, значительное уменьшение капитальных и эксплуатационных затрат. В то же время для плавки стали используется дефицитная и дорогая электроэнергия, что повышает стоимость выплавляемого металла. Однако высокое качество электростали и ее лучшие служебные свойства позволяют электроплавке успешно конкурировать с другими видами сталеплавильного производства.

Значительным недостатком дуговой электроплавки являются негативное влияние на персонал шума от горячей дуги и необходимость создания эффективных систем для удаления пыли и газов. Кроме того, резко переменный режим работы ДСП создает серьезные помехи в системах электроснабжения предприятий.

Перечисленные преимущества и недостатки различных видов сталепла-вильных агрегатов и определили степень их использования в производстве стали. В настоящее время во всем мире повсеместно идет

уничтожение мартенов с переходом на конверторное и электросталеплавильное производство. В развитых странах мартеновское производство прекращено, а доля электростали составляет 1/3 и выше.

#### 4.1.1 Концепция сверхмощной дуговой печи

Интенсивное вытеснение мартеновского процесса кислородно-конвертерным привело к нарушению баланса лома в металлургической промышленности и вызвало необходимость развития процесса с большими возможностями использования избытка лома. Таким процессом является плавка стали в дуговых печах, способных работать и при 100% лома в металлической шихте. В связи с этим уже в 60-х годах началось интенсивное и опережающее развитие электросталеплавильного производства. Особенно быстро оно нарастало, как по объему выплавляемой стали, так и по относительной доле в общем производстве в США, где и появились первые сверхмощные дуговые печи.

Интенсификация плавки стали в дуговых печах вызвала необходимость коренного изменения хода процесса, возможности которого определяются физико-химическими условиями его протекания и требованиями к качеству стали. Последнее имело особое значение в связи с тем, что в дуговых печах выплавляли преимущественно специальные легированные и высоколегированные стали с повышенными и часто с особыми требованиями к свойствам.

Для получения стали относительно высокой степени чистоты при плавке в дуговых печах с трансформаторами малой мощности применяют "классическую" технологию со сменой шлака и продолжительным (до 70 - 100 мин) восстановительным периодом. При такой технологии в окислительный период плавки из металла окисляют углерод и фосфор с одновременной дегазацией и нагревом до температуры, превышающей температуру ликвидуса на 120 - 130 °С. Затем окислительный шлак скачивают и наводят новый восстановительный присадками извести и порошков раскислителей (алюминия, ферросилиция, углерода). Задачей восстановительного периода является получение готовой стали с низким содержанием оксидных и сульфидных включений.

Поскольку процессы диффузионного раскисления и десульфурации протекают на поверхности раздела шлак-металл, в условиях, когда скорость этих процессов контролируется переходом через эту поверхность, эффективность их развития снижается с уменьшением удельной поверхности ванны. Удельная поверхность уменьшается с увеличением вместимости дуговых печей [5] и для 100-т печей составляет 0,2 м<sup>2</sup>/т, что на два-три порядка меньше, чем при внепечной обработке стали, поэтому с увеличением вместимости дуговых печей эффективность диффузионного раскисления и

десульфурации восстановительным шлаком уменьшается. Эффективность рафинирования металла от кислорода и серы в восстановительный период плавки в печах большой вместимости уменьшается или не имеет места вследствие и других особенностей работы таких печей: 1) трудности очистки и качественной заправки откосов и подины печи, что приводит к интенсивному разрушению футеровки ванны в восстановительный период с поступлением частиц футеровки в шлак и ухудшению свойств шлака; 2) недостаточно полного скачивания окислительного шлака из печи и попадания части его в рафинировочный шлак; 3) низкой степени герметизации печи и высокой степени окисленности печной атмосферы (до 10%  $O_2$  и до 2%  $CO_2$ ), затрудняющей раскисление шлака в восстановительный период плавки.

Таким образом, рафинирование стали в восстановительный период плавки в дуговых печах большой вместимости по физико-химическим условиям протекания процессов неэффективно и проведение этого периода нецелесообразно. Обобщение результатов исследований показало, что без ухудшения качества стали, в частности, по загрязненности ее продуктами раскисления плавку в большегрузных печах (100 т) можно вести без восстановительного периода - под одним шлаком. Особые возможности дает внепечная обработка стали, позволяющая существенно улучшить качество стали. С ее помощью возможно получение соответственно требованиям очень низких содержаний кислорода (<0,005%), серы (< 0,002%), углерода (<0,02%). Все это позволило существенно изменить технологию плавки и имело важное значение для возникновения и развития сверхмощных дуговых печей.

Первым сверхмощным дуговым печам (и названию "сверхмощные") начало было положено в 1963 г. фирмой "Northwestern Steel and Wire" (США), где были построены две печи вместимостью по 135 т при мощности трансформаторов 70-80 МВ•А, т.е. удельной мощности 520-600 кВ•А/т. На этих печах применили электроды диаметром 600 мм. Печи имели производительность в слитках 55 т/ч, на их основе были созданы сверхмощные печи, которые получили широкое распространение в сталеплавильном производстве к концу 60-х годов. Сверхмощные дуговые печи первого поколения при вместимости 50-150 т имели удельную мощность трансформаторов 400-500 кВ•А/т. Применяли графитированные электроды диаметром до 600-620 мм. Для уменьшения воздействия дуг на футеровку стен диаметр распада электродов стремились уменьшить, а для уменьшения износа огнеупорного свода высоту его над уровнем ванны увеличить. Производительность печей вместимостью 70 т составляла 35 т/ч. а печей вместимостью 100 т 40-50 т/ч.

Дальнейшее повышение удельной мощности дуговых печей и их производительности сдерживалось недостаточной стойкостью огнеупорной

футеровки стен и свода. Оно вызывало не только повышение расхода огнеупоров, но и увеличение простоев на ремонт кладки. Проблема была решена внедрением водяного охлаждения. Первый в мире водоохлаждаемый свод был установлен для постоянной эксплуатации на 10-т дуговой печи завода «Сибэлектросталь» в 1971 г. В Японии в 70-х годах стали применять водоохлаждаемые панели вместо футеровки верхней части стен. С тех пор водоохлаждаемые элементы стен и свода стали неотъемлемой частью конструкции сверхмощных дуговых печей, что способствовало существенным изменениям в их работе. Появилось новое, второе поколение таких печей, имеющих трансформаторы с удельной мощностью 650 – 800 кВт·А/т [5].

Современный этап развития характеризуется совершенствованием технологии, конструкции, электрооборудования традиционной ДСП переменного тока и решением вопросов рекуперации тепловой энергии, широким внедрением ДСП постоянного тока, созданием ДСП нетрадиционных конструкций (шахтных, двухкорпусных, непрерывного действия и т.д.) и конкуренцией между ними.

#### **4.1.2 Технология производства стали в сверхмощной ДСП**

Из концепции сверхмощной дуговой печи следует необходимость максимального упрощения технологии и уменьшения длительности отдельных периодов плавки стали, поэтому технология плавки стали в печи сверхвысокой мощности в общем значительно проще классической. Функции сверхмощной электропечи обычно сводятся к быстрому и экономичному расплавлению шихты, окислению примесей и нагреву металла. Остальные операции по рафинированию и легированию металла переносят из печи в ковш. В связи с этим возрастает роль вопросов, не имевших такого существенного значения для печей небольшой вместимости, тем более работавших по классической технологии [5].

#### **4.1.3 Заправка печи**

Износ футеровки ванны сверхмощной печи в процессе плавки определяется противоположно действующими факторами. С одной стороны, быстрое плавление лома, расположенного между электродами, обеспечивает образование на подине печи слоя жидкого металла, защищающего футеровку подины от разрушающего воздействия дуг (образования ям) при опускании электродов в нижнее положение, а значительное уменьшение

продолжительности пребывания жидкого металла в печи способствует снижению общего износа подины и откосов. С другой стороны, присутствие в печи большого количества вспененного активного шлака и необходимость нагрева металла перед выпуском до высоких температур ( $>1750^{\circ}\text{C}$ ) для обеспечения возможности внепечного легирования и рафинирования стали и непрерывной разливки способствуют усилению износа футеровки ванны. Однако износ футеровки ванны сверхмощной печи меньше, чем в печи обычной мощности, о чем свидетельствуют данные расхода заправочных материалов. Так, в условиях отечественных заводов при работе 100-т печи обычной мощности расход заправочных материалов составляет 25-30 кг/т стали (ЧМК), а при работе сверхмощной печи только 10-18 кг/т (ОХМК).

Несмотря на сравнительно небольшой износ футеровки ванны, при заправке печи принимают меры для уменьшения общей длительности заправки. С этой целью используют высокопроизводительные заправочные машины роторного типа, помещаемые краном сверху в рабочее пространство печи. После выпуска предыдущей плавки печь наклоняют в сторону рабочей площадки и осматривают футеровку. Остатки металла из углублений подины удаляют повторным сливом или выдувают сжатым воздухом (кислородом), предварительно заправив задний откос. Остатки неслитого металла замораживают на заднем откосе. Подину, откосы, шлаковый пояс печи заправляют заправочной машиной сухим или увлажненным водным раствором жидкого стекла магнезитовым порошком, иногда смесью магнезитового порошка с науглероживателем (количество науглероживателя 15-30%). В зарубежной практике известны случаи заправки печей порошком доломита. Повреждения футеровки в зоне шлакового пояса и нижней части стен восстанавливают и при помощи торкрет-машин. Значительные местные повреждения футеровки торкретируют до восстановления полного профиля последовательно на нескольких плавках. Общая длительность периода заправки не должна превышать 10-15 мин.

Сравнительно небольшой износ футеровки ванны сверхмощной печи позволяет в некоторых случаях отказаться от традиционной заправки подины печи после каждой плавки и перейти на работу с оставлением в печи части жидкого металла (10-15% садки) и шлака на последующую плавку. Это облегчает плавление шихты, ускоряет шлакообразование, улучшает условия работы футеровки печи и уменьшает общую длительность плавки. В этом случае печь полностью опоражнивают только через 6-10 плавков. На промежуточных 6-10 плавках только подправляют откосы и шлаковый пояс печи исходя из их фактического износа. Операции заправки сверхмощных дуговых печей почти не осуществляют вручную. При работе современных печей с донным или эркерным выпуском полное опоражнение печи осуществляют значительно реже (один раз в шесть-семь дней), что связано с меньшим износом футеровки ванны практически не наклоняющейся печи.

Описанная схема работы печи с оставлением части металла и шлака в отечественной литературе получила название работа дуговой печи "на болоте", в немецкой литературе - работа с оставлением "зумпфа" ("болота"). По имеющимся сведениям, такая схема работы позволяет улучшить показатели плавки, так как оставленный в печи шлак, способствуя раннему шлакообразованию на следующей плавке, обеспечивает возможность более ранней дефосфорации металла и уменьшения продолжительности плавки, а оставленный в печи металл защищает футеровку подины от локальных перегревов в период формирования ванны, тем самым обеспечивая возможность работы на высокой мощности.

Обычно до начала завалки (иногда в начале плавления) производят замену или наращивание коротких свечей электродов и их перепуск.

#### **4.1.4 Завалка шихты**

Большинство сверхмощных дуговых печей работает на нелегированной углеродистой шихте с полным окислением примесей, так как в этом случае наиболее полно используются преимущества сверхмощной печи.

Как отмечено выше, сверхмощные печи желательно обеспечивать специально подготовленным ломом, однако неизбежно использование тяжеловесной обрезки прокатных цехов. При загрузке шихты в печь тяжеловесную обрезку необходимо располагать так, чтобы обеспечивалась минимальная длительность расплавления лома и футеровка печи не испытывала излишних тепловых перегрузок. Тугоплавкий плотный лом следует загружать под электроды в зону действия дуг, чтобы ускорить его плавление. Такой лом не следует размещать у водоохлаждаемых панелей стен, где его плавление неизбежно связано с тепловыми перегрузками футеровки стен.

В случае применения кокса для увеличения содержания углерода в расплаве на отечественных заводах кокс загружают в первую бадью после легковесного лома и части тяжеловесной обрезки. Сверху кокс накрывают остальной частью металлической шихты. При такой загрузке находящийся над коксом лом защищает его от окисления атмосферой печи или всплывания при образовании слоя жидкого металла на подине и усвоение углерода шихтой является достаточно стабильным. Не рекомендуется загружать кокс на подину печи, если кокс влажный, в процессе плавления возможен выброс металла из печи. Более стабильное усвоение углерода обеспечивается при использовании чугуна для науглероживания расплава, в таком случае необходимая порция чугуна загружается в печь во время подвалки шихты второй бадьей. Чугун в шихте сверхмощных печей используют сравнительно редко вследствие его высокой стоимости (в 2-2,5



раза выше стоимости лома). Но вместе с тем при использовании чугуна несколько уменьшается содержание меди и никеля в шихте.

Суммарная длительность периода завалки шихты определяется числом бадей, используемых для загрузки всей шихты (обычно две-три бады). Длительность завалки может быть значительно уменьшена в случае применения быстродействующих механизмов открывания и закрывания рабочего пространства печи, быстро действующих завалочных кранов и бадей грейферного типа. На новых сверхмощных 150-т печах ОЭМК, например, продолжительность подъема свода на 500 мм составляет 30 с, продолжительность поворота свода на  $76^\circ$  50 с, для 100-т печей БМЗ эти величины составляют соответственно  $25^\circ$  и 30 с, для 100-т сверхмощной печи ДСП-100И7 эти величины составляют  $40^\circ$  и 40 с.

#### 4.1.5 Плавление шихты

Для экономичной и высокопроизводительной работы сверхмощной дуговой печи важнейшее значение имеет рациональная технология периода плавления. Главной задачей периода является быстрое и экономичное расплавление шихты, осуществляемое способом, обеспечивающим наименьший износ футеровки. В связи с малой продолжительностью окислительного периода в сверхмощной печи в период плавления приходится удалять из металла значительную часть фосфора. Быстрое расплавление металлической шихты в сверхмощной печи обеспечивается высокой удельной мощностью печного трансформатора, правильным выбором электрического режима плавки, улучшением условий работы футеровки, позволяющим увеличить время работы печи на максимальной мощности, применением дополнительных источников тепла (топливно-кислородные горелки, внепечной подогрев шихты), использованием газообразного кислорода для интенсификации расплавления шихты.

Электрический режим плавления должен обеспечить введение в печь максимально возможной для данной стадии периода мощности с обязательным учетом теплового состояния футеровки печи и созданием щадящего режима работы огнеупорной футеровки стен и свода.

Период плавления по особенностям состояния печи включает три стадии: 1) формирование зоны плавления; 2) плавление шихты с горением дуг на образовавшейся ванне жидкого металла при экранировании стен ломом; 3) доплавление остатков шихты при непосредственном излучении части энергии дуг на стены печи (рис. 4.1). Для каждой стадии должен быть разработан собственный электрический режим, учитывающий ее специфику.

В стадии формирования плавильной зоны необходимо обеспечить устойчивую работу дуг и защиту свода и стен в начальной фазе плавления, выбрать оптимальное соотношение скоростей расплавления металла дугами

и рабочего перемещения электродов, чтобы наплавить в кратчайший срок достаточное количество жидкого металла, устранив тем самым возможность перегрева подины, и повысить эффективность использования вводимой в печь энергии.

После погружения дуг в "колодцы", выплавленные в шихте (через 3-7 мин от начала плавления) в стадии формирования ванны, выгодно работать на возможно более длинных и мощных дугах при высоком значении  $\cos \varphi$  печной установки. Не расплавившийся лом и торцы электродов достаточно хорошо экранируют стены и свод.

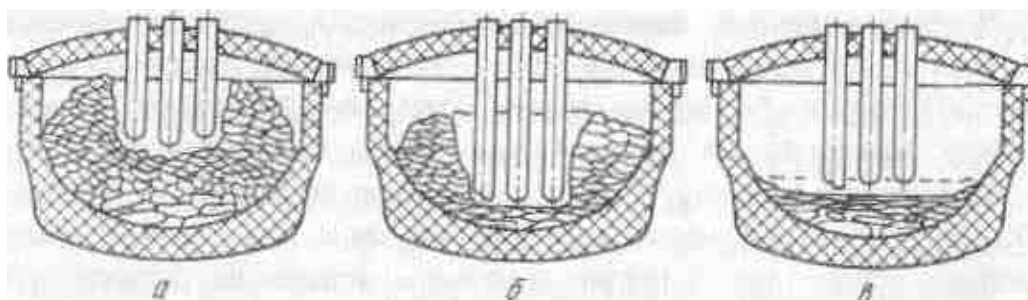


Рис. 4.1. Стадии плавления шихты в высокоомощной дуговой печи

а - формирование плавильной зоны; б - работа электродов на жидкую ванну; в - доплавление шихты и нагрев металла.

Большая часть энергии дуг излучается в стороны и плавит окружающий дуги лом. Передача энергии лому, находящемуся под электродами, происходит менее интенсивно, поэтому лом под дугами плавится медленнее. Скорость рабочего перемещения электродов вниз сравнительно невелика. К моменту опускания электродов в крайнее нижнее положение на подине печи образуется достаточно глубокая ванна, предохраняющая футеровку подины от перегрева и разрушения дугами.

Работа сверхмощной сталеплавильной печи с оставлением "болота" от предыдущей плавки значительно упрощает проведение первой стадии плавления, избавляет от необходимости корректировать скорость опускания электродов в зависимости от количества наплавленного и стекшего на подину металла, позволяет эффективно работать и на очень легком неплотном ломе.

После образования зоны плавления (получения жидкой ванны) в течение второй стадии, пока не расплавится лом, экранирующий стены, также выгодно работать на длинных дугах и максимальной мощности. В это время часть шихты оказывается погруженной в жидкий металл, а часть лежит на откосах печи сравнительно далеко от дуг, поэтому эффективность передачи энергии дуг излучением уменьшается, основным способом передачи энергии от дуг твердой шихте становится передача конвекцией через жидкий металл. Во второй стадии плавления значение коэффициента

мощности печной установки несколько ниже, чем в первой стадии, рабочие токи выше, длина дуг меньше.

До появления сверхмощных печей с водоохлаждаемой футеровкой очень важно было своевременно уменьшить длину и излучающую поверхность дуг при переходе от второй к третьей стадии плавления, чтобы защитить неэкранированную шихтой поверхность футеровки стен от перегрева и оплавления. При этом коэффициент мощности печной установки снижался до 0,65-0,68. Это улучшало условия работы футеровки стен, но приводило к некоторому уменьшению общего уровня вводимой в печь мощности.

Применение водоохлаждаемых панелей в конструкциях стен и свода сверхмощной печи позволило существенно уменьшить тепловые нагрузки на футеровку стен и свода и увеличить продолжительность работы печи на максимальной мощности с длинными дугами. Однако принцип работы в завершающей стадии плавления на относительно коротких погруженных в расплав дугах иногда используется и на печах с водоохлаждаемой футеровкой, так как при таком режиме меньше облучается кирпичная футеровка нижней части стен, а ванна лучше усваивает энергию дуг.

Мощные короткие дуги глубже погружаются в расплав. В результате экранирования дуг расплавом излучение на футеровку стен и свода печи уменьшается и увеличивается усвоение тепла ванной, так как ей непосредственно передается большее количество энергии. Дуги горят более стабильно и меньше отклоняются к стенам под действием электродинамических сил. Несмотря на уменьшение коэффициента мощности печной установки, общее усвоение энергии ванной может возрастать, так как оно растет быстрее, чем снижается коэффициент мощности.

Вместе с тем, работа на больших токах в общем случае неэффективна. Она приводит к увеличению мощности электрических потерь, снижению электрического к.п.д. установки, увеличению расхода электроэнергии на плавку и графитированных электродов (интенсивность расхода электродов вследствие окисления с боковой поверхности и эрозии торца возрастает пропорционально току в степени  $k$ , а  $k=1\div 2$ ). При разработке технологии плавки для сверхмощной печи с водоохлаждаемой футеровкой необходимо исходить из создания условий работы печи длительное время на повышенных значениях напряжения дуги и высоких к.п.д. дуги, применяя более экономичные электрические режимы с относительно длинными дугами при меньших значениях тока. Для реализации такой технологии были применены водоохлаждаемые панели в верхней части стен и сводах. Это позволило увеличить максимально допустимую величину тепловых потоков на футеровку, установлены топливно-кислородные горелки для доплавления шихты в наиболее холодных зонах и на откосах печи между фазами,

использовано экранирование дуг шлаком и применен газообразный кислород для ускорения плавления шихты, окисления углерода и вспенивания шлака. При таком ведении плавки большое значение имеет контроль тепловых потоков в рабочем пространстве печи, определяющих стойкость водоохлаждаемых панелей свода и стен, нижней кирпичной части стен и уровень тепловых потерь с охлаждающей водой.

