

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»

ЧИТАЛЬНИЙ ЗАЛ
НТБ ДонНТУ

K 48

ЭЛЕКТРО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

(конспект лекций)

НТБ ДонНТУ



K48

Донецк 2008

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

(КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ)
(для бакалавров дневной и заочной форм обучения
по направлению «Электротехника»)

ПЕРЕВІРЕНО
20 12 рік

Составитель: Муха В.П.

Утверждено
на заседании учебно-
издательского совета ДонНТУ
протокол № 3 от 5.03.2008 г.

ПЕРЕВІРЕНО
20 13 рік

Рассмотрено
на заседании методической
комиссии специальности
090603 – электротехнические
системы электропотребления
протокол № 3 от 19.11.2007 г.

Науково-технічна
бібліотека ДонНТУ

Донецк 2008

Электротехнологические установки (конспект лекций)/ Состав.:
В.П. Муха. – Донецк; Изд-во ДонНТУ, 2008. - 240 с.

Рассмотрены физические основы преобразования энергии в различных технологических процессах; описаны основные виды наиболее распространенных в промышленности электротехнологических установок, режимы их работы и влияние на систему электроснабжения промышленного предприятия; приведены основные требования техники безопасности при их эксплуатации.

Для бакалавров всех форм обучения по направлению 0906 «Электротехника»; может быть полезна специалистам, занимающимся проектированием и эксплуатацией систем электроснабжения электротехнологических установок промышленных предприятий.

Составитель Муха В.П., проф. каф. «Электроснабжения промышленных предприятий и городов» ДонНТУ.

Рецензент Носанов Н.И., проф. каф. «Электротехника и автоматика» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Художественный редактор Топчий В.А.

Технический редактор Топчий В.А.

В подготовке к изданию принимали участие студенты: Антоньев И.В., Афанасьева Ю.В., Дроздь А.В., Исаков С.А., Лазаренко А.А., Лютова С.С.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	7
1.1 Классификация электротехнологических установок	7
1.2 Теплопередача в электротермическом оборудовании	8
1.3 Материалы, применяемые в электропечестроении	12
2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ	17
2.1 Классификация электрических печей сопротивления	17
2.2 Электрические печи сопротивления периодического действия	18
2.3 Электрические печи сопротивления непрерывного действия	21
2.4 Тепловой расчет печей сопротивления периодического действия	26
2.5 Особенности теплового расчета печей непрерывного действия	29
2.6 Электрический расчет печей сопротивления	30
2.7 Электрооборудование печей сопротивления	35
2.8 Установки и печи прямого нагрева	39
2.9 Установки электроотопления и электрообогрева	42
3 ИНДУКЦИОННЫЙ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ.....	46
3.1 Физические основы индукционного нагрева.....	46
3.2 Классификация индукционных установок и области их применения	50
3.3 Индукционные плавильные печи.....	51
3.4 Индукционные нагревательные установки.....	56
3.5 Физические основы диэлектрического нагрева	61
3.6 Установки диэлектрического нагрева	63
3.7 Электрооборудование и схемы питания установок индукционного и диэлектрического нагрева	65
4 УСТАНОВКИ И ПЕЧИ ДУГОВОГО НАГРЕВА	76
4.1 Электрическая дуга	76
4.2 Дуговые сталеплавильные печи	83
4.3 Руднотермические печи	101
4.4 Вакуумные дуговые печи.....	107
4.5 Плазменные дуговые печи и установки	116
5 УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА.....	127
5.1 Технологический процесс электрошлакового переплава.....	127
5.2 Классификация электрошлаковых печей	129
5.3 Электрооборудование печей ЭШП.....	131
6 ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПЕЧИ И УСТАНОВКИ.....	134
6.1 Физико-технические основы электронного нагрева.....	134
6.2 Конструкция электронно-лучевых установок	137
6.3 Технологическое применение электронно-лучевого нагрева.....	140
6.4 Источники и схемы питания электронных плавильных установок	143

7 УСТАНОВКИ ИОННОГО НАГРЕВА	146
7.1 Установки для получения диффузионных слоев.....	146
7.2 Установки для нанесения покрытий	147
8 ЛАЗЕРНЫЕ УСТАНОВКИ.....	150
8.1 Физические основы работы лазера	150
8.2 Классификация лазеров и их характеристики	154
8.3 Типы и конструкция лазеров	156
8.4 Технологические применения лазеров	162
9 УСТАНОВКИ ДУГОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ	164
9.1 Классификация и область применения сварки	164
9.2 Сварочная дуга и требования к источникам её питания.....	164
9.3 Источники питания сварочной дуги постоянного тока	167
9.4 Источники питания сварочной дуги переменного тока.....	171
9.5 Автоматическая дуговая сварка	175
9.6 Специальные виды сварки	177
10 УСТАНОВКИ КОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРОСВАРКИ	188
10.1 Физические основы электрической контактной сварки	188
10.2 Стыковая сварка	189
10.3 Точечная сварка	191
10.4 Шовная (роликовая) сварка	193
10.5 Коммутационная аппаратура машин для контактной сварки	194
11 ЭЛЕКТРОЛИЗ	197
11.1 Процессы, протекающие при электролизе.....	197
11.2 Электролиз растворов и расплавов.....	200
11.3 Источники питания электролизных установок	202
12 МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	206
12.1 Электрохимические методы обработки материалов	206
12.2 Электрофизические методы обработки материалов	211
12.3 Установки магнитоимпульсной обработки металлов	218
12.4 Электромагнитные насосы	219
12.5 Электрогидравлическая (электровзрывная) обработка металлов	221
12.6 Ультразвуковая обработка материалов.....	222
13 УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ	228
13.1 Процессы, протекающие в установках электронно-ионной технологии	228
13.2 Установки электрогазоочистки.....	228
13.3 Установки для очистки воды	232
13.4 Установки для разделения суспензий	233
13.5 Установки электроокраски.....	234
ПРИЛОЖЕНИЕ А	236
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	238
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	239