Существенного снижения тепловых потоков от столба дуги на стены и свод удалось достичь таким технологическим приемом как искусственное вспенивание шлака пузырями CO, образующимися при окислении углерода. Вспенивание шлака осуществляется вдуванием углеродсодержащего порошка в расплав непосредственно под шлак. В период плавления основность шлака обычно составляет  $(CaO)/(SiO_2 + Al_2O_3) = 2$ , что обеспечивает достаточную стабильность шлаковой пены

Опыт работы сверхмощных печей свидетельствует о возможности эффективной работы на длинных дугах и высоких значениях  $\cos \varphi$  в процессе всей плавки. Почти полное погружение длинных дуг в пенистый шлак позволило значительно увеличить к.п.д. дуг и уменьшить по сравнению с обычным режимом продолжительность нагрева жидкой ванны. При этом не замечено вредного воздействия длинных дуг на водоохлаждаемые панели и огнеупоры нижней части стен.

Период плавления на сверхмощных печах проводят с использованием топливно-кислородных горелок, что позволяет уменьшить продолжительность доплавления шихты и облегчить условия службы футеровки стен при работе на длинных мощных дугах. Топливо-кислородные горелки позволяют в какой-то мере компенсировать охлаждающее воздействие водоохлаждаемых панелей и ускорить плавление шихты в так называемых мертвых зонах печи у стен между электродами.

Значительное уменьшение длительности периода плавления и следующего за ним окислительного периода при плавке стали в сверхмощной дуговой печи требует принятия мер для быстрой и эффективной дефосфорации металла и прежде всего ускорения формирования в печи необходимого количества шлака с достаточно высокой дефосфорирующей способностью. Опыт эксплуатации сверхмощных дуговых печей показывает, что для эффективной дефосфорации металла шлаки должны иметь основность  $(CaO) / (SiO_2) > 2,0$ . Достаточно низкая температура плавления шлака, обеспечивающая его быстрое формирование и необходимую жидкоподвижность, при указанной основности может быть получена при содержании оксидов железа в шлаке 15-20%. Для получения необходимой окисленности шлака расход твердых окислителей должен составлять 1,5-2% от массы металла.

При работе на шихте обычного качества с содержанием фосфора менее 0,05% в сверхмощных печах обычно не возникает затруднений с

дефосфорацией металла. Быстрое и раннее шлакообразование при достаточном расходе окислителей, увеличение количества и искусственное вспенивание шлака в завершающей стадии плавления способствуют быстрой и достаточно полной дефосфорации металла в результате ускорения массопереноса в металле и шлаке, увеличения фактической поверхности контакта металл-шлак и частичного обновления шлака вследствие стекания части вспененного шлака через порог рабочего окна в шлаковню и добавок новых порций шлакообразующих материалов. К концу плавления при использовании шихты обычного качества и работе на шлаках необходимой основности  $\{(CaO/jSiO_j) > 2\}$  концентрация фосфора в металле, как правило, не превышает 0,015%. Это означает, что в сверхмощной печи дефосфорация металла в основном завершается в период плавления, поэтому упрощается окислительный период плавки и существенно уменьшается его продолжительность.

Типичный состав шлака конца периода плавления для сверхмощной печи большой вместимости следующий, %: CaO 30-40; SiO<sub>2</sub> 14-17; MgO 5-12; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5-8; MnO 3-5;  $\Sigma FeO$  15-21; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,30; S 0,10. По данным [6], содержание фосфора в готовой стали, полученной в сверхмощных дуговых печах, в среднем соответствовало содержанию фосфора в металле после расплавления шихты. Быстрое плавление шихты и раннее шлакообразование в период плавления способствуют меньшему насыщению металла газами во время плавления. Это также способствует упрощению технологии и уменьшению продолжительности окислительного периода плавки.

#### 4.1.6 Особенности окислительного периода плавки и доводки

Высокая мощность печного трансформатора позволяет быстрее нагреть металл в окислительный период плавки; дефосфорация стали при плавке в сверхмощной печи может быть практически завершена уже в период плавления. В связи с этим главной особенностью окислительного периода плавки является его малая продолжительность (обычно 15-30 мин) [5]. Все технологические задачи окислительного периода решаются намного быстрее, чем в обычной печи, и осуществляются одновременно.

Для обеспечения высоких показателей работы сверхмощной печи необходимо уменьшить продолжительность пребывания жидкого металла в печи, что может быть достигнуто в результате быстрого нагрева металла в окислительный период плавки ( $>10^\circ C/мин$ ), быстрого окисления углерода газообразным кислородом и применения одношлакового процесса плавки. В

большинстве случаев сверхмощные печи работают одношлаковым процессом с доводкой под окислительным шлаком.

Задачей восстановительного периода является получение готовой стали с низким содержанием оксидных и сульфидных включений. В связи с отсутствием восстановительного периода в сверхмощной печи десульфурация металла должна проходить в окислительных условиях в конце плавания и главным образом в окислительный период плавки. Окислительные условия и малая продолжительность пребывания жидкого металла в печи существенно затрудняют проведение десульфурации металла. Благодаря интенсивному кипению ванны увеличивается поверхность контакта металл-шлак и создаются благоприятные кинетические условия для осуществления десульфурации металла. Возможность быстрого нагрева ванны и высокая окисленность печного шлака позволяют при необходимости быстро повышать основность шлака окислительного периода  $(CaO)/(SiO_2)$  до 3 - 3,5 и улучшают условия удаления серы из металла в шлак. Как достигаемые, так и равновесные значения коэффициента распределения серы между шлаком и металлом для окислительных условий сравнительно невелики и обычно не превышают 6-8, поэтому одношлаковый процесс плавки с доводкой под окисленным шлаком в печах с большой вместимостью обеспечивает удаление не более 35 - 50 % серы, имевшейся в металле после расплавления шихты. Это дает возможность получать в готовом металле 0,025-0,03% серы при работе на шихте среднего качества. Большая степень десульфурации металла (удаление 50-60% серы, имевшейся в металле после расплавления) может быть обеспечена более ранним и большим повышением основности или увеличением количества окисленного углерода, однако это приводит к увеличению длительности пребывания металла в печи и возрастанию общей длительности плавки. При работе на шихте с повышенным содержанием серы или необходимости получения в стали менее 0,020 % серы одношлаковый процесс плавки обычно сочетают с внепечной десульфурацией металла.

Таким образом, все большее место в технологии получения стали приобретают различные методы внепечной обработки стали.

#### **4.1.7 Внепечная обработка стали**

Важнейшим фактором, характеризующим повышение качественных характеристик металлопродукции является, во-первых, снижение концентрации вредных примесей и, во-вторых – обеспечение выплавки металла со все более узкими пределами колебаний химического состава.

Именно это в сочетании с методами точного регулирования макро- и микроструктуры металла обеспечивает повышение прочностных характеристик и пластических свойств и дает возможность уменьшить расход металла в целом [2].

При сравнительно неизменных общих объемах производства стали в мире (700-750 млн т/год) качественная характеристика производимого металла непрерывно растет.

Одновременно с этим наблюдается неуклонный рост масштабов непрерывной разливки, которая предъявляет особо высокие требования к качеству жидкой стали. Практически вся сталь, разливаемая непрерывным способом, подвергается внепечной обработке. Таким образом, за последние 25-30 лет внепечная обработка перестала быть экзотическим дополнением к технологической цепочке при производстве особо ответственной или дорогостоящей марки стали.

Внепечная обработка стала неременным элементом технологии, и во многих случаях технология плавки в первичном агрегате подстраивается под возможности внепечной обработки (использование менее чистых шихтовых материалов, исключение отдельных металлургических периодов плавки и т.п.).

Основная цель внепечной обработки или вторичной металлургии – это более быстрое и эффективное осуществление ряда технологических

операций по сравнению с обычными сталеплавильными агрегатами. К числу таких задач относятся:

- 1) выравнивание температуры металла;
- 2) выравнивание химического состава металла;
- 3) легирование и точное доведение химического состава до заданного
- 4) окончательное раскисление;
- 5) удаление неметаллических включений;
- 6) десульфурация металла;
- 7) дегазация (удаление азота и водорода);
- 8) снижение содержания нежелательных примесей цветных металлов;
- 9) регулирование температуры металла;
- 10) глубокое обезуглероживание.

Быстрое распространение внепечной обработки в широких масштабах

определяется следующим:

1) обычная двухшлаковая технология в электропечи может быть заменена одношлаковым процессом без скачивания шлака; при этом сокращается время плавки, снижается расход электроэнергии, трудовые затраты и т.д.

2) упрощается технология конвертерной и мартеновской плавки, а также контроль за ее ходом;

3) получил распространение метод непрерывной разливки стали, который требует точного регулирования температуры и химического состава металла (должны быть стандартными от плавки к плавке), а также стандартно высокого качества;

4) непрерывно растут масштабы производства таких марок стали ответственного назначения, которые вообще трудно получить при обычных технологиях;

5) возросли масштабы производства нержавеющей стали и других сталей и сплавов с особо низким содержанием углерода;

6) возможно получать в мартеновских и конвертерных цехах сталь электропечного сортамента;

7) процессы внепечной обработки позволяют коренным образом изменить структуру и тип потребляемых ферросплавов и раскислителей в сторону существенного снижения требований к их качеству и соответственно их удешевления.

8) Основными технологическими приемами вторичной металлургии являются:

- обработка металла вакуумом;



- продувка металла инертными газами;
- перемешивание металла со специально приготовленными шлаками или лигатурой;
- продувка порошкообразными материалами;
- использование нескольких технологических приемов одновременно.

#### 4.1.8 Способы вакуумирования

В результате обработки металла вакуумом

- уменьшается содержание растворенного в металле кислорода;
- уменьшается содержание растворенных в металле водорода и азота;
- уменьшается содержание неметаллических включений;
- происходит перемешивание, то есть достигается химическая и температурная однородность;
- испаряются примеси цветных металлов (цинк, олово, свинец, сурьма и др.).

Самый простой – в ковше в вакуум-камере или в вакуумном ковше

(ковшовое вакуумирование)(рис. 4.2). Недостаток – невысокая

эффективность при относительно больших массах металла (>50 тонн) и

неравномерность состава металла после ввода раскислителей или

легирующих из-за слабого перемешивания всей массы металла. Положение

улучшается при продувке инертным газом или электромагнитном

перемешивании. При продувке происходят потери тепла с газами.

Вакуумирование при переливе из ковша в ковш (рис. 4.3); так как при этом обработке вакуумом подвергается струя металла, данный метод называется струйным вакуумированием. Для проведения этого процесса металл должен быть достаточно перегрет.

*Порционное вакуумирование* (рис. 4.4). Или способ ДН по названию предприятия, внедрившего его (Dortmund-horder, ФРГ). Металл под действием ферростатического давления засасывается примерно на 1,5 метра в вакуумную камеру, которая периодически поднимается, но так, чтобы конец патрубка все время оставался погруженным в металл в ковше; металл из камеры сливается по патрубку в ковш, затем камера опускается, и в нее вакуум засасывает очередную порцию металла.

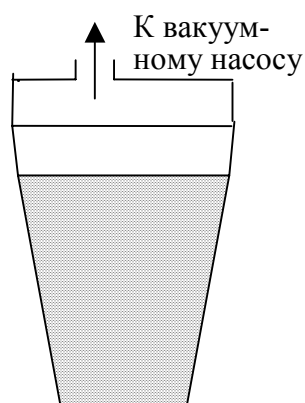


Рис. 4.1 – Ковшовое вакуумирование

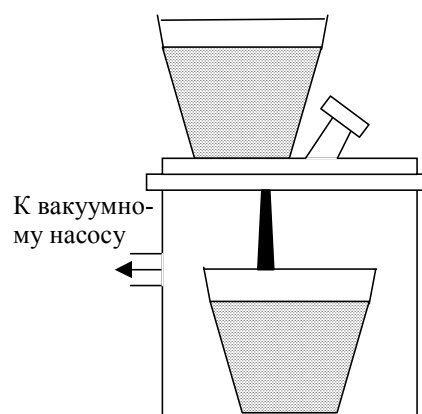


Рис. 4.2 – Струйное вакуумирование

*Циркуляционное вакуумирование*, или способ RH по названию внедрившего его предприятия (Ruhrstahl Heraeus, ФРГ) (рис. 4.5). Вакуумная камера имеет два патрубка, причем оба погружаются в металл. Порция металла засасывается в камеру. По одному из патрубков подают инертный газ, в результате чего металл по нему направляется вверх, в вакуум-камеру, по другому – стекает в ковш, циркулируя таким образом через установку. В России установка циркуляционного вакуумирования успешно работает на Ижевском металлургическом и других заводах.

Практика показала, что удаление водорода идет наиболее интенсивно при давлении в вакууматоре  $\leq 0,5$  мм рт ст. Совершенные пароструйные насосы позволяют достичь разряжения до 0,1-0,3 мм рт ст.

Естественно, что для изготовления камер циркуляционного и порционного вакуумирования требуются высококачественные огнеупоры, особенно для изготовления патрубков. Характерные для вакуумирования повышенные температуры обработки, удлинение времени пребывания металла в ковше и интенсивное перемешивание сделали невозможным использование обычных шамотов.

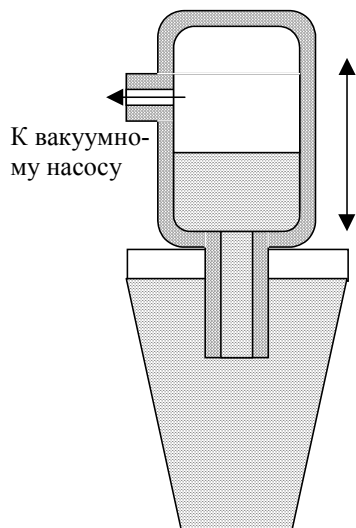


Рис. 4.4. Порционное вакуумирование

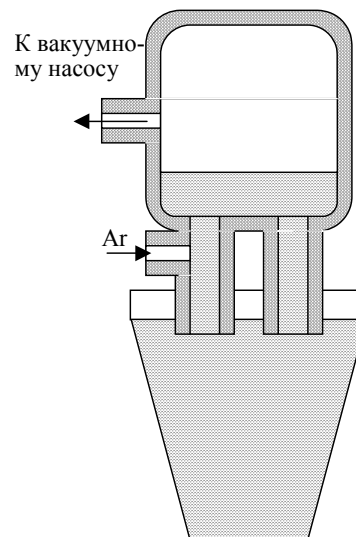


Рис. 4.5. Циркуляционное вакуумирование

Футеровку необходимо выполнять из более стойких материалов – доломита и магнезита. На японских заводах достигли успехов в области совершенствования качества огнеупоров, что позволило повысить стойкость днища, средней и верхней части стен вакуумной камеры RH установки соответственно до 300, 1800 и 3000 плавов.

При подогреве футеровок вакуумных камер ДН и RH до 1500 оС тепловые потери при обработке плавов массой 50 тонн и более невелики, и падение температуры металла в процессе обработки не превышает 1 оС/мин. Потери тепла заметно сокращаются при увеличении емкости установок до 200 – 300 тонн и интенсивности обработки. Например, при обработке металла в 300 т ковше на установке ДН при пяти циклах в минуту по 30 тонн металла, закачиваемого в камеру, интенсивность обработки достигает 150 т/мин.

В Англии крупная RH установка обслуживает конвертер емкостью 300 тонн. Ее пропускная способность 15 тыс. тонн стали в неделю, интенсивность циркуляции металла 100 т/мин.

Способы RH и ДН обеспечивают примерно одинаковую степень удаления из стали водорода. При RH-способе имеется дополнительная возможность воздействия на процессы удаления примесей путем изменения

интенсивности подачи инертного газа. Это имеет большое значение при производстве особонизкоуглеродистого металла. Имеются результаты исследования влияния этого фактора при обработке низкоуглеродистой стали в 275 т ковше. Диаметры патрубков 450 мм. Рабочее давление 0,3 мм рт ст. Интенсивность циркуляции 90 т/мин. Интенсивность растет по мере повышения расхода газа до 1500 л/мин и при дальнейшем повышении не меняется. Обезуглероживание происходит на свободной поверхности металла в камере, на поверхности каплей фонтанирующего металла в камере и на поверхности пузырьков газа во всасывающем патрубке. При повышении расхода газа интенсивность обезуглероживания заметно возрастает, при этом повышается доля углерода, окисляющегося на поверхностях каплей фонтанирующего металла. При расходе газа 5000 л/мин через 13 мин содержание углерода снижалось до 0,001%.

При этом в стали низколегированной содержалось в среднем на 1,82 см<sup>3</sup>/100г водорода меньше, чем при обычной технологии, а содержание азота в среднем на 0,0026% меньше.

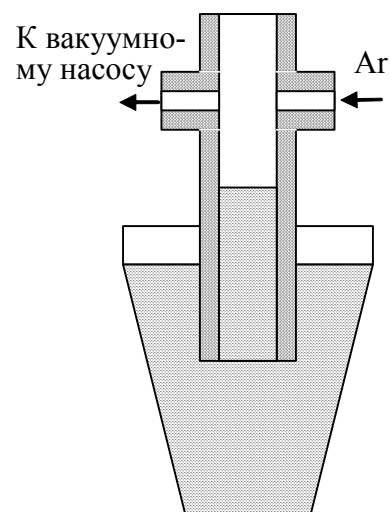


Рис. 4.6. Пульсирующее перемешивание

В ряде зарубежных работ отмечалось, что одно только снижение расходов, связанных с необходимостью подогрева или замедленного охлаждения металла после горячей деформации с целью снижения содержания в нем водорода уже окупает расходы на вакуумную обработку.

При дегазации способы RH и DH равнозначны, но для получения стали с особо низким содержанием углерода метод RH представляет больше возможностей. Разработан технологический процесс, в котором для циркуляции металла используется кислород – RH-OB (Oxygen Blowing).

Для этих же целей разработана технология VOD (Vacuum Oxygen Decarburisation) – продувка кислородом металла, находящегося под вакуумом в ковше. Примером могут служить данные немецкой фирмы. Методом VOD обрабатываются плавки из двух дуговых печей 30-40 тонн и одной 80-90т. В результате сталь содержит 0,002% кислорода, 0,005% серы (при наведении основного шлака), содержание водорода снизилось с 3,8 до 1,8 см<sup>3</sup>/100г, свинца <0,002%, цинка <0,001%.

Методы вакуумной обработки стали непрерывно совершенствуются, отыскивая новые решения более простыми методами. Пример – метод PM (Pulsation Mixing) – пульсирующее перемешивание, разработанный японской фирмой (рис. 4.6). В ковш с металлом опускается примерно на 0,5м цилиндрическая камера длиной 3,0м, внутренним диаметром 0,3м, наружным диаметром 0,6м.

Цикл обработки металла состоит из периода нагнетания инертного газа (около 1 с), и откачки (около 5 с). Газ подается под давлением 10 атм, интенсивность откачки 10 м<sup>3</sup>/мин, рабочее давление в камере 0,5 – 1,5 атм.

Таким образом, вакуумирование в чистом виде постепенно уступает место вакуумированию в комбинации с другими методами внепечной обработки.

#### 4.1.9 Продувка инертными газами

Продувка инертным газом влияет на качество стали в известной мере также, как и обработка вакуумом, так как парциальное давление водорода и азота в такой пузырьке равно нулю.

Технически продувка больших масс металла инертным газом в ковше проще и дешевле, поэтому там, где это возможно, продувка инертным газом заменяет вакуумную обработку. Правда при этом расходуется тепло на нагрев газа. Его расход составляет 1,5 – 3,0 м<sup>3</sup>/т стали, и в зависимости от емкости ковша снижение температуры составляет 2,5 – 4,5 оС/мин. Большая часть тепловых потерь связана с излучением с поверхности металла, поэтому ковш при продувке целесообразно накрывать.

Продувка порошкообразными материалами  
Обработка стали в ковше порошкообразными материалами  
обеспечивает:

- максимальный контакт твердых реагентов с металлом;
- максимальную скорость взаимодействия реагентов;
- высокую скорость взаимодействия вдуваемых реагентов.

Преимущество также в том, что реагент вдувается газом-носителем, который сам оказывает определенное воздействие на металл. Газ может быть окислительным (кислород), восстановительный (природный газ), нейтральный.

При дефосфорации вдувается смесь из извести, железной руды и плавикового шпата, при десульфурации – известь и плавиковый шпат. Сера удаляется до 0,002% (может быть удалена и до 0,0002%). При этом исследования показали, что при содержании серы <0,004% обеспечивается почти полная изотропность стали.

На Российском рынке одним из основных производителей оборудования для внепечной обработки стали является ОАО «Сибэлектротерм». Им разработана серия агрегатов «ковш-печь» (АКП) для обработки стали в ковшах различной емкости. Для компенсации тепловых потерь в процессе обработки стали предусмотрен дуговой нагрев. АКП позволяет осуществлять следующие технологические операции:

- 1 продувка металла аргоном через донную пористую фурму (пробку) ковша;
- 2 подача в металл кусковых шлакообразующих, легирующих материалов и раскислителей с использованием системы весодозирования и ввода этих материалов в ковш-печь;
- 3 продувка через рабочее окно металла порошкообразными реагентами в токе аргона через погруженную футерованную огнеупорную фурму;
- 4 ввод в расплав алюминиевой и порошковых проволок с помощью специального трайб-аппарата;
- 5 автоматизированный замер уровня металла, величины температуры, активности кислорода в металле и отбор проб металла и шлака.

#### **4.1.10 Современные тенденции развития электросталеплавильного производства**

Основным конструкционным материалом остается сталь, объемы производства которой в мире непрерывно растут. При этом выплавка стали в дуговых сталеплавильных печах увеличивается опережающими темпами; в 1995 г. мировое производство стали составило 752 млн т, доля производства стали в ДСП 32,6 %, в 1999 г. соответственно 788 млн т и 33,5 %. В таблице

2.1 приведен объем производства стали в 1999 г. и доля отдельных способов выплавки в странах - основных производителях.

Таблица 4.1

Объем производства стали и доля способов выплавки в странах – основных производителях в 1999 г.

Страна	Общий объем производства, млн т	Динамика производства, % к 1998 г.	Доля способа выплавки и разлива, %			
			Конвертерный	ДСП	Мартеновский	МНЛЗ
Китай	123,3	+8,0	66,3	15,8	1,7 (16,2)*	68,9
США	97,2	-1,4	53,8	46,2	-	68,2
Япония	94,2	+0,7	69,5	30,5	-	97,2
Россия	49,8	+17,5	58,9	12,8	28,3	49,8
ФРГ	42,1	-44,5	70,8	29,2	-	96,3
Респ.Корея	41,0	+2,9	58,4	41,6	-	98,7
Украина	27,-	+12,3	52,4	4,4	43,2	19,5
Бразилия	25,0	-3,0	78,1	21,9	-	88,2
Италия	25,0	-3,1	42,2	57,8	-	96,4
Индия	24,2	+3,5	53,9	32,1	14,0	50,9
Франция	20,2	+0,4	62,4	37,6	-	95,4

Примечание: - другие способы.

Опережающий рост выплавки стали в ДСП в мире связан не только с ростом числа новых ДСП, но и с процессом замены конвертеров на ДСП. Так в 1993-1995 гг. из 6 ДСП, построенных в ФРГ, 5 были введены взамен конвертеров. Точно так же все 4 ДСП, построенные в остальных странах Европейского Союза, заменили конвертеры.

Основные изменения за последние годы объемов производства и средних показателей плавки в ДСП по данным Международного института чугуна и стали отражены в таблице 4.2.

Современные техника и технологии выплавки стали в ДСП должны обеспечивать производителю возможность получения достаточного дохода, при этом ДСП представляет собой "первичный инструмент" для извлечения дохода.

Таблица 4.2

Объемы выплавки стали в ДСП и изменения средних показателей плавки

Показатель	1990 г.	1999 г.	$\Delta$ , %
Выплавка стали, млн т	769	787,7	2,43
Всего			
В ДСП	215	262,8	22,2
Средняя масса стали на выпуске, т	86	110	27,9
Мощность трансформатора, МВ·А	60	80	33,3
Температура металла на выпуске, °С	1660	1635	-1,5
Продолжительность плавки от выпуска до выпуска, мин	105		
Расход электроэнергии, кВт·ч/т жидкой стали	450	390	-13,3
Общий расход кислорода, м <sup>3</sup> /т жидкой стали	24	30	25
Расход электродов, кг/т жидкой стали	2,9	1,9	-34,5
Расход огнеупоров, кг/т	7	3	-57,1

Выбор печи и ее дальнейшая работа зависят от свойств агрегата (внутренние ограничения, например, сложность/надежность, тип, мощность, емкость и т. д.), внешних ограничений (например, мощность питающей сети, доступность источников первичного железа, экологические нормативы и др.) и от квалификации и заинтересованности в интенсивной работе персонала. Использование новых разработок должно гарантированно обеспечивать повышение доходности в результате снижения издержек производства и, желательно, приводить к повышению объема производства.

Представляя основные тенденции развития техники и технологии плавки в ДСП, проведем оценку предлагаемых решений не только с учетом обеспечения работы печи под током, но и надежности оборудования печной установки.

Основные пути развития техники и технологии плавки в ДСП условно можно разделить на две категории:

1 применение ДСП новых конструкций (двухваннные, агрегаты с подогревом лома, ДСП с непрерывной подачей лома, шахтные печи к др.);

2 модернизация ДСП традиционной конструкции путем использования оптимизированных современных технологий и оборудования.

Представляет интерес сравнение работы ДСП новых конструкций с ДСП переменного тока традиционного типа. Такое сравнение проведено с использованием данных, опубликованных производителями оборудования и эксплуатационниками, в основном, в 1999 г. Обычно все данные приведены в расчете на тонну жидкого металла. Однако, как правило, неизвестно, какие данные приводят в публикациях - то ли рекордные, то ли средние, а если средние, то за какой срок: смена/ сутки/ месяц/ год. Следует отметить, что



сравнение часовой производительности печей не является абсолютно корректным, так как при этом не учитывается фактор надёжности и ремонтпригодности оборудования. Объективнее представляются результаты годовой производительности или количество плавов за год. Расход электродов приведен без учета поломок, но для ряда ДСП новых-конструкций вероятность поломок выше, чем для ДСП традиционной конструкции. В качестве лучших показателей желательно сравнивать средние значения хотя бы за сутки работы, а не для единичной плавки.

## 4.2 Расчет и проектирование дуговых печей

### 4.2.1 Футеровка печи

Увеличение мощности печей приводит к значительному износу керамической футеровки, росту частоты и стоимости капитальных ремонтов, что снижает производительность печей и повышает себестоимость выплавленной стали. Эффективная реализация идеи сверхмощных печей возможна лишь при замене керамической футеровки водоохлаждаемыми панелями.

При внедрении водоохлаждаемой футеровки возникает ряд проблем, главной из которых является обеспечение взрывобезопасности печей. Ее решение достигается отсутствием контакта водоохлаждаемых элементов с расплавленным металлом и шлаком при плавке и сливе и созданием эффективной системы охлаждения, способной снять значительные тепловые нагрузки. Поэтому футеровка стен выполняется комбинированной (рис. 4.7). Нижняя ее часть (откосы), объединенная с подиной, выполняется футерованной хромомagneзитовыми или периклазовыми кирпичами [5]. Ее высота на 380-600 мм превышает уровень шлака, а при приближении к рабочему окну и сливному носку - еще выше. Среднюю и верхнюю части стен покрывают панелями с водяным охлаждением. В результате водоохлаждаемыми панелями заменяют до 65-85% площади боковой поверхности стен печей.

Применяемые панели можно разделить на два вида: кессонные и трубчатые. На поверхности панелей привариваются штыри или пластины (ребра), на которых удерживается гарнисаж, образуемый брызгами металла и шлака или создаваемый искусственно с помощью обмазки. Толщина гарнисажа составляет несколько миллиметров и имеет важное значение для снижения тепловых потерь. Ширину и высоту ребер выбирают примерно равными удвоенной равновесной толщине гарнисажной корочки и располагают их с шагом, равным удвоенной высоте.

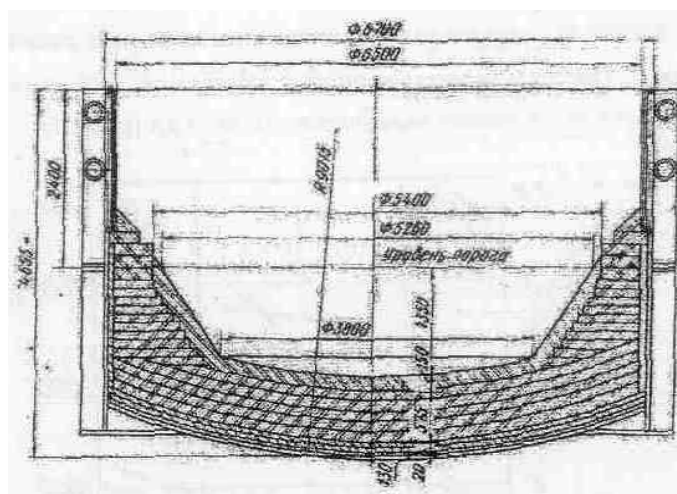


Рис. 4.7. Футеровка сверхмощной дуговой печи

Панели кессонного типа имеют сварную конструкцию из листовой стали толщиной 20-25 мм с внутренними перегородками для направленной циркуляции воды.

Трубчатые панели собираются из близко расположенных толстостенных труб, по которым проходит вода (рис. 4.8). Для изготовления трубчатых панелей используются стальные трубы диаметром 70-90, с толщиной стенки 14-16 мм. Обычно на стенах печи устанавливают 9-16 панелей. При этом объем рабочего пространства увеличивается на 10-30%.

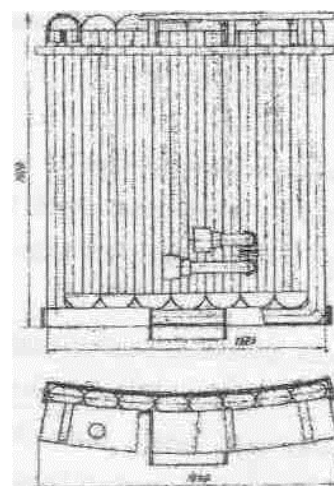


Рис. 4.8. Водоохлаждаемая стенная трубчатая панель

В последние годы для наиболее напряженных нижних участков стен - против дуг и ниже них (на высоте 350-500 мм), применяются медные панели.

Поверхностная плотность тепловых потоков, падающих на панели, достигает 70-120 кВт/м<sup>2</sup>. Это предъявляет жесткие требования как к конструкции панелей, так и к эффективности системы водяного охлаждения. Последняя работает с расходами воды (6-11) м<sup>3</sup>/ч на 1 м<sup>2</sup> площади стенового элемента при скорости ее истечения 2-6 м/с и рабочей температуре на выходе не более 65 °С. Давление воды в панели составляет 0,3-0,4 МПа, с потерей напора в системе охлаждения 0,1-0,15 МПа.

Применение водоохлаждаемых стен привело к необходимости изменения конструкции кожуха печи. В настоящее время чаще всего используется корпус каркасного типа.

Верхнее кольцо жесткости одновременно играет роль водяного коллектора. Оно соединено с нижним кольцом жесткости трубами или коробчатой конструкцией. Возможны различные способы установки водоохлаждаемых панелей (рис. 4.9). Предпочтение отдается наружному расположению панелей, так как в случае утечки воды появляется возможность ее отвода за пределы печи.

Стойкость панелей кессонного или трубчатого исполнения составляет 1500-6000 плавков, а в отдельных случаях может быть доведена до 8000-9000. Применение трубчатых панелей предпочтительнее, так как в них легче организовать высокую скорость прохождения воды, и они более приспособлены для использования повышенных давлений в системе охлаждения. А это в свою очередь позволяет получить на выходе более высокую температуру воды (до 120-240 °С), что увеличивает возможность ее полезного использования в качестве вторичного энергоресурса. При этом, однако, необходимо производить химическую очистку воды.

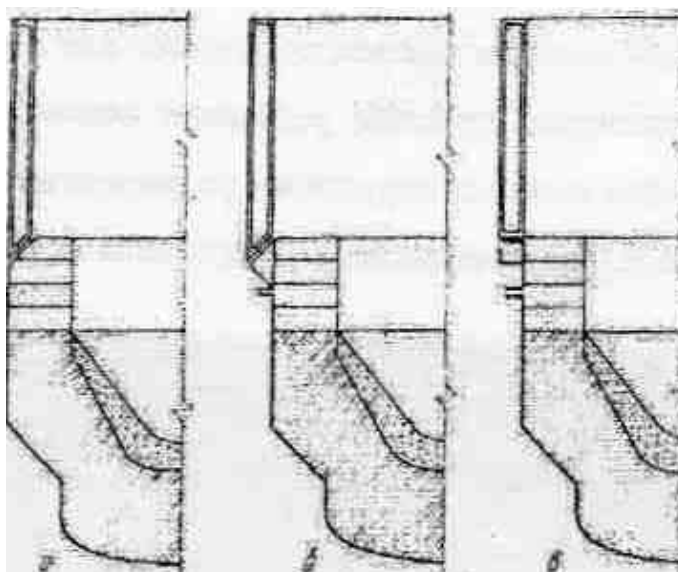


Рис. 4.9. Способы установки водоохлаждаемых панелей стен:

а - над футеровкой откосов; б, в - наружное расположение панелей

На дуговых печах с водоохлаждаемыми стенами и сводом появляется возможность увеличения средней мощности и работы на более длинных дугах при пониженных значениях тока. При этом время плавки сокращается примерно на 10%, а следовательно, сокращаются и потери тепла. Кроме того, увеличивается электрический КПД, и снижаются электрические потери во вторичном токоподводе. Однако значительно (в несколько раз) возрастают потери тепла через стены печи особенно на печах малой емкости. В то же время средняя температура поверхности панелей существенно ниже температуры керамической футеровки. Это вызывает снижение температуры отходящих газов и потерь тепла с газами, что в значительной степени компенсирует увеличение тепловых потерь через водоохлаждаемую футеровку и снижает требования к системам газоотсоса и их стоимость. В связи с этим на крупных печах повышения удельного расхода электроэнергии не наблюдается. Высокая стойкость водоохлаждаемых стен дополнительно способствует повышению годовой производительности печей и снижает себестоимость полученной стали.

Указанные факторы определяют высокую экономическую эффективность использования на высокомошных печах водоохлаждаемых стеновых панелей.

На современных печах управление охлаждением панелей осуществляется микропроцессорными системами, являющимися частью АСУ ТП. Для получения необходимой информации каждая панель снабжена датчиком расхода и температуры воды на выходе. О температуре воды на входе в панель судят по температуре воды коллектора.

### 4.2.3 Водоохлаждаемый свод

Внедрение сверхмощных печей поставило задачи повышения стойкости сводов. Эта проблема решается введением в конструкцию свода водоохлаждаемых элементов.

На начальном этапе применялись полностью водоохлаждаемые металлические своды плоской конфигурации. Однако при эксплуатации печей выявились их серьезные недостатки. Дуговые разряды и наводки тока приводили к нарушению целостности свода и появлению течи воды, особенно в его центральной части.

Современные сверхмощные печи работают с комбинированными куполообразными сводами разнообразных конструкций. Комбинированный свод (рис. 4.10) состоит из трех основных элементов: водоохлаждаемого каркаса, представляющего собой два concentrically расположенных кольца, соединенных радиальными пилонами; съемных водоохлаждаемых панелей с индивидуальной подачей воды, подвешенных к каркасу; центральной керамической части свода, набираемой в собственном опорном кольце.

Число сводовых панелей колеблется от 9 до 16. Они могут быть как кессонными так и трубчатыми. Сверху на них кладутся съемные плиты, которые служат рабочей площадкой во время обслуживания свода. Нижняя часть панелей снабжается шипами для удержания огнеупорной набивки, которая в процессе эксплуатации печи обычно дополнительно покрывается шлаковым гарнисажем. На таких сводах площадь водоохлаждения составляет 75-80 %.

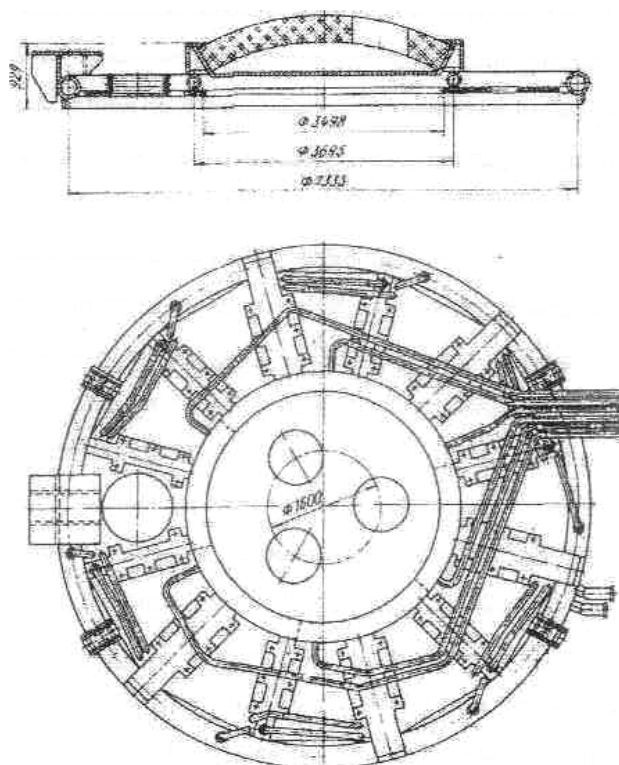


Рис. 4.10. Комбинированный водоохлаждаемый свод

#### 4.2.4 Схема выпуска металла

Первые сверхмощные электропечи с кирпичной футеровкой стен имели традиционную схему выпуска: через сливной носок при наклоне печи на 45 градусов (рис. 4.11, а), хотя изменившаяся в соответствии с концепцией сверхмощной печи технология плавки не требовала и не предусматривала обработки металла шлаком во время выпуска, а затем с развитием внепечной обработки стали потребовала обязательной отсечки шлака от металла. Традиционная схема выпуска ограничивает размер площади водяного охлаждения стен и требует большего расхода высококачественного огнеупорного кирпича, так как в целях безопасности над выпускным отверстием водоохлаждаемые панели приходится располагать значительно выше, чем в остальной части печи. Печи с так называемым сифонным выпуском (рис. 4.11, б) явились своего рода приложением классической схемы выпуска к сверхмощной печи и новой технологии плавки. Сифонный выпуск позволяет полностью решить проблему выпуска металла из печи без шлака, оставления шлака в печи и работы сверхмощной печи на "болоте", однако не дает существенного выигрыша в смысле упрощения конструкции печной установки и увеличения площади водоохлаждаемых панелей (такие печи установлены на ОЭМК и БМЗ).

Для увеличения площади поверхности футеровки, занимаемой водоохлаждаемыми панелями, разработана конструкция дуговой сталеплавильной печи с донным выпуском металла (рис. 4.11, в). Такая конструкция позволяет увеличить площадь водяного охлаждения стен от 70 до 85%. Наклон печи с донным выпуском осуществляют лишь в случае необходимости скачивания шлака на угол до 12°. Это позволяет заметно упростить конструкцию механического оборудования печи, уменьшить длину короткой сети печи. Отверстие в днище печи оформлено при помощи магнезитовой трубы. После полного опорожнения печи перед загрузкой шихты выпускное отверстие закрывается запирающим пневматическим клапаном, расположенным под днищем печи, и заполняется специальным огнеупорным порошком. Перед выпуском плавки клапан открывается, и расплавленная сталь прорывается через спекшийся порошок в верхней части выпускного отверстия. Стойкость магнезитовой трубы примерно 100 плавков. Кроме снижения расхода стеновых огнеупоров, достоинствами такой печи являются быстрый выпуск плавки, уменьшение тепловых потерь печи в это время, уменьшение насыщения металла газами (азотом) во время выпуска, некоторое уменьшение электрических потерь в короткой сети, снижение износа футеровки разливочного ковша. Недостатками такой печи являются невозможность отсечки шлака и оставления его в печи, а также использования очень выгодного режима работы с оставлением части металла в печи на следующую плавку, сложность обслуживания выпускного отверстия печи.

В связи с отмеченными недостатками печи с донным выпуском не получили большого распространения, хотя и применяются на зарубежных заводах.

С целью устранения отмеченных недостатков в дальнейшем выпускное отверстие постепенно было перенесено из центра подины в специальный выступ (эркер), расположенный в области заднего откоса печи. Уровень выпускного отверстия несколько выше уровня подины печи (см. рис. 4.11, г). Такую печь в зарубежной литературе называют печью с эксцентричным или эркерным выпуском.

Как показала практика использования печей с эркерным выпуском, вынесение выпускного отверстия за кожух печи (в эркер) облегчает его обслуживание. Наклон печи при выпуске уменьшается до  $10\text{--}12^\circ$ , что позволяет снизить уровень водоохлаждаемых панелей по задней стенке от обычных  $400\text{--}500$  до  $250\text{--}350$  мм с увеличением площади этих панелей по задней стенке от 59 до 84 %, а в целом по печи до  $84\text{--}89$  %. Выпуск стали через донное отверстие в эркере и наличие отдельного шлаковывпускного отверстия позволяют выпускать сталь практически без шлака, а при необходимости оставлять часть металла в печи. Вследствие того, что при выпуске струя металла компактная (не расширяется) и короткая, понижение его температуры составляет лишь  $20\text{--}35$  оС, что приводит к экономии энергии  $15\text{--}30$  кВт·ч/т при ее расходе  $510\text{--}530$  кВт·ч/т.