ВВЕДЕНИЕ

Под *электротехнологией* понимают область электротехники, изучающую прямое использование энергии электрического тока, электрического или магнитного поля, подводимой непосредственно к технологическому объекту и преобразуемой в его рабочей зоне в другие виды энергии (тепловую, химическую, механическую и пр.), что собственно и обеспечивает реализацию заданного технологического процесса.

Электротехнология является одним из ведущих технологических направлений, обуславливающих и обеспечивающих научно-технический прогресс практически во всех отраслях народного хозяйства. Высококачественные стали, жароупорные материалы и сплавы, полупроводниковые материалы – все то, что определяет современную прогрессивную технику, может быть получено лишь посредством электротехнологического процесса. Вместе с тем с их внедрением облегчаются условия труда персонала, снижается загрязнение окружающей среды по сравнению с процессами, базирующимися на сжигании топлива.

Возникновение электротехнологии можно отнести к 1800 г., когда начались эксперименты с созданными в 1799 г. А. Вольта первыми электрохимическими генераторами, которые привели к открытию химического, теплового и магнитного действия электрического тока. В этом же году англичане А. Карлейль и У. Никольсон осуществили электролиз воды. В 1802 г. русский ученый академик В. В. Петров построил уникальную батарею из 2100 медно-цинковых элементов, ЭДС которой составляла около 1700В, а полезная мощность 60-85 Вт. Используя эту батарею, он открыл явление электрической дуги и обосновал возможность ее применения для плавки металлов, электроосвещения и восстановления металлов из окислов.

В 1807 г. профессор Московского университета Ф. Ф. Рейс открыл явление электроосмоса, получившее в наше время практическое применение (электродренаж). В том же году англичанин Х. Деви разработал электролитический способ получения щелочных металлов (калия, натрия, магния, кальция и других ранее неизвестных) в чистом виде, а в 1833-1836 гг. М. Фарадей разработал теорию и сформулировал законы электролиза.

В 1838 г. русский ученый академик Б. С. Якоби открыл явления гальванопластики, что позволило с помощью электролиза получать точные копии поверхности предметов и сразу же нашло применение в полиграфии и медальерном деле. Б. С. Якоби принадлежит также приоритет в разработке метода нанесения металлических покрытий на предметы - гальваностегии.

Все эти открытия привели к массовому возникновению гальванотехнических предприятий, как в России, так и за рубежом.

Эксперименты с первыми электрохимическими источниками тока привели также к ряду других открытий и возникновению таких отраслей электротехнологии, как электротермия, электрохимия. Для широкого распространения электротехнологических методов обработки получения новых материалов и интенсивного развития электроосвещения требовалось создание мощных и экономичных источников энергии.

Таким образом, достижения в области электротехнологии в значительной степени способствовали разрешению ряда теоретических и практических проблем в области электротехники, созданию электромашинных генераторов, совершенствованию энергетической техники.

Следующим этапом развития электротехнологии можно назвать период с 70-80-х годов XIX века, когда были созданы экономичные генераторы постоянного тока, а в 1889 г. М. О. Дюливо-Добровольский разработал синхронные генераторы трехфазного тока, которые вырабатывали достаточно дешевую электрическую энергию. Поэтому в конце XIX века начинают быстро развиваться такие энергоёмкие электротехнологические процессы, как производство алюминия (благодаря чему алюминий перестал быть драгоценным металлом), осваиваются методы полу-

чения карборунда и карбида кальция, который в больших количествах начал применяться для выработки ацетилен. Электротехнологические методы начинают применяться для выплавки высококачественных сталей.

В конце 60-х годов XIX в. были проведены опыты по использованию электрического тока для сварки металлов. Однако практическое решение этой проблемы принадлежит русскому изобретателю Н. Н. Бенардосу, который в 1886 г. предложил метод электродуговой сварки. Позднее, в 1891 г., явление электрической дуги было использовано русским инженером Н. Г. Славяновым для так называемой электрической отливки и электрического уплотнения металлических отливок. Им же был создан полуавтомат для регулирования длины дуги, который явился предшественником автоматических сварочных установок, была предложена шлаковая защита расплавленного металла от воздействия окружающей среды, применены присадки различных ферросплавов.

В конце XIX в. начинают широко применяться электродуговые печи для восстановления металлов из руд, развивается электрометаллургия, осваивается промышленное производство меди и цинка, проводятся опыты по использованию токов высокой частоты для выделения тепла непосредственно в обрабатываемом материале.

Большой вклад в теорию электротехнологических процессов и разработку электрооборудования внесли многие русские и советские ученые. Среди них следует отметить В. П. Ижевского, создавшего «русскую электрическую печь» для плавки цветных металлов, А. Н. Лодыгина, много и плодотворно работавшего в области электрометаллургии, М. С. Максименко – основателя рудной электротермии, В. П. Вологодина – создателя индукционной плавки металлов и индукционной поверхностной закалки, Е. О. Патона – основателя современных методов автоматической сварки и др.

В 1940 г. советский физик проф. В.А. Фабрикант теоретически обосновал возможность усиления света квантовой системой, которая находится в возбужденном состоянии, что послужило толчком в развитии лазерной техники.

В 1952 г. ученые трех стран одновременно (в Советском Союзе – Н.Г. Басов и А.М. Прохоров, в США – Ч.Таунс, Дж. Гордон и Х. Цайгер, в Канаде – Дж. Вебер) независимо друг от друга предложили принцип генерации и усиления сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний, основанный на использовании индуцированного излучения среды, что позволило создать усилители и генераторы сантиметрового и дециметрового диапазонов – *лазеры*.

В 1955-1957 гг. появились работы Н.Г. Басова, Б.М. Вула, Ю.М. Попова и А.М. Прохорова в СССР, а также американских ученых Ч. Таунса и А. Шавлова, в которых были приведены научные обоснования для создания квантовых генераторов оптического диапазона. Первый оптический квантовый генератор – *лазер* на рубиновом стержне был построен в 1960 г. американским физиком Т. Мейманом.

В 1960 г. под руководством американского ученого А. Джавана был построен газовый лазер, а в 1962 г. практически одновременно в СССР и США был создан полупроводниковый лазер.

Многие электротехнологические процессы весьма энергоемки. На их выполнение расходуется почти 30 % вырабатываемой электроэнергии. Однако они постоянно развиваются, совершенствуются и широко внедряются во все отрасли производства, сельское хозяйство, быт, медицину.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Классификация электротехнологических установок

Электротехнологическими установками называют электротехнологическое оборудование, используемое для проведения электротехнологических процессов в комплексе с сооружениями, приспособлениями и коммуникациями (электрическими, газовыми, водяными, транспортными и пр.), обеспечивающими его нормальное функционирование.

По характеру действия электрического тока или поля (тепловому, химическому, механическому) установки делят на следующие: электротермические; электрической сварки; электрофизической обработки; электрохимической обработки; электролизные; импульсной обработки давлением; ультразвуковые; электронно-ионной технологии.

Электротермические установки предназначены для тепловой обработки. В зависимости от способа преобразования электроэнергии в тепло и подвода его к нагреваемому материалу эти установки делят на следующие: сопротивления, дуговые, индукционные, диэлектрические, электронно-лучевые, ионные, плазменные, лазерные.

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

При дуговом нагреве материал нагревается за счет теплоты, поступающей в него из опорных пятен дуги, а также вследствие теплообмена с дугой и электродами.

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

Диэлектрический нагрев помещенных в высокочастотное электрическое поле непроводящих и полупроводящих материалов происходит за счет токов сквозной проводимости и смещения при поляризации.

При электронно- и ионнолучевом нагревах тепловая энергия выделяется при столкновении быстро движущихся электронов или ионов, ускоренных электрическим полем, с поверхностью нагреваемого объекта.

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

Лазерный нагрев происходит за счет нагрева поверхности объекта при поглощении им высококонцентрированных потоков световой энергии, полученных в лазерах – оптических квантовых генераторах.

Установки электрической сварки служат для сваривания металлических деталей с помощью электрического тока. В зависимости от способа преобразования электроэнергии и выделения тепла в зоне сварки их делят на следующие: ду-

говые, контактные, электрошлаковые, плазменные, электронно-лучевые, высокочастотные, лазерные.

Установки электрофизической обработки широко применяют для размерной обработки (придание телу необходимых размеров и формы с помощью съема материала резанием, фрезерованием, точением, прошиванием отверстий и т.п.) и обработки поверхности шлифованием, полированием, упрочнением. Установки электрофизической обработки работают на локализованном выделении тепла, которое приводит к оплавлению (испарению) микропорций материала с помощью искры, дугового разряда, контактного сопротивления, электронного или лазерного луча.

Установки электрохимической обработки применяют для размерной обработки, отделки поверхности и пр. В установках электрохимической обработки съем металла происходит при окислении (анодном растворении) материала анода.