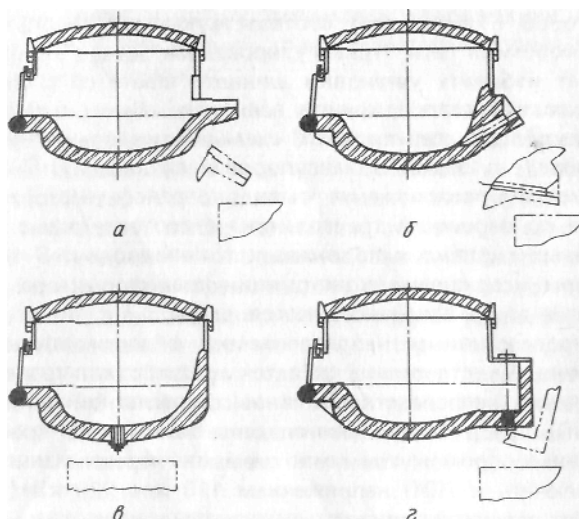


Рис. 4.11. Схема выпуска металла

*а* - традиционная; *б* - сифонный выпуск; *в* - донный выпуск; *г* - эркерный

Эркерный выпуск осуществляется следующим образом. Ковш с необходимыми присадками на дне помещают перед выпуском под печь. Затем открывают запорное устройство (рис. 4.12) и выпускают плавку. Во время выпуска (длительностью 2 мин для крупной печи) печь слегка наклоняют в сторону ковша, чтобы обеспечить постоянный уровень металла над выпускным отверстием. Наклон печи автоматически блокируется при достижении требуемого максимального угла наклона  $10^\circ$ . Когда в ковше оказывается необходимое количество металла, печь возвращается в исходное положение, выпускное отверстие при этом остается открытым. Сверху с рабочей площадки печи отверстие

промывают струей кислорода. Оставшийся в отверстии застывший металл удаляют снизу. Для этого под печью смонтирована убирающаяся рабочая площадка, позволяющая осматривать и обслуживать выпускное отверстие. Управление запирающим устройством осуществляется с пульта, расположенного внизу под печью. С этого же пульта управляют наклоном печи, присадкой добавок в ковш и движением сталеваза. После обслуживания отверстия затвор закрывают и сверху в отверстие засыпают огнеупорную смесь. Операция обслуживания выпускного отверстия продолжается не более 3 мин.

Срок службы внутренней кладки отверстия составляет 200 плавов. Срок службы графитовых колец, установленных непосредственно на выпуске в нижней части отверстия, 20-30 плавов. Срок службы колец увеличивается, если они изготовлены из смеси магнезита с графитом. Замена футеровки отверстия проводится в течение 2 ч, замена колец на выходе - в течение 20 - 30 мин. Полное опорожнение печи с эркерным выпуском для осмотра и заправки подины осуществляется один раз в неделю.

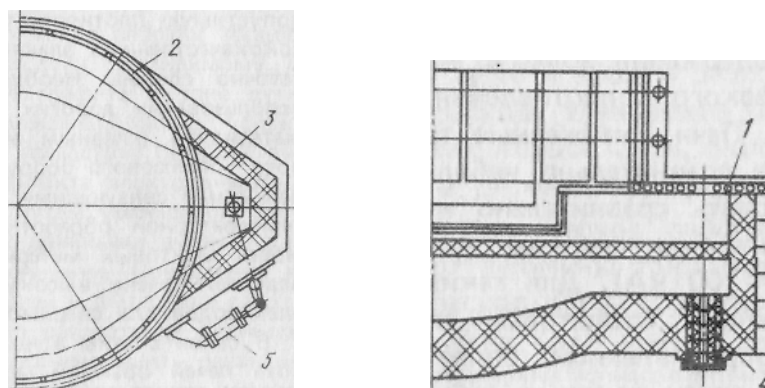


Рис. 4.12 – Эркер дуговой печи:

1 - сводик эркера; 2 - стеновые панели; 3 - футеровка эркера; 4 - выпускное отверстие эркера; 5 - привод запорного устройства

Учитывая, что в большинстве случаев печь с эркерным выпуском выгоднее других конструкций, такая печь перспективна для новых отечественных электросталеплавильных цехов. Перевод одной из двух печей БМЗ с сифонного на эркерный выпуск стали улучшил показатели работы.



## 4.2.5 Конструктивные решения элементов токоподвода

### 4.2.5.1 Кабельные гирлянды

Вторичный токоподвод сверхмощной дуговой печи выполняется из обычного набора элементов - шины или трубошины, подсоединяемые к выводам низкого напряжения трансформатора, гибкие кабели и трубошины, располагаемые на рукаве электрододержателя. Наибольшая доля индуктивного сопротивления приходится на гибкие кабели. При токах, достигающих десятки килоампер, растет как сечение, так и число параллельно работающих кабелей.

Выбор рационального сечения и количества кабелей в гирлянде определяется рядом обстоятельств. Уменьшение числа параллельных проводников в кабельной гирлянде одной фазы положительно влияет на распределение тока между ними. Поэтому на современных сверхмощных печах гирлянды обычно выполняются из небольшого количества массивных водоохлаждаемых кабелей (не более 4 штук на линейный ток печи) при соответствующем увеличении их сечения. Однако увеличение сечения кабеля связано с изменением его механических характеристик (масса, жесткость), что вызывает существенное усиление электромеханических колебаний кабельных гирлянд под действием электродинамических сил. А это, в свою очередь, сказывается на вибрации рукавов электрододержателей и электродов, на флуктуации токов и в результате - на колебании напряжения в энергосистеме.

Применяемые на печах малой и средней мощности для крепления кабелей в гирлянде фланцы позволяют добиться стабильности геометрии расположения кабелей в гирлянде одной фазы, но увеличение жесткости гирлянды приводит к увеличению интенсивности раскачивания гирлянд других фаз под действием электродинамических сил. Поэтому конструкция кабеля для сверхмощных печей претерпела изменения (рис. 4.12).

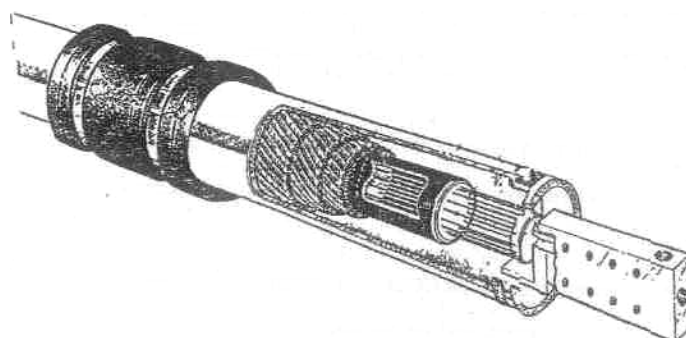


Рис. 4.12 Кабель фирмы ERIGO

Уменьшения длины и индуктивного сопротивления кабельной гирлянды достигают сдвигом трансформатора в сторону сливного носка на 1-1,5 м. и, что особенно эффективно, применением донного выпуска металла.

Для уменьшения жесткости кабеля центральную пружину из нержавеющей стали (в кабелях марки КВС) заменили гибким резиновым сердечником. Кроме того, зарубежными фирмами предлагаются различные варианты для повышения износостойкости рукавов. Фирма ERIGO (Франция) предлагает нанесение на рукава специального защитного покрытия. На печах фирмы DEMAG используются кабели с бамперами. Бамперы изготавливаются из резины и надеваются на кабель через одинаковые расстояния, не превышающие их ширину.

#### 4.2.5.2 Электроды

Современные дуговые сталеплавильные печи работают преимущественно на графитированных электродах, ежегодное мировое производство которых превышает 1 млн. т. Расход графита электрода в процессе электроплавки стали определяется качеством электрода и условиями работы дуговой печи. Снижению расхода электродов способствуют уменьшение пористости, повышение плотности, уменьшение содержания золы в электродной массе, снижение удельного электрического сопротивления и увеличение предела прочности электродов.

Печи, снабженные трансформаторами обычной мощности, работают на сравнительно небольших токах, до 45 кА, что позволяет использовать сравнительно недорогие электроды обычного качества. Дуговые печи сверхвысокой мощности работают на очень больших токах, до 100 кА. Для таких печей используют специальные высококачественные графитированные электроды, обладающие низким электрическим сопротивлением, более плотные и прочные, способные выдерживать высокие токовые нагрузки и значительные механические усилия, возникающие при работе трансформатора сверхмощной печи, и менее подверженные поломкам. Специальные электроды должны обеспечить допустимую плотность тока 25 А/см<sup>2</sup>. Технология производства высококачественных электродов для сверхмощных дуговых печей достаточно сложна. Необходимые свойства электродов получают при использовании дорогих высококачественных малозольных шихтовых материалов (главным образом, игольчатого нефтяного кокса), мощного прессового оборудования, пропитки заготовок электродов пековыми связующими, специальной длительной и сложной высокотемпературной обработки (операции графитизации). Высокая стоимость шихтовых материалов и большой расход электроэнергии определяют очень высокую стоимость специальных графитированных электродов для сверхмощных печей (1500-2000 долл. США за 1 т).'

В связи с этим в настоящее время затраты на электроды при работе печей обычной мощности для выплавки углеродистых сталей составляют 8% себестоимости стали, при работе сверхмощных печей такие затраты могут превышать 15% себестоимости стали. Для улучшения технико-экономических показателей производства металла большое значение имеют мероприятия по снижению расхода электродов на плавку. Расход электродов зависит не только от их качества, но и от конструкции печи, технологических и режимных факторов плавки, температуры и характера атмосферы печи, качества применяемого лома, марки стали, применения топливно-кислородных горелок и т.д.

Суммарный расход электродов на плавку в электросталеплавильном производстве обычно определяют по трем статьям: 1) расход рабочих концов электрода или эрозия торцов электродов (испарение графита в зоне горения дуги и растворение графита в шлаке); 2) расход боковой электродной поверхности (окисление графита с боковой поверхности электродов); 3) промежуточный расход электродов (потери в виде неиспользуемых огарков и вследствие поломок электродов). В хорошо работающей сверхмощной сталеплавильной печи общий расход электродов составил 1,9 кг/т стали [7], при этом расход рабочих концов составляет около 50 %, окисление с боковой поверхности 40% и промежуточный расход 10% общего расхода. При работе печей малой мощности статьи расхода электродов по значениям несколько различаются: расход рабочих концов 30%, окисление с боковой поверхности до 60 % общего расхода электродов.

Расход электродов в результате окисления с поверхности зависит от общей площади их поверхности, подверженной воздействию печных газов, химического состава и скорости перемещения газов относительно электродов, температуры поверхности электродов, общей длительности плавки, степени герметизации печи. В общем случае расход электродов в результате окисления с поверхности может быть снижен при повышении качества электродов, рациональной организации и технологии плавки, уменьшении высоты печи и вследствие этого длины электродов, уменьшении по возможности диаметра электрода.

В конструкции некоторых дуговых сталеплавильных печей предусмотрена возможность обдува боковой поверхности электрода потоком защитной среды. При этом практически по всей длине электродной свечи создается присоединенный газовый слой, препятствующий доступу кислорода печной атмосферы к поверхности электрода. Этот способ позволяет снизить общий расход электродов в среднем на 36% .

### 4.2.5.3 Подвижная часть вторичного токопровода

Электрододержатель является одним из важных элементов дуговых печей, к которому предъявляются следующие требования:

1 подведение с минимальными потерями к электроду тока, сила которого на большегрузных печах составляет десятки килоампер;

2 сопротивление тепловым нагрузкам, обусловленным действием тока и теплопередачей от расплава, выделяемых из печи газов и графитированных электродов;

Так как электрододержатели обычной конструкции с медными токоведущими трубошинами, изолированными от несущих рукавов (рис. 4.13) не в полной мере отвечают этим требованиям, в последние годы все большее применение в зарубежных и отечественных печах получают электрододержатели с токопроводящими рукавами (рис. 4.14). Особенностью этой конструкции является совмещение электрических, механических и теплообменных функций в одном узле - водоохлаждаемом рукаве с развитой токоведущей наружной поверхностью.

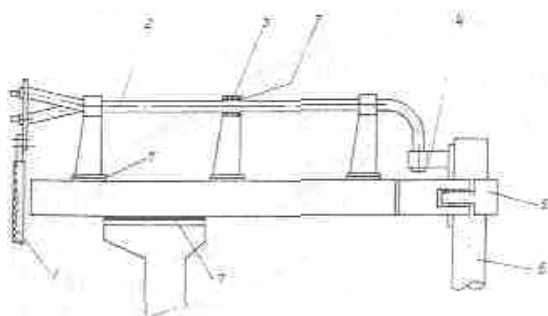


Рис. 4.13 Электрододержатель обычного типа:

1 - гибкий кабель, 2 - трубошина, 3 - кронштейн, 4 - головка электрододержателя, 5 - хомут, 6 - электрод, 7 - электрическая изоляция

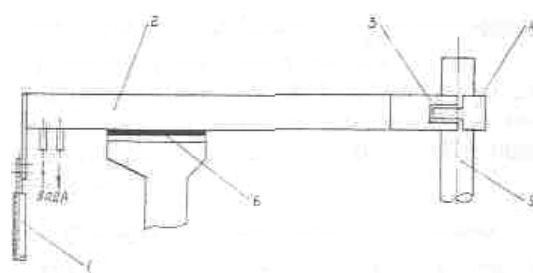


Рис. 4.14 Электрододержатель с токопроводящим рукавом:

1 - гибкий кабель, 2 - токопроводящий рукав; 3 - головка электрододержателя. 4 - хомут; 5 - электрод; 6 - электрическая изоляция

Идея применения в дуговых печах электрододержателей с токопроводящими рукавами принадлежит сотрудникам ВНИИЭТО, получившим авторское свидетельство в 1976 г. Однако первая практическая реализация этой идеи была осуществлена только в середине восьмидесятых годов за рубежом.

### 4.2.5.3 Анализ и сравнение основных характеристик электрододержателей

Преимущества электрододержателей с токопроводящими рукавами по сравнению с электрододержателями обычной конструкции показывает анализ

их электрических, тепловых и механических характеристик в реальных условиях работы печи.

Активное фазное сопротивление токоведущих элементов на участке "рукав" для обоих электрододержателей, пренебрегая эффектом близости, может быть рассчитано по формуле [8]

$$r_p = \rho \cdot \frac{l}{n(\Pi - k_1 \delta) \delta}, \quad (4.1)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление токоведущих элементов электрододержателя на участке "рукав";  $l$  - длина токоведущих элементов (трубошин или токопроводящего рукава);  $n$  - число параллельных элементов в фазе;  $\Pi$  - наружный периметр токоведущего элемента;  $k_{1t}$  - коэффициент, равный для проводников круглого сечения 3,14 и для проводников прямоугольного сечения 4;  $\delta$  - глубина проникновения электромагнитной волны в проводник

Индуктивное фазное сопротивление токоведущих элементов для  $n > 1$  и  $n = 1$  на участке "рукав" определяют по формулам

для  $n > 1$

$$x_p = \frac{628 \cdot 10^{-7} \cdot l}{n} \left[ \ln \left( \frac{4l^2}{k_2 \Pi d_1} \right) - 0,5 \ln \left( \frac{4l^2}{d_2 d_3} \right) - l \right] \quad (4.2)$$

для  $n = 1$ -

$$x_p = 628 \cdot 10^{-7} \cdot l \left[ \ln \left( \frac{2l}{k_2 \Pi} \right) - 0,5 \ln \left( \frac{4l^2}{d_2 d_3} \right) \right] \quad (4.2')$$

где  $k_2$  — коэффициент, равный 0,16 для проводников круглого сечения и 0,11 для проводников прямоугольного сечения;  $d_1$  - среднее расстояние между осями параллельных проводников в одной фазе;  $d_2$  и  $d_3$  - средние расстояния между проводниками данной фазы и проводниками двух других фаз.

Из формул (4.1), (4.2) и (4.2') следует, что активное и индуктивное сопротивления токоведущих элементов электрододержателя на участке "рукав" при прочих равных условиях уменьшаются с увеличением суммы наружных периметров их токоведущих сечений. Поэтому для токопроводящих рукавов с развитым периметром, существенно превышающим периметр трубошин обычного электрододержателя, их значения будут соответственно ниже. В результате значения активного и индуктивного электрического сопротивления короткой сети дуговой печи с токопроводящим электрододержателем будут меньше, чем печи с обычным электрододержателем, что обеспечивает для заданного значения ступени

напряжения  $U_{\text{тр}}$  трансформатора увеличение мощности дуги каждой фазы на величину  $\Delta P_{\text{дф}}$ ,

$$\Delta P_{\text{дф}} = I^2 \left[ \sqrt{\left(\frac{U_{\text{тр}}}{I}\right)^2 - (x_{\text{кc1}} - x_{\text{p1}} - x_{\text{p2}})^2} - \sqrt{\left(\frac{U_{\text{тр}}}{I}\right)^2 - (x_{\text{кc1}})^2 + r_{\text{p1}} + r_{\text{p2}}} \right]$$

где индекс 1 относится к печи с обычным электрододержателем, а индекс 2 - к печи с токопроводящим электрододержателем, при этом электрододержателю с большим периметром токоведущих элементов будет соответствовать меньшая токовая нагрузка, определяемая плотностью тока  $j$ :

$$j = \frac{1}{(\Pi - k_1 \delta) \delta}$$

Исследования и расчеты, выполненные в НПО "ЭЛОТЕРМ"[8], показывают, что тепловые нагрузки рукавов электрододержателей обоих типов, определяемые внешними факторами (теплопередачей конвекцией от потоков газа, выходящего через зазоры между электродом и электродными отверстиями в своде, излучением с поверхности электрода, теплопроводностью от головки электрододержателя), сосредоточены в их головной части и примерно одинаковы. В то же время тепловыделения в токоведущих элементах, обусловленные прохождением через них электрического тока и равные активным потерям, будут выше для трубок обычного электрододержателя, имеющих меньший периметр сечения:

Следует также учитывать нагрев несущих рукавов обычных электрододержателей в результате действия вихревых токов.

Механические нагрузки электрододержателей обоих типов — это статические и динамические нагрузки. Статические нагрузки, определяемые гравитационными силами, пропорциональными массе электродов и рукавов, включая массу закрепленных на них токоведущих элементов, а также динамические нагрузки, возникающие при наклоне печи, перемещении электродов, упоре электродов в твердую шихту и т. п., в первом приближении для обоих электрододержателей при использовании в них медных токонесущих элементов могут быть приняты одинаковыми.

Однако электродинамические усилия, возникающие в токоведущих элементах электрододержателей на участке "рукав", даже при равенстве их

абсолютных значений оказывают различное воздействие на механическую прочность несущих элементов. Это объясняется следующим:

- трубошины обычного рукава, характеризующиеся меньшими значениями периметра, площади поперечного сечения и момента инерции, имеют меньшую жесткость и сопротивление деформации;
- несущие рукава обычных электрододержателей подвергаются дополнительному воздействию момента сил, являющегося результатом консольного расположения трубошин на рукаве (рис. 3) и равному
- 

$$M = f_{\text{эд}} l h$$

где  $f_{\text{эд}}$  - электродинамическое усилие, приходящееся на 1 м длины трубошины;  $l$  - длина трубошины;  $h$  - расстояние между трубошиной и рукавом.

Максимальное (удельное) электродинамическое усилие, приходящееся на 1 м длины токоведущих элементов трубошин или токопроводящего рукава для средней фазы, равно

$$f_{\text{эд(макс)}} = 1,73 \cdot 10^{-7} \frac{I_y^2}{a} k_{\text{ф}}$$

где  $a$  - среднее расстояние между проводниками соседних фаз;  $I_y$  - ударный ток трехфазного короткого замыкания;  $k_{\text{ф}}$  - коэффициент формы проводника, равный 1-1.5.

Действие этих усилий вызывает вибрацию трубошин и разрушение электрической изоляции, расположенной между ними и несущим рукавом.

#### 4.2.5.4 Материалы токопроводящих рукавов

Из анализа физических свойств и стоимости различных материалов и сплавов, удовлетворяющих условиям эксплуатации токопроводящих рукавов (высокой электропроводности и теплопроводности, достаточной механической прочности и относительно невысокой стоимости), следует, что к наиболее приемлемым материалам для изготовления токопроводящих рукавов относятся медь и алюминий, а также сплавы на их основе.

В табл. 4.3 приведены сопоставимые свойства меди и алюминия.

Сравнение свойств и цены меди и алюминия показывает, что несмотря на более высокое удельное сопротивление алюминий является материалом, перспективным для изготовления токопроводящих рукавов в связи с существенно меньшей плотностью и большей глубиной проникновения электрического поля.