Электролизные установки предназначены для электролитического производства химических продуктов (водорода, кислорода, тяжелой воды, хлора, щелочей), электрохимического синтеза органических и неорганических соединений, получения металлов электролизом растворов и расплавов солей, электролитических покрытий металлами и сплавами (гальваностегия), электролитического получения копий (гальванопластика).

Установки импульсной обработки давлением делят на магнитно-импульсные и электрогидравлические. В магнитно-импульсных установках энергия сильного импульсного магнитного поля преобразуется в механическую для формообразования малоэластичных, труднодеформируемых материалов, для вырубки и штамповки, и для выполнения многих сборочных операций. Электрогидравлические установки основаны на явлении гидравлического удара, возникающего при образовании в жидкости высоковольтного электрического разряда. Образуящаяся в зоне разряда высокое давление приводит к деформации или разрушению обрабатываемого материала (штамповка, дробление крупных материалов, очистка литья от формовочной земли и т.п.).

В **ультразвуковых установках** вещество обрабатывается путем воздействия на него в жидкости упругих колебаний звукового и ультразвукового диапазона частот. Преобразование энергии электромагнитного поля в упругие колебания жидкости осуществляется магнитострикционным или пьезоэлектрическим преобразователем.

Установки **электронно-ионной технологии** основаны на взаимодействии электрических полей и электрически заряженных, диспергированных веществ, а также особенностей движения этих веществ в электрическом поле.

1.2 Теплопередача в электротермическом оборудовании

Теплопередачей называется процесс распространения тепла, который может осуществляться посредством теплопроводности, конвекции и теплового излучения.

Теплопроводность – это передача теплоты внутри твердого тела или неподвижной жидкости (газа) при непосредственном соприкосновении частиц ве-

щества от областей с более высокой температурой к областям с более низкой температурой. На основании гипотезы Фурье тепловой поток Q (Вт) через однослойную плоскую стенку конечных размеров при установившемся режиме теплопередачи определяется по формуле:

$$Q = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{l} \cdot F; \quad (1.1)$$

где T_1 и T_2 - температура внутренней и наружной стенок, К;

l - толщина стенки, м;

F - площадь проводящей стенки, м²;

λ - коэффициент теплопроводности, зависящий от природы вещества, температуры, влажности и давления, Вт/(м·К).

Конвекция – передача теплоты вместе с движением частиц вещества; наблюдается в жидкостях и газах.

Различают естественную (свободную) конвекцию, обусловленную разностью плотностей вещества вследствие различных температур, и принудительную (вынужденную), создаваемую искусственным путем, - вентиляторами, насосами.

Практическая передача конвекцией неотделима от передачи теплоты теплопроводностью.

Знание конвективного теплообмена необходимо для расчета низкотемпературных электропечей и подсчета потери тепла от наружных стенок печи в окружающую среду.

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

$$Q = \alpha_{\text{кон}}(T_{\text{ст}} - T_{\text{г}})F_{\text{кон}}, \quad (1.2)$$

где $\alpha_{\text{кон}}$ - коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К);

$T_{\text{ст}}$ - температура стенки, К;

$T_{\text{г}}$ - температура окружающей среды (газа), К;

$F_{\text{кон}}$ - поверхность конвективного теплообмена, м².

Сложность расчета заключается в определении коэффициента теплоотдачи, который зависит от большого числа факторов: температур теплоотдающей и теплопринимающей сред $T_{\text{ст}}, T_{\text{г}}$; геометрических размеров и формы твердого тела $F_{\text{кон}}$, теплофизических свойств омывающей среды, коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c , вязкости ν и плотности γ , а также от скорости v и характера движения этой среды:

$$\alpha_{\text{кон}} = f(T_{\text{ст}}, T_{\text{г}}, F_{\text{кон}}, \lambda, c, \gamma, \nu, v). \quad (1.3)$$

Для подсчета этого коэффициента существует ряд эмпирических формул.

Тепловое излучение – передача энергии в виде электромагнитных волн с длиной волны от 0,4 до 40 мкм, распространяющихся со скоростью света. Диапа-

зон длин волн 0,4-0,8 мкм соответствует видимым (световым) лучам; длины волн 0,8-40 мкм имеют инфракрасное излучение.

Тепловое излучение свойственно всякому телу, имеющему температуру отличную от абсолютного нуля.

Энергия электромагнитных волн, встречая на своем пути твердые тела, частично поглощается ими, превращаясь в теплоту, частично отражается от них и частично пропускается через тело, если оно прозрачное. Большинство тел (материалов), применяемых в технике, непрозрачно для тепловых лучей; их пропускная способность равна нулю.

Основной закон теплового излучения – закон Стефана – Больцмана – определяет удельный поток лучистой энергии q , Вт/м², испускаемой во всем диапазоне длин волн от 0 до ∞ абсолютно черным телом, т.е. таким телом, для которого отражательная и пропускная способности равны нулю:

$$q = C_s (T/100)^4, \quad (1.4)$$

где $C_s = 5,7$ Вт/(м²·К⁴) – излучательная способность абсолютно черного тела;

T – температура абсолютно черного тела, К.