Таблица 4.3

Физические свойства ( $t=20^{\circ}\text{C}$ ) и стоимость меди и алюминия

Металл	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, кДж/(кг·°C)	Теплопроводность, Вт/(м·°C)	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 <sup>-8</sup>	Предел прочности, Н/м <sup>2</sup> ·10 <sup>7</sup>	Стоимость, ус. ед./т
Медь	8700-8900	0,39	390	1,6-1,8	20-50	4300-4500
Алюминий	2700-2750	0,95	200	2,50-2,75	8-13	2900-3000

Таблица 4.4. Стойкость проводниковых материалов (балл\*) в атмосфере, содержащей химические примеси

Химические примеси в атмосфере	Алюминий	Медь
Окислы азота	4,5	6
Окись углерода	1	6
Серный ангидрид	1	1
Сероводород	1	6
Фтористый водород	6	6
Балл 1 - совершенно стойкий, балл 10 - нестойкий		

Механические свойства алюминия могут быть значительно улучшены путем его легирования различными упрочняющими элементами или усиления посредством стальной арматуры. При этом большое значение в условиях интенсивного теплового излучения в печах имеет собственное алюминию низкое значение степени черноты.

Одним из важных показателей материалов в условиях металлургического производства, характеризуемого значительным уровнем газовыделения, является стойкость в атмосфере, содержащей химические примеси. При оценке по десятибалльной шкале (табл. 4.4) коррозионная стойкость алюминия во многих средах выше стойкости меди.

#### 4.2.5.5 Конструкции и эксплуатационные характеристики токопроводящих рукавов

Наиболее распространенная конструкция токопроводящего рукава, применяемая с середины 80-х годов западными печестроительными фирмами (Fuchs Systemtechnik, Krupp, Danieli, Voest-Alpine и др.), представляет собой трубу прямоугольного сечения, полученную сваркой биметаллических (медь—сталь) листов. Толщина наружного токопроводящего слоя составляет обычно 8—10 мм. Внутри биметаллическая труба имеет многоканальное или полостное водяное охлаждение, обеспечивающее требуемый теплосъем и нормальные температурные условия работы токоведущей части рукава и расположенного внутри него пружинно-гидравлического механизма зажима электрода, а также электрической изоляции, находящейся между нижней "гранью" рукава и его опорной стойкой. К контуру водяного охлаждения рукава подключены элементы головки электрододержателя (контактная



плита и хомут) и плита стойки, на которой размещена электроизоляционная прокладка

Биметаллический лист для токопроводящего рукава может быть изготовлен различными методами: сваркой взрывом, наплавкой, прокаткой в вакууме, электрошлаковым методом (метод разработан в АО "ВНИИЭТО")

Опыт эксплуатации электрододержателей с токопроводящими биметаллическими рукавами подтверждает их преимущества перед обычными электрододержателями. Они имеют меньшее активное и индуктивное сопротивления, обеспечивая лучшие электрические показатели печи и увеличение полезной мощности дуг, и большую механическую жесткость, что позволяет значительно уменьшить диаметр распада электродов и увеличить стойкость стен (футеровки) печи (или ковша). Одновременно устраняется нагрев стальных элементов рукава под воздействием электромагнитных полей в результате экранирования их наружным токопроводящим слоем, повышается срок службы механизма зажима электрода и электрической изоляции, снижаются затраты на ремонт и обслуживание электрододержателя.

Фирма Badische Stahl Werke (Германия) с 1988 эксплуатирует на дуговых сталеплавильных печах емкостью 80 и 85 т. электрододержатели со сварными алюминиевыми рукавами конструкции фирмы BSE и Klark и отмечает их следующие преимущества: уменьшение массы на 50%, увеличение скорости перемещения электродов, повышение полезной мощности на 8,5% и увеличение среднего коэффициента мощности с 0,81 до 0,84, снижение себестоимости стали.

Таким образом, анализ характеристик и опыт эксплуатации электрододержателей обычной конструкции и с токопроводящими рукавами свидетельствует о значительных преимуществах последних.

Эффективность применения электрододержателей с токопроводящими рукавами возрастает с увеличением емкости печи, так как сокращение активных потерь и увеличение мощности дуг пропорциональны квадрату силы тока. Это показывает целесообразность их применения также в дуговых печах постоянного тока, сила рабочего тока которых в 2 раза превышает силу тока трехфазных печей идентичной емкости.

#### **4.2.6 Энергетический баланс дуговой сталеплавильной печи**

В дуговых сталеплавильных печах сочетаются особенности электро- и теплотехнических установок. Поэтому анализ вопросов оптимизации энерготехнологических процессов и режимов печей невозможен без подробного рассмотрения их энергетических балансов.

Балансовые уравнения составляют для всего цикла плавки или для ее отдельных периодов. В этом случае в них фигурируют количества электрической или тепловой энергии, израсходованной за рассматриваемые

интервалы времени. В так называемых мгновенных балансах, относящихся к определенному моменту плавки, используют мощности соответствующих энергетических потоков. В связи с тем, что энерготехнологические процессы в дуговых печах переменного и постоянного тока близки, общий вид энергетических балансов для ДСП и ДСППТ одинаков.

В простейшем случае при работе дуговой печи с топливно-кислородными горелками (ТКГ), но без утилизации тепла отходящих газов и охлаждающей воды уравнение энергетического баланса всей печи для полного цикла плавки  $t_{ц}$  или ее отдельных периодов  $\tau$ , имеет вид [9]

$$W_{э} + W_{ш} + W_{х} + W_{г} = W_{м} + W_{эл} + W_{тп} \pm W_{ак} \quad (4.3)$$

где  $W_{эл}$  - электроэнергия, потребляемая электропечной установкой из энергосистемы;  $W_{ш}$  - энтальпия шихты и газов, поступающих в рабочее пространство ДСП;  $W_{х}$  - химическая энергия экзо- и эндотермических реакций окисления, восстановления и шлакообразования;  $W_{г}$  - количество тепловой энергии, вводимой в рабочее пространство ДСП с помощью ТКГ';  $W_{м}$  - энтальпия сливаемого жидкого металла и шлака (полезный расход энергии);  $W_{эл}$  - электрические потери в источнике питания и вторичном токоподводе (до рабочего пространства печи);  $W_{тп}$  - тепловые потери из рабочего пространства печи;  $W_{ак}$  - изменение энтальпии футеровки (плюс - при нагреве, минус - при остывании).

Рассмотрим отдельные статьи энергетического баланса (4.3) более подробно. В левой, приходной, части баланса наибольшей является величина  $W_{э}$ , которая в зависимости от особенностей технологического процесса может изменяться в широких пределах. В переплавных процессах она может приближаться к 100%. В процессах с использованием предварительно подогретой шихты, ТКГ и больших количеств кислорода это значение может снижаться до 60% общего прихода энергии за цикл.

Величина  $W_{ш}$  практически целиком определяется энтальпией загружаемых в печь шихтовых материалов. При получившем довольно широкое распространение предварительном подогреве шихты в загрузочных корзинах до средне-массовой температуры 450-550 °С значение  $W_{ш}$  составляет 10-12%. На дуговых печах, работающих без предварительного подогрева шихты, величиной  $W_{ш}$  можно пренебречь.

Для определения  $W_{х}$  необходимо предварительно составить материальный баланс, с помощью которого устанавливают состав и количество исходных материалов и продуктов плавки. Энергия экзотермических реакций окисления компонентов шихты - углерода, кремния, марганца, железа и других, а также окисления графитированных электродов

выделяется в различных зонах рабочего пространства ДСП: на поверхности кусков шихты, в жидкой ванне и в газовой фазе, что предопределяет и различную степень полезного использования выделяющегося тепла. В современных печах, работающих с применением кислорода и ТКГ, тепловыделение  $W_x$  может достигать 30-35 %, а в отдельные периоды плавки и более высоких значений. Поэтому эффективное использование  $W_x$  во многом определяет энергетическую эффективность печей, особенно крупных, для которых характерно возрастание доли  $W_x$  в общем приходе тепла. Определение  $W_x$  вызывает известные трудности. В балансовых расчетах электроплавки при вычислениях  $W_x$  получило распространение использование стандартных значений удельных энтальпий химических реакций при 298 К  $\Delta H^\circ_{298}$ .

Приход тепла  $W_r$  зависит от мощности и длительности работы ТКГ и может достигать значений, сопоставимых с  $W_3$ .

Изменение энтальпии футеровки (аккумулированного тепла)  $\pm W_{ак}$  может входить как в приходную, так и в расходную правую часть энергетического баланса (4.1). При рассмотрении баланса всего цикла плавки или достаточно длительных ее периодов величиной  $W_{ак}$  можно пренебречь. Это объясняется тем, что усредненная по массе и по времени цикла плавки температура футеровки остается практически постоянной. Однако в отдельные относительно короткие отрезки времени изменение энтальпии футеровки оказывает существенное влияние на энергетический баланс печи и  $W_{ак}$  необходимо учитывать. Это относится, в частности, к началу периода плавления, когда значительное количество тепла передается загруженной шихте от нагретой футеровки подины, откосов и стен печи. Отметим, что на современных печах с водоохлаждаемыми стенами и сводом, заменяющими значительную часть футеровки, роль  $W_{ак}$  значительно снизилась.

Полезное тепло  $W_m$  определяется конечной температурой металла на выпуске из печи и удельным количеством шлака на 1 т стали (кратностью шлака). В зависимости от этих факторов  $W_m$  колеблется в пределах 400 - 500 кВт·ч/т и составляет 55-65% общего расхода энергии.

Электрические потери  $\sum W_{эл}$  зависят от конструкции вторичного токоподвода, параметров электрического режима и стабильности горения электрических дуг. Значения этих потерь составляют 6-13%  $W_3$ .

Потери тепла из рабочего пространства  $W_{тп}$  на современных печах достигают 30 - 35 %. По сравнению с ДСП, работающими по классической технологии без водоохлаждения стен и свода и без принудительного газоотсоса из рабочего пространства, эти потери значительно возросли. Они складываются из потерь теплопроводностью через футеровку  $W_{тпф}$ , с охлаждающей водой  $W_{тпв}$ , потерь излучением и конвекцией открытым рабочим пространством (при отведенном своде) и через открытое окно  $W_{тпо}$ , потерь с отходящими газами  $W_{тпг}$ .

## 4.2.7 Тепловые потери дуговых печей

### 4.2.7.1 Тепловые потери через футеровку и с охлаждающей водой

Тепловая работа футеровки оказывает сильное влияние на условия теплообмена в рабочем пространстве и расход электроэнергии. Поверхностная плотность результирующего теплового потока  $q_{рез}$ , проходящего через внутреннюю тепловоспринимающую поверхность футеровки печи и расходуемого на изменение энтальпии  $W_{ак}$ , меняется по ходу электроплавки, так как испытывают резкие колебания с большой скоростью и в широких пределах плотность падающего потока излучения электрических дуг и температура внутренней поверхности  $T_v$  футеровки. Однако эти изменения из-за их скоротечности и малой теплопроводности огнеупорных материалов распространяются в слой футеровки лишь на относительно небольшую глубину (рис. 4.1)[9]. На ДСП малой мощности с продолжительностью цикла плавки  $\tau_{ц} \approx 4 - 5$  ч эта глубина составляет 150-200 мм, а на мощных ДСП при  $\tau_{ц} < 2$  ч - не более 60-90 мм. Поскольку футеровка имеет значительно большую толщину, температуры ее наружной теплоотдающей поверхности  $T_0$  и прилегающих к ней слоев остаются практически постоянными в течение всей плавки, как и тепловые потери в окружающую среду. Поверхностная плотность потока определяется значениями  $T_0$  свода, кожуха и днища ДСП, которые мало зависят от емкости ДСП, но значительно увеличиваются по мере износа футеровки в ходе ее кампании. По измерениям, проведенным на ДСП емкостью от 5 до 200 т, значения  $T_0$  для свода составляют 150 - 400, для кожуха 80 - 350 и для днища 60 - 200°C. Соответствующие удельные значения теплового потока с наружной поверхности при температуре окружающего воздуха 20°C составляют: для свода 3-15, для кожуха 0,8 - 10 и для днища 0,4 - 3 кВт/м<sup>2</sup>. Следует отметить, что за счет фильтрации газов через неплотности футеровки потери тепла через свод, не имеющий металлического кожуха, могут значительно превысить приведенные значения. Потери тепла через свод и стены значительно возрастают при работе ДСП в конце кампании при сильно изношенной футеровке.

Приведенные данные объясняют сравнительно небольшое влияние  $W_{акк}$  на тепловую работу ДСП, несмотря на весьма высокие абсолютные значения этой величины. Во время плавильной кампании величина энтальпии футеровки  $\Delta H_{ф}$  испытывает циклические колебания около своего среднего значения, связанные с повторяющимися изменениями температуры рабочего пространства по ходу каждой плавки (см. рис. 4.15). При этом средние значения  $\Delta H_{ф}$  на смежных плавках остаются практически постоянными и постепенно уменьшаются только по мере износа футеровки стен и свода в ходе кампании ДСП.

Циклические колебания  $\Delta H_{\text{ф}}$  практически не сказываются на тепловом балансе всей плавки, но существенно влияют на частные тепловые балансы ее отдельных периодов. Так, за время заправки и завалки шихты тепловые потери практически целиком компенсируются за счет снижения энергии, аккумулированной футеровкой  $W_{\text{акк}}$  причем около 33% этого тепла поглощает шихта, которая нагревается таким образом в среднем примерно на  $100^{\circ}\text{C}$ . Футеровка продолжает отдавать тепло и в начале периода расплавления (кривая 1, рис. 4.15). После открытия дуг начинается процесс повышения температуры футеровки (см. рис. 4.15) и роста  $W_{\text{акк}}$ . В окислительный период футеровка поглощает около 19% всего количества выделяющегося в рабочем пространстве ДСП тепла, а в восстановительный период - около 17%. Значения  $W_{\text{акк}}$  в конце и в начале плавки совпадают.

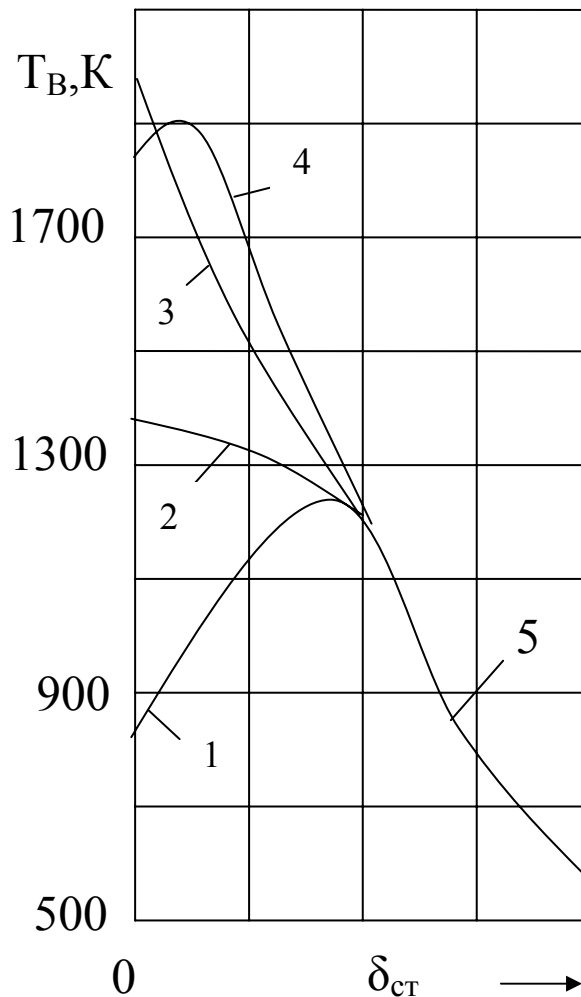


Рис. 4.15. Распределение температур по толщине футеровки  $\delta_{\text{ст}}$  в различные периоды плавки:

- 1, 2, 3 - начало, середина, конец плавления; 4 - выпуск;  
5 - стационарный участок кривой распределения

Таким образом, в балансовых расчетах и особенно при оценке КПД источников энергии в различные периоды плавки по полезному расходу тепла  $W_m$  необходимо учитывать изменения  $W_{акк}$ .

Потери тепла с теплоотдающей поверхности рабочего пространства ДСП, а следовательно, и расход электроэнергии можно сократить путем увеличения толщины слоя футеровки, применения тепловой изоляции, уменьшения площади теплоотдающей поверхности и длительности цикла плавки  $\tau_c$ .

Для футеровки стен и сводов отечественных ДСП применяют преимущественно магнезитохромитовые огнеупоры. Практика показывает, что увеличение толщины этих элементов футеровки нерационально, так как при этом значительно увеличиваются скорость износа и удельный расход огнеупоров. Тепловая изоляция стен и сводов ДСП также не получила распространения. Обычно такая изоляция приводит к увеличению температур в рабочем слое футеровки и резкому падению ее стойкости, особенно на крупных ДСП. Потери из-за простоев ДСП на ремонт футеровки намного превышают экономию от снижения расхода электроэнергии  $W_3$ . Поэтому тепловая изоляция стен и сводов ДСП, как правило, является экономически невыгодной.

Это положение не распространяется на конструкцию подины ДСП. Тепло, теряемое через подину, отнимается от нагретой и расплавленной шихты. Таким образом теряется часть полезного тепла  $W_m$  согласно (4.15), на восполнение которого приходится затрачивать значительно больше электроэнергии по сравнению с потерянными количеством тепловой энергии. Так, в период нагрева жидкой ванны на компенсацию тепловой энергии, потерянной через подину необходимо дополнительно израсходовать почти вдвое больше электрической энергии. Поэтому подину теплоизолируют от металлического днища слоями асбеста, шамотного порошка и шамотного кирпича, хотя это и приводит к некоторому снижению стойкости рабочего слоя футеровки и дополнительным затратам на его заправку и ремонты.

Площадь теплоотдающей поверхности  $S_{то}$  рабочего пространства зависит от его геометрической конфигурации и емкости ДСП  $m_0$ . С увеличением емкости удельная (на 1 т) площадь теплоотдающей поверхности  $S_{то}$  уменьшается по затухающей кривой (рис. 4.16). Анализ этой кривой показывает, что на ДСП емкостью менее 50-60 т. удельные тепловые потери через футеровку  $W_{тпф}$  резко возрастают, что увеличивает долю  $W_{тпф}$  в энергетическом балансе ДСП согласно (4.15) и удельный расход электроэнергии  $W_3$ .

При увеличении емкости ДСП свыше 50 - 60 т значения  $S_{то}$  изменяются мало и зависимость  $W_3$  от  $m_0$  выражена относительно слабо.

Наибольшее влияние на тепловые потери крупных ДСП  $W_{\text{тпф}}$  оказывает длительность плавки. В отличие от потерь тепла с отходящими газами  $W_{\text{тпг}}$  удельные потери  $W_{\text{тпф}}$  изменяются примерно прямо пропорционально времени плавки. Поэтому при сокращении  $\tau_{\text{ц}}$  на современных мощных ДСП емкостью 100-150 т до 1,0-1,5 ч доля  $W_{\text{тпф}}$  в тепловом балансе снижается до весьма малых значений.

В связи с неудовлетворительной стойкостью огнеупоров на крупных мощных ДСП и ДСППТ футеровку заменяют водоохлаждаемыми панелями. Несмотря на увеличение плотности теплового потока, снимаемого с водоохлаждаемых поверхностей, по сравнению с плотностью теплового потока через футерованные поверхности расход электроэнергии существенно увеличивается только на печах небольшой емкости, когда потери тепла с

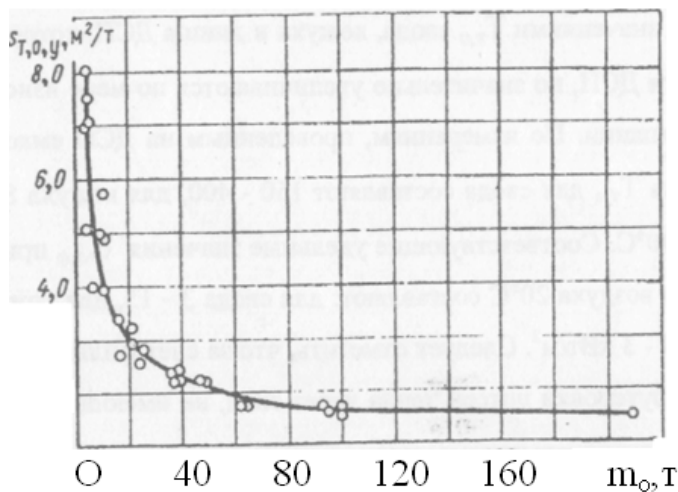


Рис. 4.16. Зависимость удельной теплоотдающей поверхности ДСП от вместимости

охлаждающей водой значительно возрастают из-за большого значения удельной площади теплоотдающей поверхности  $S_{T_0}$  (см. рис. 4.2), либо крупнотоннажных маломощных ДСП при относительно большой длительности плавки.