Для любого нечерного (“серого”) тела излучательная способность будет меньше; в общем случае она зависит от длины волны излучения.

Закон Стефана-Больцмана для “серого” тела имеет вид:

$$q = C(T/100)^4 = C_s \varepsilon (T/100)^4, \quad (1.5)$$

где $C = C_s \varepsilon$, а ε – коэффициент теплового излучения “серого” тела.

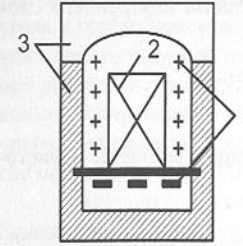
На основании этого закона может быть определена лучистая энергия, испускаемая телом по всем направлениям.

В чистом виде теплопроводность, конвекция и излучение встречаются редко. Чаще имеет место одновременное действие двух или всех трех видов передачи теплоты.

Рассмотрим в качестве примера теплообмен в камере электрической печи сопротивления (рис. 1.1), в которой тепло от нагревательных элементов 1 передается изделию 2 излучением, конвекцией и теплопроводностью. Вследствие низкого коэффициента теплопроводности газа количество тепла, передаваемого изделию с помощью теплопроводности, мало.

Внутри монолитного изделия тепло передается теплопроводностью, а внутри пористого тела – всеми тремя видами теплопередачи. Потеря тепла через футеровку 3 стен печи происходит за счет теплопроводности.

Мощность, расходуемая на покрытие тепловых потерь $P_{\text{пот.ст}}$, Вт, через плоскую однослойную стенку печи, имеющую однородную структуру, определяется по формуле:



1 - нагреватели; 2 - изделие;
3 - футеровка.

Рисунок 1.1 -

Электрическая печь
сопротивления

$$P_{\text{пот.ст}} = \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}}{1/(\alpha_{\text{вн}} F_{\text{вн}}) + S/(\lambda F_p) + 1/(\alpha_{\text{нар}} F_{\text{нар}})}, \quad (1.6)$$

где $T_{\text{вн}}, T_{\text{нар}}$ – температура внутри и снаружи печи, К;

S – толщина стенки, м;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К), выбираемый по средней температуре стенки;

F_p – расчетная поверхность стенки, м².

Расчетная поверхность равна среднему арифметическому из значений внутренней

$F_{\text{вн}} = F_1$ и наружной $F_{\text{нар}} = F_2$

поверхностей $F_p = (F_1 + F_2)/2$, если $F_2/F_1 < 2$, и среднему геометрическому $F_p = \sqrt{F_1 F_2}$, если $F_2/F_1 > 2$. В формуле (1.6) $\alpha_{\text{вн}}, \alpha_{\text{нар}}$ – коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м²·К), количественно выражающие одновременную передачу теплоты излучением и конвекцией с 1 м² поверхности в единицу времени при разности температур в 1°С: $\alpha_{\text{вн}} = \alpha_{\text{вн.изл}} + \alpha_{\text{вн.кон}}$ и $\alpha_{\text{нар}} = \alpha_{\text{нар.изл}} + \alpha_{\text{нар.кон}}$; определяются по справочнику.

Обычно кладка печи состоит из двух или трех разнородных слоев. Формула для определения тепловых потерь через стенки из n слоев $P_{\text{пот.ст}}$, Вт, имеет вид:

$$P_{\text{пот.ст}} = \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}}{1/(\alpha_{\text{вн}} F_{\text{вн}}) + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\lambda_i F_{pi}} + 1/(\alpha_{\text{нар}} F_{\text{нар}})}. \quad (1.7)$$

Здесь S_i, λ_i, F_{pi} – толщина, коэффициент теплопроводности, расчетная поверхность i -го слоя стенки, соответственно.

Потери через кладку печи определяются отдельно для стенок, отличающихся одна от другой по форме, материалом и толщиной слоев.

При работе печей имеют место тепловые потери через открытые проемы печи. Мощность $P_{\text{изл}}$, Вт, расходуемая на покрытие тепловых потерь через открытые проемы без учета конвективной передачи теплоты, определяется по формуле лучистого теплообмена:

$$P_{\text{изл}} = C_s \varepsilon_{\text{кл}} \psi \left[\left(\frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{нар}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{пр}}, \quad (1.8)$$

где $\epsilon_{\text{кл}}$ - коэффициент теплового излучения материала внутреннего слоя кладки (обычно $\epsilon_{\text{кл}} = 0,75 - 0,85$);

$T_{\text{вн}}$ и $T_{\text{нар}}$ - температуры внутри и снаружи печи, К;

$F_{\text{пр}}$ - площадь излучающего проема, м^2 ;

ψ - коэффициент диафрагмирования, учитывающий затенение лучисто-го потока стенками проема; находится по справочнику.

1.3 Материалы, применяемые в электропечах

При изготовлении электротермических установок (ЭТУ) применяется ряд специфических материалов, предназначенных для работы при высоких температурах. К ним относятся огнеупорные, теплоизоляционные, жароупорные и материалы нагревательных элементов.