На крупных мощных ДСП, на которых значения  $S_{T_0}$ , как и доля  $W_{\text{тпф}}$  в тепловом балансе, весьма малы,  $W_{\text{э}}$  при замене футеровки стен и свода водоохлаждаемыми панелями изменяется слабо. Это объясняется тем, что внедрение водоохлаждаемых панелей сопровождается не только увеличением  $W_{\text{тпв}}$ , но и снижением ряда других потерь тепла и электроэнергии.

#### 4.2.7.2 Тепловые потери с отходящими газами

В энергетическом балансе ДСП (4.3) потери тепла с отходящими газами  $W_{\text{тпг}}$  составляют в среднем 15-17 %. Кроме того, удаление и очистка газов требуют дополнительных энергетических затрат, увеличивающих расход электроэнергии на выплавку стали на 10-20 %. Доля стоимости систем газоудаления в стоимости ЭСПЦ составляет 10 - 15 %. Характерной особенностью ДСП являются резкие колебания мощности тепловых потерь с отходящими газами  $P_{\text{тпг}}$  по ходу плавки. Значительное влияние на  $P_{\text{тпг}}$  оказывает выделение химической энергии  $W_x$  при окислении углерода шихты. При использовании ТКГ и интенсивной подаче кислорода в слой

шихты в период плавления наибольшие значения  $P_{\text{тпг}}$  (около 20 МВт) имеют место в начале плавки. Это объясняется тем, что при таком ведении процесса окисление углерода происходит по ходу плавления и к концу этого периода в основном заканчивается.

Общее количество тепла, теряемого с отходящими газами за время плавки,  $W_{\text{тпг}}$  сравнительно мало зависит от распределения  $P_{\text{тпг}}$ . Доля этой величины в энергетическом балансе ДСП возрастает при сокращении цикла плавки с увеличением вместимости и мощности ДСП, расходов топлива и кислорода. На печах небольшой и средней мощности емкостью 3-50 т  $W_{\text{тпг}}$  в период плавления составляет 6—8%, на 200-тонных ДСП мощностью 60 МВ\*А- 21—22%, а на высокомошных (75 МВ\*А) 100-тонных ДСП при длительности плавления около 1 ч  $W_{\text{тпг}}$  достигает 25% [3].

## 5 СПЕЦИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

### 5.1 Плазменные нагревательные устройства

#### 5.1.1 Принцип действия и области применения плазменного нагрева

Низкотемпературная плазма — газообразное вещество, содержащее положительно и отрицательно заряженные частицы — ионы и электроны. Плазма квазинейтральна, т. е. в достаточно большом объеме электрические заряды обоих знаков компенсируют друг друга [31].

Плазма называется термической или изотермической, если она находится в состоянии термодинамического равновесия. В этом случае плазма имеет определенную температуру, одну и ту же для всех ее компонентов. В изотермической плазме каждый прямой элементарный процесс находится в равновесии с обратным ему процессом. Характеристики такой плазмы полностью определяются плазмообразующим веществом и двумя параметрами — температурой и давлением. Получить в лабораторных или промышленных условиях изотермическую плазму довольно сложно, и на практике приходится иметь дело с плазмой, находящейся в состоянии локального или частичного локального термодинамического равновесия.

В плазме, находящейся в этом состоянии, нарушается баланс процессов фотоионизации и фоторекомбинации частиц — число актов испускания фотонов превышает число актов поглощения. Остальные элементарные



процессы приблизительно сбалансированы. Параметры такой плазмы определяются ее составом и локальной температурой, хотя электронная температура всегда будет несколько превосходить температуру тяжелых частиц. В состоянии локального термодинамического равновесия находится плазма сильноточных дуг при нормальном давлении. Разницу электронной и ионной температур можно оценить по формуле

$$\frac{T_e - T_g}{T_e} = \frac{M}{m_e} \left( \frac{\lambda_e e_0 E}{3kT_e} \right)^2,$$

где  $T_e$ ,  $T_g$  — температуры электронов и тяжелых частиц;  $m_e$ ,  $e_0$ ,  $\lambda_e$  — масса, заряд и длина свободного пробега электронов;  $M$  — масса иона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $E$  — напряженность электрического поля.

Для сильноточных дуг  $(T_e - T_g)/T_e$  составляет несколько процентов.

При частичном локальном равновесии состояние плазмы характеризуется двумя температурами — электронной  $T_e$  и ионной  $T_i$  (последняя примерно равна температуре нейтральных атомов  $T_g$ ).

В плазменных нагревательных устройствах достигается температура  $(10—20) \cdot 10^3$  К (для плазмы, находящейся в состоянии локального термодинамического равновесия); в случае неравновесной (находящейся в частичном равновесии плазмы) электронная температура может достигать  $(30—50) \cdot 10^3$  К. Образование заряженных частиц происходит в основном за счет термической ионизации, нагрев газа — за счет энергии, выделяющейся при прохождении через газ электрического тока.

Устройства, позволяющие стационарно получать плазму с указанными выше температурами, называются плазмотронами.

По своему назначению плазмотроны могут быть разделены на два типа:

Первый тип — это плазмотроны, в которых полезным является только тепло, переданное потоку плазмы. К ним относятся высокочастотные и сверхвысокочастотные плазмотроны, а также электродуговые плазмотроны постоянного и переменного тока с дугой, горящей между электродами плазмотрона. В дальнейшем мы их будем называть струйными плазмотронами. В них дуга горит внутри плазмотрона, рабочие электроды являются элементом конструкции и внутри плазмотрона замыкается электрическая цепь. Эти плазмотроны используются для нагрева газов.

Второй тип — это плазмотроны, в которых полезным теплом является и тепло, выделяемое в анодном пятне (при переменном токе — в одном из опорных пятен) дуги, а также, в большей или в меньшей степени, энергия излучения. В этих плазмотронах одно из опорных пятен дуги вынесено на нагреваемое изделие, которое таким образом включается в электрическую цепь. Такие плазмотроны мы в дальнейшем будем называть плавильными. Оба эти названия достаточно условны. Так, плазмотроны, используемые для

резки металлов, для нагрева ленты и проволоки по схеме включения, относятся к «плавильным» [31].

В области металлургии плазменный нагрев используется для плавки и восстановления металлов, получения тонкодисперсных порошков, сфероидизации порошков, плавки керамики и ряда других процессов.

Существуют три типа плазменных плавильных печей: печи для плавки в керамическом тигле; печи для плавки в кристаллизаторе; печи для плавки в гарнисаже.

Печи с керамическим тиглем применяются главным образом для плавки сталей и сплавов на никелевой основе и переплава легированных отходов.

Обычно в качестве плазмообразующего газа используется аргон, но в зависимости от требований технологии состав газа может меняться, и так как печь в отличие от обычной дуговой может быть хорошо уплотнена, в ней может поддерживаться любая атмосфера. В этом, а также в отсутствии графитовых электродов и исключении возможности науглероживания металла основное отличие плазменной печи от открытой дуговой, что обеспечивает ей следующие преимущества:

а) сокращение расхода легирующих элементов, возможность переплава отходов легированных сталей с высоким усвоением легирующих: Mn; Cr; Ni; Mo до 96—100% и Ti до 60—80%;

б) возможность выплавки малоуглеродистых сталей и сплавов;

в) возможность выплавки азотированных сталей с использованием газообразного азота (в этом случае в состав плазмообразующего газа вводится азот);

г) улучшение условий труда и существенное уменьшение загрязнения окружающей среды.

Плазменные печи работают почти бесшумно и выброс газов и пыли в атмосферу незначителен [31].

Стоимость переплава в плазменных печах в настоящее время выше, чем в открытых дуговых, вследствие большого расхода энергии, вызванного большим количеством водоохлаждаемых узлов, а также значительным потреблением аргона.

Плазменные печи для плавки в кристаллизаторе являются переплавными печами. В отличие от вакуумных дуговых печей с расходуемым электродом у них нежесткой связи между мощностью, вводимой в печь, и скоростью плавки, т. е. они, как и электронно-лучевые, позволяют выдерживать жидкую ванну сколь угодно долго и применимы: для плавки практически всех металлов — сталей, титана, бериллия, ниобия, молибдена, тантала; для плавки сплавов с легко испаряющимися добавками; для переплава отходов реакционных металлов, в том числе титана. Могут

использоваться в очень широком диапазоне давлений — от 0,3— 0,5 МПа до  $10^{-1}$  Па.

При этом вакуумные плазменные печи, работающие при давлении  $10^2$ — $10^{-1}$  Па, в отличие от электронно-лучевых печей не боятся резких изменений давления связанных с газовыделением из расплавляемой шихты. В связи с более высоким давлением в этих печах меньше потери на испарение, чем в электронно-лучевых. Помимо того, они работают на низких напряжениях и не требуют биологической защиты. Могут быть созданы печи, в которых давление меняется по ходу плавки в диапазоне  $10^5$ — $10^3$  Па.

Основными недостатками плазменных печей с кристаллизатором являются: меньший КПД (по сравнению с электронно-лучевыми печами); трудности в достижении больших мощностей, так как мощность может быть увеличена только путем увеличения тока; эрозия катода, в результате которой катодный материал может попасть в ванну печи и загрязнить ее (это особенно существенно для вакуумных печей с вольфрамовым электродом).

В зависимости от типа плазмотрона печи могут работать как на постоянном, так и на переменном токе [31].

Печи для плавки в гарнисаже предназначены для получения фасонного литья из сталей, жаропрочных сплавов, тугоплавких и высокореакционных металлов. Эти печи могут выполняться на широкий диапазон давлений. Их достоинства — высокая чистота металла, возможность плавки кусковой шихты и отходов.

Печи с плазменным нагревом используются и для плавки керамики. Их достоинство — высокая чистоте продукта и возможность получения керамического литья.

Для целей восстановления металлов из окислов используются как плавильные, так и струйные плазмотроны. При карботермическом восстановлении процесс идет в твердой и жидкой фазах. В этом случае используются печи, аналогичные печам для плавки в гарнисаже или в кристаллизаторе, но с мощной откачной системой Шихтой служат гранулы или таблетки из окисла металла и углерода. Восстановленный металл получаете: в виде компактного слитка.

При восстановлении водородом или конвертированным газом используются струйные плазмотроны, создающие поток восстановительной плазмы. Восстанавливаемый материал в виде порошка вводится в этот поток. Конечный продукт получается в виде порошка

Существуют проекты и ведутся исследования по использованию струйных плазмотронов для восстановления металла в печах типа доменных. При этом основные преимущества, которые обеспечивает плазменный нагрев по сравнению с существующей технологией, является увеличение производительности и повышение качества продукции [31].

В плазмохимии в промышленных масштабах реализован целый ряд процессов, количество которых с каждым годом растет. В их числе: получение ацетилена из природного газа, а также из жидких предельных углеводородов; получение пигментной двуокиси титана; получение сверхчистых веществ, в том числе для полупроводниковой техники; получение тонких пленок в радиоэлектронике и др.

Основными преимуществами плазмохимической технологии являются: высокие скорости процессов и, следовательно, меньшие габариты технологического оборудования; возможность использования трудноперерабатываемого, но широкодоступного сырья; одностадийность большинства плазмохимических процессов; легкая управляемость процессом; малая чувствительность к качеству исходного сырья.

В тех случаях, когда масштаб производства невелик, но требуется очень высокая чистота продукта, используются безэлектродные высокочастотные и сверхвысокочастотные плазмотроны, в которых отсутствует загрязнение плазмы (и соответственно продукта) материалом электродов. Если к чистоте плазмы не предъявляется жестких требований или если масштабы производства велики и требуются мощности в тысячи киловатт, используются дуговые плазмотроны постоянного и переменного тока.

### **5.1.2 Устройство и рабочий процесс плазмотрона**

Электрическая дуга в плазмотроне в отличие от свободно горящей всегда находится в условиях вынужденной конвекции. В плазмотронах дугу сжимают, помещая ее в узких каналах и диафрагмах, и обдувают интенсивными потоками газов или жидкостей. Пространственное положение столба дуги в разрядной камере большинства типов плазмотронов однозначно predetermined или стабилизировано внешним силовым воздействием или специальной геометрией разрядной камеры.

Стабилизированная дуга позволяет получить существенно большие максимальные температуры, чем свободно горящая дуга. На практике, за исключением особых случаев, не требуется достижение максимальных температур. Наоборот, плазму электрической дуги желательно иметь при столь низкой температуре, насколько это совместимо с требуемыми параметрами, в частности с энтальпией газовой струи на выходе из плазмотрона. Последнее связано с лучистыми потерями. Поскольку излучение весьма сильно зависит от температуры, дуга малого диаметра с высокой температурой будет излучать большую мощность, чем дуга большего диаметра с меньшей температурой при той же средней энтальпии в плазмотроне [31].

Взаимодействие электрической дуги с газовым полком и стенками разрядной камеры плазмотрона протекает следующим образом. Газ поступает в канал, взаимодействует с дугой, горящей между стержневым или торцевым катодом и цилиндрическим анодом, и вытекает через сопло, которым в простейшем случае может служить сам анод. Экспериментально установлено, что небольшая закрутка при подаче газа в плазмотрон существенно не отражается на характеристиках дуги.

В плазмотронах, используемых для технологических целей, скорость истечения струн существенно ниже звуковой.

Условно столб дуги может быть разделен на три участка: начальный, цилиндрический и выходной.

Характерными отличиями начального участка служит уменьшающаяся напряженность электрического поля в столбе и возрастающие поперечные размеры дуги. На свойства и характеристики этого участка столба дуги оказывают влияние многие факторы, наиболее существенные из которых следующие:

1. расширение дуги, связанное с нагревом газа внутри нее;
2. магнитное сжатие дуги, вызванное взаимодействием осевой составляющей тока с собственным магнитным полем, которое ускоряет газ в осевом направлении;
3. электродинамическое ускорение плазмы внутри столба в результате взаимодействия радиальной составляющей плотности тока с азимутальным магнитным полем самого столба.

На начальном участке дуга постепенно расширяется до тех пор, пока ее «граница» встретится с холодным пограничным слоем, образующимся на стенке канала. Под «границей» в теории взаимодействия дуги с пристеночным пограничным слоем подразумевается поверхность, находящаяся на некотором расстоянии от дуги, где происходит резкое понижение температуры и вязкости плазмы.

При неизменном диаметре канала и расходе газа увеличение тока приводит к расширению «границы» дуги и, следовательно, к уменьшению длины начального участка; если же неизменны диаметр канала и ток дуги, то увеличение расхода газа ведет к уменьшению толщины пограничного слоя и, следовательно, к увеличению длины начального участка.

После встречи холодного пристеночного слоя с «границей» дуги последняя начинает подвергаться турбулентным возмущениям и разрушению, начинается интенсивное перемешивание потока, ведущее к выравниванию поля температур. Длина второго участка может составить десятки диаметров электрода. Амплитуда поперечных колебаний и их частота на этом участке нарастают вниз по потоку [31].

В плазмотронах с самоустанавливающейся длиной дуги в начале второго участка происходит явление повторяющегося пробоя между столбом

дуги и электродом. Это явление в литературе часто называется «шунтированием». На этом участке растет напряженность электрического поля, что связано с интенсификацией теплообмена. Увеличивается также тепловой поток в электрод.

Третий участок — зона полностью развитого турбулентного течения. В плазмотронах с гладкой поверхностью обнаружить этот участок трудно вследствие весьма протяженного второго участка, однако в плазмотронах с распределенной подачей газа в межсекционные зазоры он легко обнаруживается вследствие сильного сокращения предыдущих участков. Напряженность электрического поля здесь постоянна и в несколько раз выше, чем на первом участке.

Следует отметить, что такая картина справедлива лишь для струйных плазмотронов, в которых дуга горит в канале плазмотрона. В плавильных плазмотронах дуга горит в свободном пространстве и стабилизируется продольным потоком газа, большая часть которого подается не через плазмотрон, а засасывается на начальном участке дуги из окружающей его атмосферы.

### 5.1.3 Струйные плазмотроны

Струйные плазмотроны, которые применяются для высокотемпературного нагрева (в пределах 2000 – 6000 К) газов практически всех видов – восстановительных, нейтральных, окислительных, несмотря на многообразие конструкций могут быть разделены на две группы, отличающиеся способом стабилизации дуги: плазмотроны с продольно обдуваемой дугой — линейные и плазмотроны с поперечно обдуваемой дугой — коаксиальные [31].

Кроме того, признаком классификации может служить род плазмообразующего газа — кислород, воздух, азот, аргон, водород, метан и др.

На выбор конструктивной схемы плазмотрона влияют многие факторы, важнейшие из которых следующие: энергетические параметры струи (мощность и среднemasсовая энтальпия), род газа, параметры источника питания, необходимый ресурс работы плазмотрона, технологические требования к струе (допустимость ее загрязнения материалами электродов, степень пространственной и временной однородности ее параметров) и т. д.

Наиболее широко используются одно- и двухкамерные линейные плазмотроны (рис 5.1, 5.2).

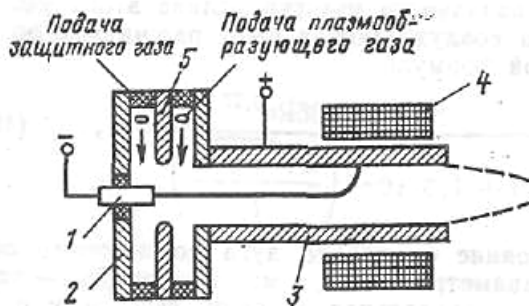


Рис. 5.1. Однокамерный плазмотрон с торцевым вольфрамовым катодом.

- 1 — катод; 2 — вихревая камера;  
3 — анод; 4 — магнитная катушка;  
5 — диафрагма,

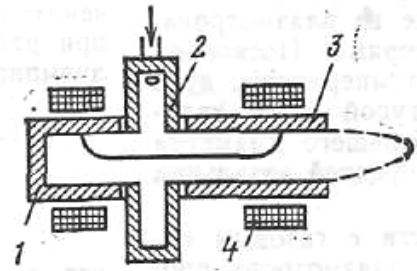


Рис. 5.2. Однокамерный плазмотрон с полым охлаждаемым катодом.

- 1, 3 — электроды;  
2 — вихревая камера;  
4 — магнитная катушка

### 5.2.4 Плавильные плазмотроны

В плавильных плазмотронах электрическая дуга горит между электродом плазмотрона и расплавляемым металлом.

Из экономических соображений расход плазмообразующего газа выбирается минимальным и определяется лишь условиями работы электродно-соплового узла плазмотрона.

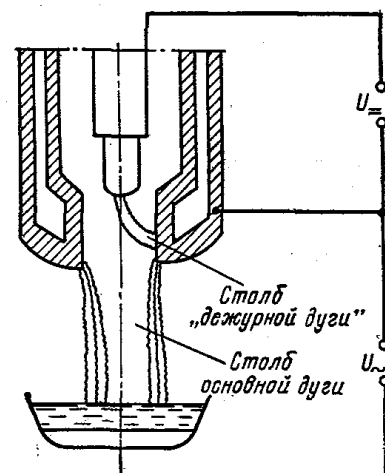
Плавильные плазмотроны постоянного тока, предназначенные для работы в диапазоне давлений  $10^5$ — $3 \cdot 10^3$  Па, имеют стержневой катод, выполняемый из легированного вольфрама, и сопло.

Сопло формирует поток плазмообразующего газа, а также служит анодом при включении плазмотрона (зажигании «дежурной» дуги).

Катодный узел плавильного агрегата представлен на рис.5.3.

Столб вертикально горячей дуги в плазменной печи постоянного тока имеет центральную часть, по форме напоминающую ярко светящийся конус, плавно переходящий в цилиндр. Эта центральная часть окружена менее яркой оболочкой. Экспериментально установлено, что почти весь ток протекает по центральной более яркой части. Поэтому в качестве расчетной модели в дальнейшем дуга рассматривается как конус, плавно переходящий в цилиндр.

Для работы на переменном токе могут использоваться плазмотроны постоянного тока, но при значительно меньших (в 5—8 раз) токовых нагрузках. Этим стойкость вольфрамового электрода существенно снижается. Для увеличения мощности и ресурса плазмотрона предложена схема с «дежурной дугой» (рис.



При

5.4).

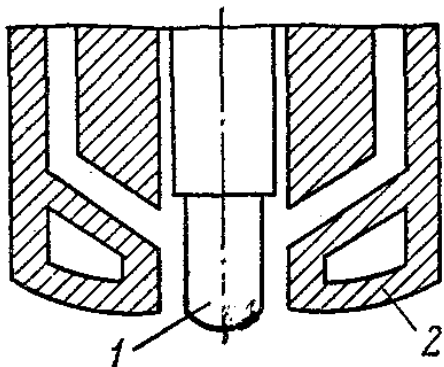


Рис. 5.3. Катодный узел плавильного плазмотрона.  
1 — катод; 2 — сопло.

Рис 5.4. Плазмотрон переменного тока с «дежурной дугой»

## 5.2 Электронно-лучевые печи

В основе принципа электронно-лучевого нагрева (ЭЛН) лежит преобразование кинетической энергии потока электронов в тепловую при взаимодействии с поверхностью нагреваемого предмета.

Выделение тепловой энергии происходит в глубина которого равна нескольким микрометрам и зависит от энергии падающего потока электронов и плотности материала, подвергаемого обработке. В связи с малостью указанного слоя для большинства технологических применений ЭЛН относится к поверхностным видам нагрева [31].

Метод ЭЛН имеет следующие преимущества по сравнению с другими видами нагрева: низкое давление в рабочей зоне; широкую возможность регулирования мощности и ее поверхностной плотности (плотность мощности электронного луча может изменяться для различных процессов от  $10^2$  до  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>); возможность практически неограниченного времени выдержки жидкого металла; возможность значительного перегрева металла.

Эти преимущества ЭЛН позволяют весьма эффективно применять его для рафинировочного переплава и гарнисажной плавки широкого ассортимента металлов и спецсплавов. Кроме того, ЭЛН применяется для термообработки ленты и нанесения покрытий.

Этот вид нагрева может также найти широкое применение для получения гранулята, сутунок и трубных заготовок, оплавления поверхности слитков, вытягивания монокристаллов и т. п.

Электронно-лучевые плавильные и литейные печи используются для получения слитков и отливок высококачественных тугоплавких и активных металлов, а также сталей и спецсплавов. В качестве исходной шихты возможно применение заготовок, скрапа, гранул, стружки. Помимо того, можно производить рафинировку жидкого металла, полученного в другом



агрегате. Поэтому электронно-лучевые печи (ЭЛП) весьма перспективны для утилизации отходов.

Открытая ванна и высокий перегрев металла создают весьма благоприятные условия для хорошей дегазации металла. Наиболее эффективная рафинировка происходит, если основной металл имеет низкую, а примесь— высокую упругость пара. Считается, что с помощью электронно-лучевой плавки (ЭЛПл) может быть удален любой компонент расплава, давление пара которого в 10 раз и более превышает давление пара основного металла. Помимо этого, наличие высоких температуры и вакуума способствует очистке металла за счет термической диссоциации окислов и других соединений, а также образования всплывающих неметаллических включений.

С целью снижения угара металла, улучшения структуры и поверхности слитка применяется устройство для развертки луча, обеспечивающее требуемую удельную мощность (на единицу обрабатываемой поверхности).

При ЭЛПл можно управлять процессом кристаллизации при помощи изменения скорости плавки, подводимой мощности и конфигурации зоны ЭЛН, а также изменением места подачи жидкого металла.

Слитки в ЭЛП формируются в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе с постепенным их вытягиванием. Поверхность слитка во многом зависит от режима вытяжки. В последнее время для улучшения поверхности слитка его вытягивание производят при возвратно-поступательном движении.

В ЭЛП целесообразно проводить выплавку следующих металлов и сплавов на их основе: ниобия, тантала, циркония, молибдена, вольфрама, титана, конструкционных высокопрочных сталей, штамповых и некоторых инструментальных сталей, шарикоподшипниковых сталей, некоторых нержавеющей марок сталей, жаропрочных сталей, меди, никеля, чистого железа.

Изучению экономики ЭЛПл металлов в настоящее время уделяется большое внимание. Однако современный уровень технико-экономических показателей ЭЛПл еще не соответствует действительным возможностям процесса. Мощности печей используются не полностью, велики простои установок, завышены в связи с этим затраты на производство металла. Это объясняется относительной новизной, а следовательно, и недостаточным освоением ЭЛП. Из-за повышенных затрат на оборудование стоимость выплавки стальных слитков диаметром до 200 мм в ЭЛП выше, чем в ВДП или вакуумной индукционной печи (ВИП), но с увеличением емкости печей себестоимость выплавленного металла в ЭЛП значительно снижается.

Эксплуатация электронно-лучевой холодноподовой печи в США показала, что ЭЛП высокой производительности может быть экономичней других видов вакуумных плавильных печей. Например, стоимость выплавки

слитков нержавеющей стали в холодноподовой ЭЛП мощностью 10 МВт и производительностью 100 000 т/год ниже стоимости выплавки их в ВИП.

Анализ условий эксплуатации ЭЛП позволил установить примерные сроки их ремонта: планово-предупредительный — 2 раза в месяц продолжительностью 1 сут. и капитальный — один раз в год продолжительностью 10 сут. Фактически годовой фонд рабочего времени печей следует принять 7500 ч. Капиталоемкость стальных слитков ЭЛП уменьшается с увеличением массы выплавляемых слитков и становится равной 300—400 руб/т для слитков свыше 650 кг.

В отечественной и зарубежной промышленности работает большое количество различных конструкций ЭЛП, но по принципу действия все они могут быть сведены к приведенной на рис. 5.5, а схеме. Характерной особенностью ее является так называемый «капельный переплав», т. е. процесс, при котором капли расплавленного металла с заготовки попадают непосредственно в кристаллизатор. Удельный расход электроэнергии при ЭЛП в сильной мере зависит от мощности печей, переплавляемого материала и технологии плавки, но при выплавке крупных стальных слитков он обычно составляет около 2000 кВт·ч/т.

Одной из разновидностей ЭЛП является печь с промежуточной емкостью. Металл с переплавляемой заготовки стекает в промежуточную емкость, имеющую водоохлаждаемые стенки, а затем в кристаллизатор. Этим обеспечивается развитая реакционная поверхность и соответственно эффективное рафинирование металла и одновременное повышение производительности. Промежуточная емкость устраняет попадание в кристаллизатор нерасплавившихся кусков заготовки, а также позволяет вводить в жидкий металл добавки. Металл, выплавленный таким способом, обладает более высокой степенью однородности по составу. Принципиальная схема электронно-лучевой установки с промежуточной емкостью приводится на рис. 5.5, б.

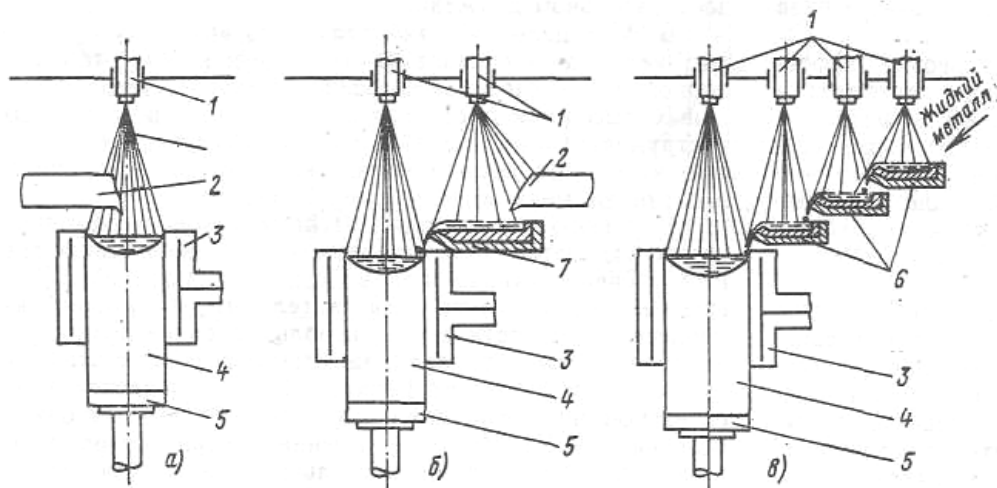


Рис. 5.5. Схемы электронно-лучевых плавильных печей.

а, — капельного переplava; б — с промежуточной емкостью; в — с холодным подом: 1 — электронно-лучевая пушка; 2— расплавляемая заготовка; 3— водоохлаждаемый кристаллизатор; 4 — наплавляемый слиток; 5 — водоохлаждаемый поддон ; 6 – водоохлаждаемый под; 7 — промежуточная емкость.

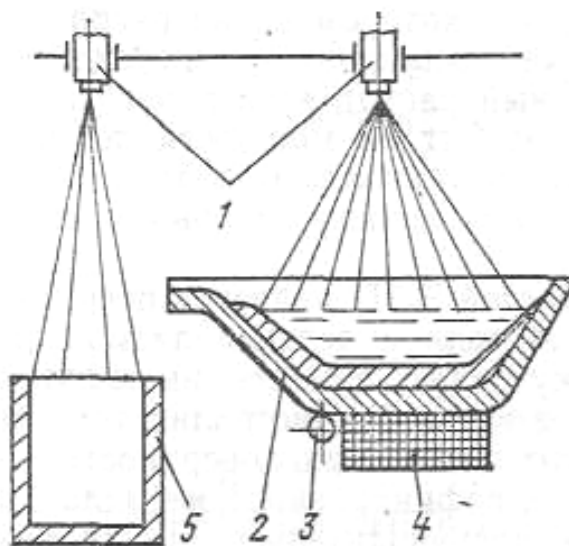
Другой разновидностью ЭЛП является холодноподовая печь. В ней рафинирование происходит во время протекания жидкого металла по системе подов, поверхность которых может быть футерована огнеупорным кирпичом или иметь затвердевший слой металла (гарнисаж). Жидкий металл на всем своем пути до кристаллизатора подогревается электронными пушками со сканированием луча. Исходный металл может подаваться в жидком состоянии извне с помощью специального барометрического затвора или плавиться индукционным, электродуговым или электронно-лучевым способом непосредственно в вакуумном объеме самой печи [31].

Многоступенчатое холодноподовое рафинирование открывает широкие возможности по повышению производительности ЭЛП за счет увеличения поверхности жидкого металла, находящегося в вакууме. На рис. 5.5,в приведена схема такой печи.

С успехом используется ЭЛН в вакуумных гарнисажных печах для получения фасонных отливок из тугоплавких и высокоактивных металлов. Использование гарнисажного тигля предотвращает загрязнение металла материалом тигля и тем самым обеспечивает высокое качество выплавляемого металла. Следует отметить, что накапливание больших объемов жидкого металла в гарнисажном тигле связано со значительными энергетическими потерями.

Для улучшения теплового баланса процесса плавки используется электромагнитное перемешивание расплава (ЭМП), которое способствует усреднению температуры по объему жидкой ванны и снижению температуры перегрева зеркала расплава и как следствие этого увеличению количества жидкого металла.

Качество металла отливок, полученных методом ЭМПл, весьма высокое. На рис. 5.6 приведена схема литейной ЭМП.



5.6 приведена ЭМП.

Рис. 11-2. Схема конструкции гарнисажной литейной печи с электромагнитным перемешиванием металла в тигле.

1 — электронно-лучевые пушки; 2 — водоохлаждаемый тигель; 3 — поворотная ось; 4 — перемешивающее устройство; 5 — изложница или литейная форма.

Использование ЭЛН для испарения различных металлов и сплавов с целью нанесения покрытий в вакууме исключительно эффективно. Возможность создания высоких концентраций мощности непосредственно на поверхности материала обеспечивает значительные скорости испарения, достижение которых другими способами затруднительно.

На рис. 5.6 приводится типичный испарительный элемент электропечи для нанесения покрытий. Количество тиглей с металлом и электронных пушек может варьироваться в широких пределах. Следует отметить, в подобных испарительных печах обычно применяются щелевые пушки мощностью 3—50 кВт с поворотом на 180—270°.

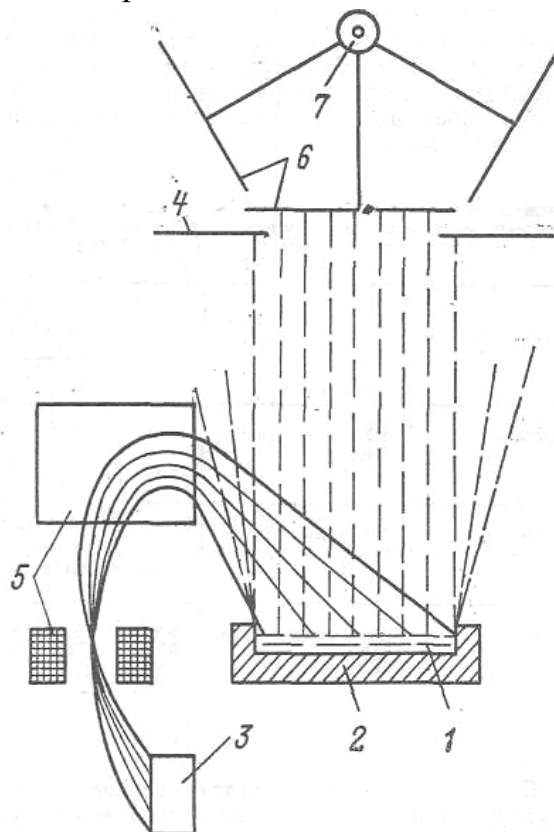


Рис. 5.6. Схема электронно-лучевой печи для нанесения покрытий на различные изделия.

- 1 — жидкий металл; 2 — тигель; 3 — электронная пушка;  
 4 — экран; 5 — системы отклонения электронного луча;  
 6 — нагреваемое изделие; 7 — механизм перемещения изделий.

ЭЛН перспективен также для термообработки и покрытия ленты. Преимущество метода заключается в быстроте достижения необходимой степени нагрева, отсутствии источников загрязнения, легкой управляемости и экономичности процесса. Он применим для отжига электротехнических сталей и спецсплавов, которые проходят под электронным лучом рафинирующий и формирующий структур отжиг.

Для повышения производительности печи могут даваться динамическими вакуумными уплотнениями с целью непрерывного ввода и вывода обрабатываемой ленты в вакуумную рабочую камеру. В печах этого типа помимо высокотемпературного отжига можно осуществлять покрытие ленты металлами и окислами с целью создания защитных, сверхпроводящих, полупроводящих и других слоев. Эти печи были приспособлены для изготовления фольги из металлов и сплавов путем их интенсивного испарения в вакууме. Конденсат осаждается на подложке из полированной нержавеющей стальной ленты, покрытой специальным разделительным слоем для облегчения отделения фольги от подложки. Получаемая фольга выше качеством, чем обычная, получаемая прокаткой. Процесс экономически выгоден при производстве фольги толщиной до 0,25 мм.

На рис. 5.7 приводится принципиальная схема протяжной ЭЛП для термообработки ленты, нанесения покрытий или получения фольги.

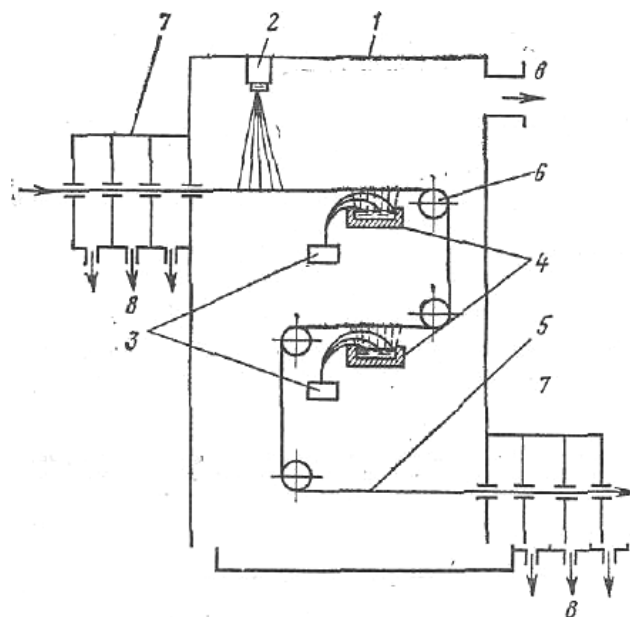


Рис. 5.7. Схема электронно-лучевой печи для термообработки ленты и нанесения на нее покрытий.

- 1 — рабочая камера; 2 — электронно-лучевая пушка для нагрева ленты;  
 3 — плосколучевые электронные пушки для испарения металла; 4 — тигли;  
 5 — лента; 6 — направляющие ролики;  
 7 — динамические вакуумные уплотнения; 3 — вакуумная откачка.

Использование ЭЛН позволяет осуществить некоторые новые технологические процессы, например получение монокристаллических и многослойных плоских слитков или монокристаллических колец и труб большого диаметра. Схемы печей с использованием промежуточной емкости приведены на рис. 5.8 и 5.9.

### 5.3 Печи электрошлакового переплава

Основное назначение печей электрошлакового переплава — производство слитков из высококачественных сталей: шарикоподшипниковых, конструкционных, нержавеющей, жаропрочных, теплостойких, валковых и др. [37]

Слиток, полученный методом электрошлакового переплава (ЭШП), отличается от обычного слитка, отлитого в изложницу, отсутствием усадочной раковины, осевой пористости, осевой и внецентренной ликвации, чистотой по неметаллическим включениям и сниженной анизотропией механических свойств, лучшей деформируемостью. Возможно также применение ЭШП для улучшения качества цветных металлов — меди, титана и сплавов на их основе, а также ферросплавов и тугоплавких металлов, например молибдена.

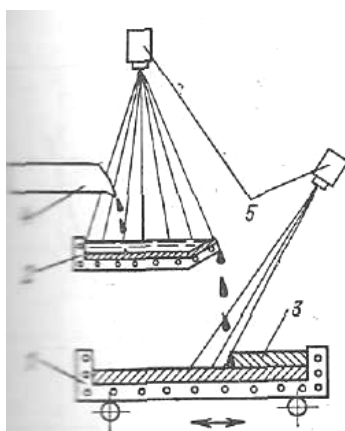


Рис. 5.8. Схема получения монокристаллических и многослойных плоских слитков

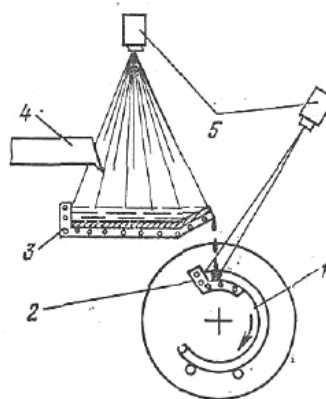


Рис. 5.9. Схема получения монокристаллических колец и трубных заготовок большого диаметра.

1 — водоохлаждаемый поддон; 2 — наплавляемая трубная промежуточная емкость; 3 — заготовка; 2 — водоохлаждаемый наплавляемый слиток; 4 — кристаллизатор; 3 — промежуточная расплавляемая заготовка; 5 — емкость; 4 — расплавляемая электронные пушки. 3 — заготовка; 2 — водоохлаждаемый наплавляемый слиток; 4 — кристаллизатор; 3 — промежуточная расплавляемая заготовка; 5 — емкость; 4 — расплавляемая заготовка; 5 — электронные пушки.

Большое распространение получил ЭШП в производстве стальных слитков круглого и квадратного сечения массой до 5 т, являющихся заготовками для сортового проката. Этим методом получают также слитки прямоугольного сечения для листопрокатного производства. Метод ЭШП в последнее время находит применение для производства полых слитков, различного вида фасонных заготовок: коленчатых валов, корпусов арматуры, баллонов высокого давления и других изделий [12-4]. Крупнотоннажные слитки круглого сечения (свыше 5 т) используют для кузнечного передела при производстве ответственных поковок (валы турбогенераторов, валки прокатных станов и т. п.) [31].

Сущность ЭШП, впервые предложенного Институтом электросварки им. Е. О. Патона АН УССР в 1952—1957 гг., заключается в следующем (рис. 5.10). Расходуемый электрод из переплавляемого металла погружается в слой электропроводящего флюса (шлака), размещенного в водоохлаждаемом металлическом кристаллизаторе, к которому примыкает водоохлаждаемый поддон. Электрический ток, пропускаемый через электрод и шлак, поддерживает последний в расплавленном состоянии при 1600—2000° С. Часть тепла, выделяемого в шлаковой ванне, передается контактирующему с ней электроду, торец которого оплавляется. Капли металла, стекающие с торца электрода, проходят через слой шлака, очищаются в результате физико-химического взаимодействия с ним и формируются в водоохлаждаемом кристаллизаторе в виде слитка.

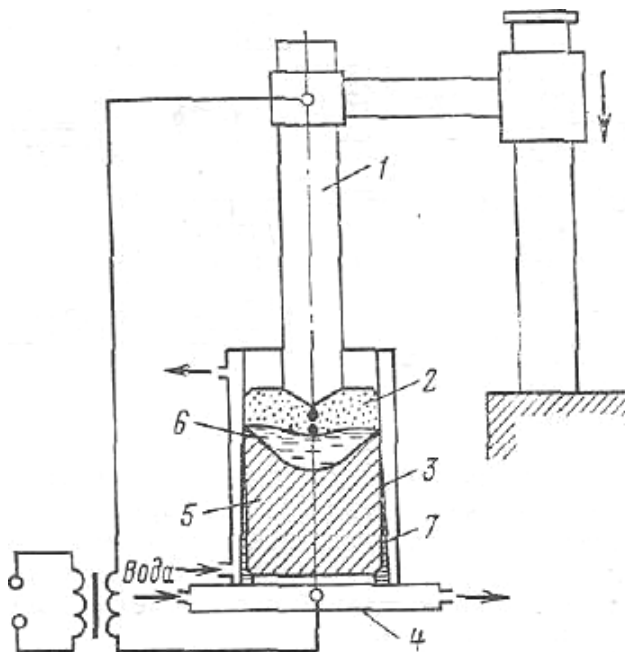


Рис. 5.10. Схема электрошлакового переплава.