1.3.1 Огнеупорные материалы применяются для изготовления внутренней части рабочей камеры печи, работающей в условиях высокотемпературного (выше 1500 К) нагрева. К ним предъявляются следующие требования:

1) огнеупорность, т.е. способность выдерживать без деформации и оплавления высокие температуры ($T_{\text{огн}} \geq 1800$ К). В зависимости от степени огнеупорности их подразделяют на три класса: огнеупорные (огнеупорностью 1800 – 2000 К); высокоогнеупорные (2000 – 2300 К включительно); высшей огнеупорности (выше 2300 К). Материалы с огнеупорностью ниже 1800 К называют теплоизоляционными. Обычно огнеупоры применяются при температуре, которая значительно ниже их огнеупорности;

2) механическая прочность при высоких температурах: огнеупорный слой кладки должен выдерживать массу загрузки, тары, транспортирующих устройств, на нем крепятся нагревательные элементы;

3) термическая устойчивость – способность материала выдерживать, не разрушаясь, резкие колебания температуры, которые приводят к термическим напряжениям, способным разрушить огнеупорный материал;

4) химическая нейтральность по отношению к нагреваемому материалу и внутренней кладки печи: огнеупорные материалы должны быть химически нейтральны, чтобы не засорять нагреваемую продукцию и не разрушаться ею путем химической эрозии;

5) малая электропроводность, теплопроводность и теплоемкость;

6) низкая стоимость, доступность и технологичность изготовления.

Наиболее полно изложенным требованиям удовлетворяют огнеупорные материалы, изготовленные на основе кремнезема SiO_2 (2000 К), глинозема Al_2O_3 (2300 К), оксида магния MgO (2600 К). Широко распространенными огнеупорами для электроплавильных печей являются: динас (2000 К), магнезит (2300 К), хромомagneзит, доломит и шамот (2000 К).

Для печей сопротивления основным огнеупорным материалом является *шамот*, представляющий собой хорошо обожженную огнеупорную глину. Высокотемпературные печи футеруют изнутри в основном высокоглиноземистыми ма-

териалами – *муллитом*, *алундомом*, а также *углем* и *графитом* (2800 К). Однако, уголь и графит окисляются, поэтому они применяются для вакуумных печей и печей с контролируемой инертной атмосферой, а также для кладки подин, закрытых при работе печи расплавленным металлом. Для выплавки тугоплавких металлов и сплавов применяются высококачественные и относительно дорогостоящие огнеупорные материалы – *диоксид циркония* ZrO_2 (температура плавления 2800 К), *оксид бериллия* BeO (2870 К), *диоксид тория* ThO_2 (3300 К) и др.

Огнеупорные материалы производят в виде порошков для изготовления набивной части кладки печи (подин и стен плавильных печей), тиглей, а также в виде кирпичей и фасонных изделий.

1.3.2 Теплоизоляционные материалы используются для уменьшения тепловых потерь печи. К ним предъявляются следующие требования:

- 1) малая теплопроводность и малая удельная теплоемкость;
- 2) достаточная огнеупорность и механическая прочность;
- 3) невысокая стоимость и доступность.

Требованию малой теплопроводности соответствуют сильно пористые материалы и рыхлые легкие массы или крупнозернистые порошки.

В качестве теплоизоляционных материалов нашли широкое применение диатомит, шлаковые и минеральные ваты, пеностекло, зонолит, а также материалы на основе асбеста.

Диатомит – осадочная горная порода; по химическому составу чистый кремнезем (SiO_2), используется для стен электропечей в виде насыпной изоляции. Рабочая температура до 1300 К.

Шлаковые и минеральные ваты – получают из топочных и доменных шлаков, а также из различных пустых пород путем расплавления их в печах до последующего распыления струи расплава сжатым воздухом или паром. Получаемый материал обладает хорошими теплоизолирующими свойствами. Рабочие температуры шлаковаты до 1100 К. В смеси с огнеупорной глиной и асбестом из шлаковых и минеральных ват изготавливают теплоизоляционные плиты с рабочей температурой до 800 К.

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

Пеностекло получается из расплавленного стекла добавкой в него газообразующих примесей. Полученные изделия из пеностекла обладают хорошо развитой пористостью и большой механической прочностью, максимальная рабочая температура 900 – 1000 К. Применяется пеностекло редко из-за высокой стоимости.

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

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

1.3.3 Жароупорные материалы – применяются в печах для изготовления деталей, которые подвергаются значительным механическим воздействиям в зоне высоких температур. Из этих материалов изготавливают подовые плиты, тиглы, крепления стен и свода, защитные устройства внутри печей, экраны, муфели, загрузочные устройства, детали транспортирующих устройств, служащих для перемещения в печах нагреваемых изделий и т. д.

К жароупорным материалам предъявляются следующие требования:

- 1) жаростойкость – устойчивость к окислению при высоких температурах;
- 2) жаропрочность – достаточная механическая прочность в пределах рабочих температур;
- 3) крипустойчивость – устойчивость к медленному нарастанию во времени при высоких температурах необратимых деформаций под нагрузкой;
- 4) хорошая обрабатываемость (прокатка, волочение, сварка, отливка);
- 5) невысокая стоимость и доступность.