1 — расходуемый электрод; 2 —шлаковая ванна; 3 —кристаллизатор; 4 - поддон;  
6 — слиток; 6 — металлическая ванна; 7 -шлаковый гарнисаж.

В процессе переплава в верхней части слитка на границе со шлаковой ванной образуется ванна жидкого металла, а на боковой поверхности слитка — тонкая корочка затвердевшего шлака (гарнисаж).

К основным факторам, обуславливающим улучшение качества металла при ЭШП, относятся:

1. Обработка жидкого металла химически активными шлаками на оплаиваемой поверхности электрода, в процессе прохождения капель через слой шлака и на поверхности раздела шлаковая ванна — слиток.

2. Последовательная направленная кристаллизация слитка в водоохлаждаемом кристаллизаторе.

3. Формирование слитка в шлаковом гарнисаже способствующем получению ровной гладкой поверхности слитка, не требующей дополнительной механической обработки.

Масса выплавляемого слитка является основным параметром, положенным в основу размерного ряда печей ЭШП (ГОСТ 20552-75), включающего печи пов ЭШП-1,25, ЭШП-2,5, ЭШП-5, ЭШП-10, ЭШП-ЭШП-40, ЭШП-60 и ЭШП-80. Число в обозначении типа обозначает массу выплавляемого слитка в тоннах (не более).

Другим важным параметром является форма сечения слитка. При одинаковой массе слитка печи производства слитков круглого, квадратного и прямоугольного сечений, трубных заготовок и фасонных отливок имеют различные параметры и конструктивные решения.

По количеству электродов, одновременно переплавляемых в один кристаллизатор, различают одно-, двух-, трех и многоэлектродные печи. Количество переплавляемых электродов и их сечение определяются условиями производства и электрической схемой переплава. При прочих равных условиях целесообразно стремиться к увеличению коэффициента заполнения кристаллизатора, представляющего собой отношение сечения переплавляемых электродов к сечению слитка, что позволяет уменьшить высоту печи. Коэффициент заполнения кристаллизатора для большинства промышленных печей составляет 0,2—0,64 и растет с увеличением массы слитка.



Одно- и двухэлектродные печи выполняются по однофазной схеме, а трех- и многоэлектродные — по трехфазной и трехфазной. Основные разновидности электрических схем ЭШП приведены на рис. 5.11.

Наибольшее распространение получили однофазные одноэлектродные печи (рис. 5.11, а). Трехфазные печи (рис. 5.11, б) отличаются лучшими энергетическими показателями по сравнению с однофазными одноэлектродными, но обладают меньшим коэффициентом заполнения кристаллизатора, в результате чего увеличивается длина электродов и, следовательно, высота печи.

Для получения слитков прямоугольного сечения предпочтительна двухэлектродная бифилярная печь (рис. 5.11, в). Преимуществом ее перед обычными однофазными являются более высокий (до 0,9) коэффициент мощности и меньший расход электроэнергии. Схема с последовательным подключением двух печей к одному трансформатору (рис. 5.11, г) позволяет выплавлять одновременно два слитка круглого или квадратного сечения. Она обеспечивает высокие технико-экономические показатели вследствие бифилярности электродов и короткой сети, сокращения протяженности токоведущих элементов и уменьшения потребной производственной площади.

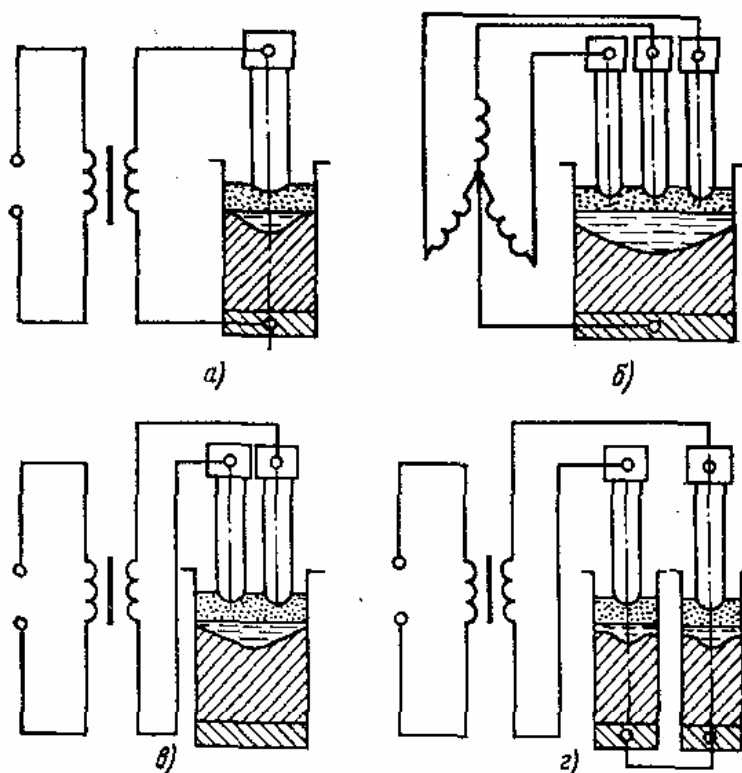


Рис. 5.11. Электрические схемы печей ЭШП.

- а- одноэлектродная однофазная; б — трехэлектродная трехфазная;  
 в — двухэлектродная однофазная с бифилярным токоподводом;  
 г — то же для получения двух слитков.

Существуют две модификации печей ЭШП. В соответствии с одной из них переплав осуществляется в неподвижном глухом кристаллизаторе. При другой схеме в процессе переплава осуществляется перемещение кристаллизатора относительно наплавляемого слитка или слитка относительно кристаллизатора. В отечественных конструкциях, как правило, применяется принцип перемещения кристаллизатора. Применение схемы ЭШП с коротким перемещающимся кристаллизатором облегчает задачу внешнего воздействия на шлаковую и металлическую ванны и слиток, в частности утепления донной части слитка для предотвращения трещин.

В настоящее время в соответствии с размерным рядом разработана новая серия печей электрошлакового переплава: ЭШП-2,5ВГ (рис. 5.12); ЭШП-5ВГ; ЭШП-ЮГ и ЭШП-20ВГ, предназначенных для производства заготовок сортового и листового проката (табл. 5.1).

Эти печи позволяют осуществлять переплав электродов как по обычной однофазной, так и по бифиляной схемам. Переплав производится в глухие неподвижные кристаллизаторы (индекс Г) или подвижные, перемещаемые в процессе плавки (индекс В). Общий вид печи ЭШП-10Г показан на рис. 5.13.

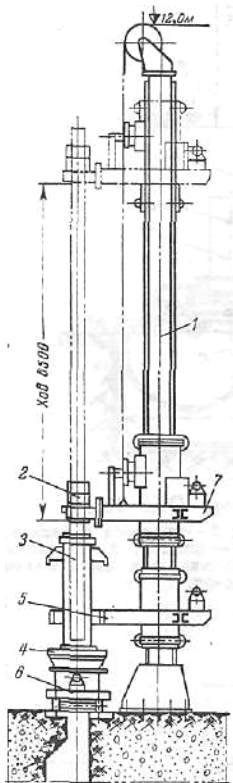


Рис. 5.12. Однофазная печь ОКБ-905.

1 — колонна; 2 — электрододержатель; 3 — электрододержателями;

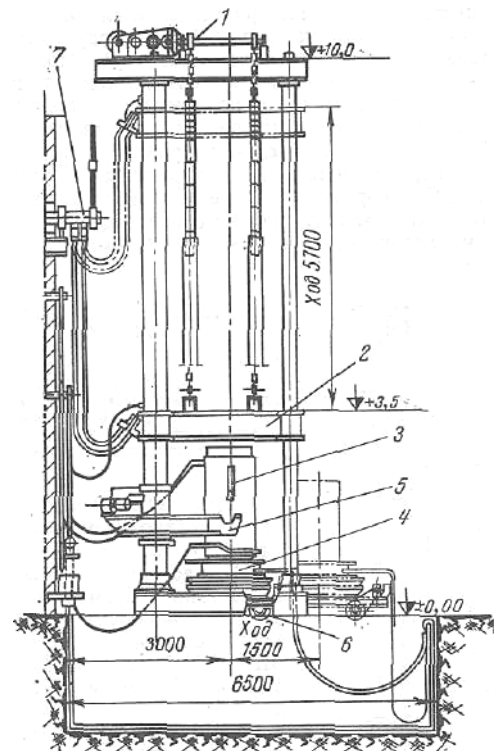


Рис. 5.13. Трехфазная печь ОКБ-906.

1 — механизм перемещения электродов; 2 — траверса с электрододержателями; 3 —

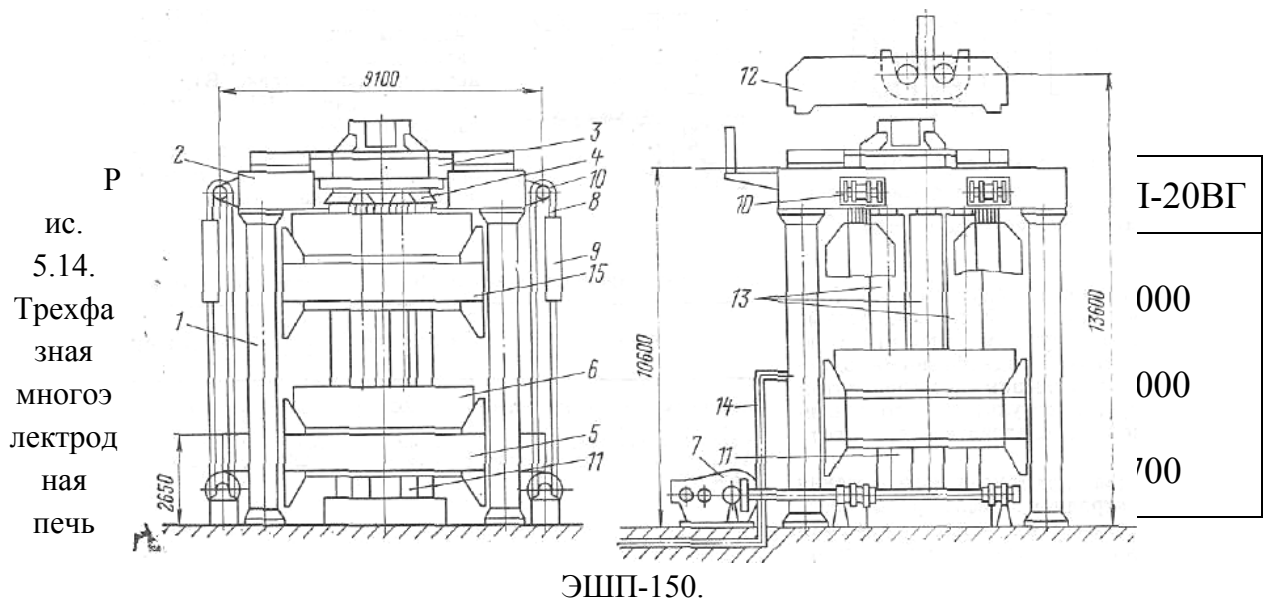
кристаллизатор; 4 — поддон;  
5 — механизм перемещения  
кристаллизатора; 6 — тележка для  
выкатывания слитка; 7 — механизм  
перемещения электрода.

кристаллизатор; 4 — поддон;  
5 — механизм перемещения  
кристаллизатора; 6 — тележка для  
выкатывания слитка;  
7 — токоподвод.

Таблица 5.1

### Основные параметры печей ЭШП для производства слитков

Для производства крупных кузнечных слитков массой до 200 т предназначена многоэлектродная трехфазная печь ЭШП-150 (рис. 5.14) конструкции ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР и ПО «Сибэлектротерм». Печь оснащена коротким перемещающимся кристаллизатором, расширяющимся в верхней части. Благодаря этому коэффициент заполнения кристаллизатора может быть близок к единице, что исключает необходимость перемещения электродов в процессе плавки. На печи одновременно переплавляется шесть-семь электродов.



1 — четырехколонный портал; 2 — неподвижная траверверса; 3 — съемная траверса; 4 — электрододержатели; 5 — подвижная траверса нижнем положении; 6 — кристаллизатор; 7 — привод перемещения подвижной траверсы; 8 — приводные цепи; 9 — контргруз; 10 — звездочки-ленивцы; 11 — поддон; 12 — грузоподъемное устройство на крюке крана перемещения съемной траверсы; 13 — расходоуемые электроды; 14 — система водоохлаждения; 15 — подвижная траверса (верхнее - положение).

#### **5.4 Бытовые электронагревательные приборы**

Преимущества электроприборов по сравнению с другими нагревательными приборами (газовыми, на твердом и жидком топливе) состоят в уменьшении доли тяжелого физического труда, значительном уменьшении затрат труда вообще в домашнем хозяйстве, ликвидации выделения вредных газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), обеспечении безопасности, в том числе пожаробезопасности, большой комфортности, сохранения чистого воздушного бассейна в городах и т.д.

Экономическая эффективность комплексной электрификации быта определяется в большей мере также и возможностью сокращения количества необходимых вводов энергии в дома до одного-двух (электроэнергии; электроэнергии и горячего водоснабжения).

Ввиду большой энергоемкости электроводонагревателей преимущественно выпускаются аккумуляционного типа. Они включаются («заряжаются») в часы «провала» графика нагрузки электросистем, а отдают горячую воду в остальное время суток.

Бытовые электронагревательные приборы — обширный класс приборов, насчитывающий большое количество типов и типоразмеров.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веселовский О.Н., Шнейберг Я.А. Энергетическая техника и ее развитие. М.: Высшая Школа, 1976. 304 с.: с ил.
2. Сарапулов Ф.Н. Введение в специальность «Электротехнологические установки и системы»: Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1997. 92 с.
3. Электротехнологические промышленные установки: Учебник для вузов / И.П.Евтюкова, Л.С.Кацевич, Н.М.Некрасова, А.Д.Свенчанский; Под ред. А.Д.Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1982.
4. Болотов А.В., Шепель Г.А. Электротехнологические установки: Учебник для вузов по специальности «Электроснабжение промпредприятий». М.: Высшая школа, 1988. 336 с.: ил.
5. Электротермическое оборудование: Справочник /Под общ. ред. А.П.Альтгаузена. М.: Энергия, 1980. 416 с. ил.
6. Кацевич Л.С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей: Учебник. М.: Энергия, 1977. 304 с.: ил.
7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. Для инженеров и студентов вузов. Изд. 3-е исправ. М.: Наука, 1965. 848 с. ил.
8. Гуцин С.Н., Агеев Н.Г., Крючков Ю.В. Теоретические основы энерготехнологических процессов цветной металлургии: Учебник для вузов /Науч. ред. Ю.Г.Ярошенко. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2000. 312 с. ил.
9. Электротехнический справочник. Т. 3. Кн. 2. Изд. 5-е, исправ. и доп. /Под общ. ред. проф. В.Г.Герасимова, П.Г.Грудинского, Л.А.Жукова и др. М.: Энергоиздат, 1982. 560 с.
10. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. М.: Металлургия, 1979. 247 с.
11. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов /А.Е.Слухоцкий, В.С.Немков, Н.А.Павлов, А.В.Бамунэр; Под ред А.Е.Слухоцкого. Л.: Энергоиздат, 1981. 328 с.
12. Альтгаузен А.П. Применение электронагрева и повышение его эффективности. М.: Энергоатомиздат, 1987. 128 с.
13. Основы металлургического производства. Учебник для средних профессиональных училищ. Изд-е 2-е, перераб. и доп. / В.К.Бабич, Н.Д.Лукашкин, А.С. Морозов и др. М.: Металлургия, 2000. 240 с.
14. Материаловедение и технология металлов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. Изд. 2-е, исправ. /М.Г.Фетисов, М.Г.Карпман, В.М.Митюнин и др. М.: Высшая школа, 2000. 638 с.: ил.
15. Основы теории теплогенерации: Учебник для вузов /М.Д.Казяев, С.Н.Гуцин, В.И.Лобанов и др. Екатеринбург: УГТУ, 1999. 285 с.

16. Сасса В.С. Футеровка индукционных плавильных печей и миксеров. М.: Энергоатомиздат, 1983. 120 с.: ил.
17. Сасса В.С. Футеровка индукционных электропечей. М.: Металлургия, 1989. 231 с.
18. Электрические промышленные печи. Учебник для вузов. В 2-х частях. Ч.1. А.Д.Свенчанский. Электрические печи сопротивления. Изд. 2-е, перераб. М.: Энергия, 1975. 384 с.
19. Электрические печи сопротивления и дуговые печи: Учебник для техникумов /М.Б.Гутман, Л.С.Кацевич, М.С.Лейканд и др., Под ред. М.Б.Гутмана. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
20. Общепромышленные электропечи непрерывного действия /А.В.Арендарчук, Н.М.Катель и др. М.: Энергия, 1977. 248 с.
21. Низкотемпературный электронагрев /А.П.Альтгаузен, М.Б.Гутман, С.А.Малышев и др.; Под общ. ред. А.Д.Свенчанского. изд. 2-е, перераб. И доп. М.: Энергия, 1978. 208 с.
22. Материалы для электротермических установок: Справочное пособие / Н.В.Большакова, К.С.Борисанова, В.И.Бурцев и др.; под ред. М.Б.Гутмана. М.: Энергоатомиздат. 1987. 296 с.
23. Арендарчук А.В., Бородачев А.С., Филиппов В.И. Общепромышленные электропечи периодического действия. М.: Энергоатомиздат, 1990. 112 с.
24. Липов В.Я., Ревзин В.А., Рубин Г.К. Конвейерные закалочнотпускные электропечи и агрегаты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 144 с.: ил.
25. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов /А.Д.Свенчанский, И.Т.Жердев, А.М.Кручинин и др.; Под ред. А.Д.Свенчанского. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.
26. Данцис Я.Б. Методы электрических расчетов руднотермических печей. Л.: Энергия, 1973. 184 с.
27. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей. Изд. Справ. /Я.Б.Данцис, Л.С.Кацевич, Г.М.Жилов и др. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Металлургия, 1987. 320 с.
28. Зворыкин Д.Б., Александрова А.Т., Байкальцев Б.П. Отражательные печи инфракрасного нагрева. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.
29. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи: Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Энергия, 1967. 416 с.: ил.
30. Фарбман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. Изд. доп. и перераб. М.: Металлургия, 1968. 496 с.
31. Электрооборудование и автоматика электротермических установок: Справочник /А.П.Альтгаузен, И.М.Бершицкий, М.Я.Смелянский и др.; под ред. А.П.Альтгаузена, М.Д.Бершицкого, М.Я.Смелянского, В.М.Эдемского. М.: Энергия, 1978. 304 с.

32. Цыганов В.А. Плавка цветных металлов в индукционных печах. М.: Metallurgy, 1974. 248 с.

33. Башенко В.В., Донской А.В., Соломахин И.М. Электроплавильные печи цветной металлургии. М.: Металлургия, 1971. 320 с.
34. Индукционные печи для плавки чугуна /Б.П.Платонов, А.Д.Акименко, С.М.Багуцкая и др. М.: Машиностроение, 1976. 176 с.
35. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1965. 848 с.
36. Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник. Изд. 3-е доп. и перераб. /А.П.Смирягин, Н.А.Смирягина, А.В.Белова. М.: Металлургия, 1974. 488 с.
37. Справочник по обработке цветных металлов и сплавов /Под ред. Л.Е.Миллера. М.: Государственное научно-техн. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1961. 872 с.
38. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности: Учебно-справочное руководство. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1988. 432 с.
39. Фарбман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные электропечи для плавки цветных металлов и сплавов. М.: ОНТИ, 1933.
40. Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Электрические печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1984. 232 с.
41. Брокмайер К. Индукционные плавильные печи /Пер. с нем. под ред. М.А. Шевцова и М.Я.Столова М.: Энергия, 1972. 304 с.
42. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник /В.П.Берзан, Б.Ю.Геликман, М.Н.Гураевский и др.; Под ред. Г.С.Кучинского. М.: Энергоатомиздат, 1987. 656 с.: ил.
43. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов /И.П.Копылов, Ф.А.Горяинов, Б.К.Клоков и др.; Под ред. И.П.Копылова. М.: Энергия, 1980. 496 с.