Жароупорные материалы изготавливают из *железа* с добавкой к нему *хрома* и *алюминия* (для повышения огнеупорности) и *никеля* (для улучшения механических свойств).

Для слабо нагруженных деталей (муфели, защитные экраны, подовые плиты и др.) ограничиваются добавкой в железо одного хрома. При 20 % хрома огнеупорность сплава равна 1200 К, а при 30% – до 1400 К.

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

1.3.4 Материалы нагревательных элементов. Нагревательные элементы являются основным узлом конструкции печей сопротивления косвенного нагрева, определяющим надежность работы печи и во многом возможность соблюдения требуемого технологического режима.

Материалы для нагревательных элементов выбирают в соответствии с требуемой температурой и атмосферой печи. Эти материалы должны обладать жаростойкостью, достаточной жаропрочностью и обрабатываемостью. Кроме того, к ним предъявляют следующие специфические требования, вытекающие из особенностей их работы:

- 1) высокое удельное электрическое сопротивление (ρ). При малом удельном электрическом сопротивлении нагреватель, питаемый от сети 380 или 220В, получается чрезмерно большой длины и малого сечения;
- 2) малый температурный коэффициент электрического сопротивления (ТК_р). Если материал обладает значительным по величине ТК_р, то получается большая разница в электрическом сопротивлении холодного и горячего нагревателей, а, следовательно, и мощности, потребляемой печью из сети;

- 3) постоянство электрического сопротивления. Материал не должен подвергаться «старению» – увеличению сопротивления с течением времени. В результате «старения» нагревателей уменьшается мощность печи.

Нагревательные элементы печей сопротивления выполняют из сплавов металлов, некоторых неметаллических материалов и тугоплавких металлов.

Для изготовления нагревателей с рабочей температурой до 1500 К наиболее распространенными материалами являются *нихромы* (сплавы никеля и хрома), *фехралы* (хромоникелевые сплавы), а также *хромоникелевые жаропрочные стали*.

Нихромы содержат 75-78 % никеля и около 25 % хрома. Увеличение процентного содержания никеля в сплаве повышает его рабочую температуру, а добавка до 3 % титана повышает его механическую прочность.

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

Хромоникелевые жаропрочные стали содержат 22 – 27 % хрома и 17-20 % никеля, остальное – железо. Из них изготавливают нагревательные элементы с рабочей температурой до 1100 К.

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

Выполняемые из нихромов, фехралей и нержавеющей стали нагреватели могут быть открытыми или защищенными. Открытые нагревательные элементы применяются в печах и бытовых нагревательных приборах, они могут быть *проволочные зигзагообразные*, *проволочные спиральные* и *ленточные*.

Для нагрева жидкостей или газов при различных технологических процессах (получение сухого перегретого пара) служат *электронагреватели*, выполненные в виде цилиндра из *пористого металлокерамического* материала, что обеспечивает проникновение жидкости или газа сквозь его стенки и одновременно их нагрев.

Для обогрева поверхностей, сосудов, труб, панелей существуют нагревательные элементы, изготовленные из *полиэфирной смолы* с обеспечивающим электропроводность наполнителем. Электропроводность такого нагревателя составляет 0,01-2 См. Этот синтетический материал легко формуется, а также используется в виде гибких покрытий, пленок и т.д. Рабочая температура материала 400-500 К.

Для низкотемпературного нагрева широко применяются *трубчатые электронагреватели – ТЭНы*, представляющие собой металлическую трубку, заполненную теплопроводным изоляционным материалом, в котором находится электронагревательная спираль. Мощность ТЭНов составляет от 100 Вт до 15кВт, рабочее напряжение 36-380 В, рабочая температура 400-1000 К. Срок службы ТЭНов составляет 10-40 тыс.ч.

Для высокотемпературных печей с максимальной рабочей температурой до 1700 К применяются нагревательные элементы из *карборунда*. Карборунд – это карбид кремния SiC, получаемый спеканием кремнезема и угля при температуре 1900-2000 К. Эти нагреватели известны также под названием *силитовых* или *глобаровых*. Их изготавливают в виде стержней диаметром 6-30мм различной длины.

Удельное электрическое сопротивление карборунда в сотни раз больше никрома. Карборундовые стержни подвержены электрическому старению, т.е. сопротивление их с течением времени меняется, поэтому электропечи с карборундовыми нагревателями питают через автотрансформаторы.

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

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

При изготовлении нагревательных элементов из тугоплавких материалов применяют *молибден, тантал, вольфрам, ниобий* в виде проволоки, ленты, стержней и листов различных сечений. Все эти материалы (кроме тантала) легко окисляются кислородом воздуха, поэтому высокотемпературные печи должны быть вакуумные.

Графитовые электронагреватели применяются в установках с рабочей температурой 1800-2700 К. Однако их применение ограничивается в связи с тем, что они интенсивно окисляются на воздухе, начиная с температуры 800 К.

Вопросы для самопроверки

1. Как классифицируются электротехнологические установки?
2. Какие виды теплопередачи имеют место в электротехнологических установках и их сущность?
3. Какие материалы применяются в качестве огнеупорных и предъявляемые к ним требования?
4. Какие материалы применяются в качестве теплоизоляционных и предъявляемые к ним требования?
5. Какие материалы применяются в качестве жароупорных и предъявляемые к ним требования?
6. Какие материалы применяются для изготовления нагревателей печей косвенного нагрева и требования, предъявляемые к ним.

2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

2.1 Классификация электрических печей сопротивления

Наиболее распространенным видом электрических печей являются электропечи сопротивления (ЭПС), т.е. печи, в которых электрическая энергия превращается в теплоту в твердых или жидких телах при протекании через них тока.

Электрические печи сопротивления классифицируются по различным признакам:

1) *по принципу действия* – делятся на ЭПС косвенного и прямого действия. В ЭПС *косвенного действия* электрический ток протекает по нагреваемым элементам, выделяя в них теплоту, передающуюся нагреваемым изделиям излучением, конвекцией и теплопроводностью. В ЭПС *прямого действия* нагреваемое тело включается непосредственно в электрическую цепь, благодаря чему в нем выделяется тепло. В вакуумных печах теплопередача осуществляется только излучением;

2) *по роду работы* – делятся на ЭПС *периодического* и *непрерывного* действия. В ЭПС периодического (садового) действия изделия загружаются в рабочее пространство и нагреваются в нем, не перемещаясь. В ЭПС непрерывного (методического) действия изделия загружаются в печь и в процессе нагрева или охлаждения перемещаются от места загрузки к месту выгрузки;

3) *по рабочей температуре* ЭПС делятся на *низкотемпературные* (900-1000К), *среднетемпературные* (1000-1600 К) и *высокотемпературные* (выше 1600);

4) *по виду среды* в рабочем пространстве ЭПС делятся на печи с *окислительной* (воздушной) атмосферой, *контролируемой* и *вакуумные*. В печах с контролируемой атмосферой применяются инертные газы, а также специальные газовые смеси, назначение которых – термохимическая обработка поверхности изделий – азотирование, цементация и нитроцементация, проводимые с целью повышения поверхностной прочности и износостойчивости деталей;

5) *по уровню остаточного давления* ЭПС делятся на *низковакуумные* (выше 10Па), *средневакуумные* (10^{-2} Па), *высоковакуумные* (10^{-3} - 10^{-5} Па), *сверхвысоковакуумные* (ниже 10^{-5} Па);

6) *по назначению* ЭПС делятся на *плавильные* и *нагревательные*. Плавильные печи применяют для плавки цветных металлов и сплавов, а нагревательные – для термической обработки металла, стекла, керамики и т.д.

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

Обозначение ЭПС состоит из дроби; числитель дроби имеет три буквы: первая определяет способ нагрева: С - нагрев сопротивлением; вторая - тип ЭПС по основному конструктивному параметру: Н - камерная, Ш - шахтная, Г - колпаковая, Д - камерная с выдвижным подом, Э - элеваторная, К - конвейерная, Т -

толкательная, Р - рольганговая, А - карусельная, Ю - с шагающим подом, И - пульсирующим подом, Б - барабанная, П - протяжная и Л - туннельная. Третья буква определяет характер среды в рабочем пространстве ЭПС: О - окислительная (воздушная, кислород), З - защитная (эндогаз, экзогаз и т.д.), Ц - цементационная, Н - водородная, А - азотирующая, В - вакуум. После букв следует три числовых значения, определяющие размеры рабочего пространства печи в дециметрах (ширина, длина, высота). Знаменатель дроби определяет номинальную температуру печи в сотнях градусов Цельсия.

Например, СНО - 5.8.3/13 - камерная электропечь сопротивления с окислительной атмосферой с размерами рабочего пространства: шириной - 0,5 м, длиной - 0,8 м, высотой - 0,3 м и номинальной температурой - 1300 °С; СКЗ - 10.40.1/9 - конвейерная электропечь сопротивления с защитной атмосферой с размерами рабочего пространства: шириной - 1 м, длиной - 4 м, высотой - 0.1 м и номинальной температурой - 900 °С.

2.2 Электрические печи сопротивления периодического действия

Печи периодического действия разнообразны по конструкциям. Их применяют в индивидуальном или в мелкосерийном производстве. Из них наиболее широко распространены колпаковые, элеваторные, камерные, шахтные, печи с выдвижным подом и термические электропечи - ванны.

Колпаковые электропечи (рис. 2.1, а) предназначены для термообработки стали и цветных металлов в виде листов, ленты в рулонах, проволоки, прутков, труб. Они просты и надежны в эксплуатации.

Колпаковая печь состоит из колпака и неподвижного стенда. Нагреваемые детали (садка) 5 с помощью подъемно-транспортных устройств помещаются на футерованный стенд 1. Поверх них сначала устанавливается жаропрочный колпак-муфель 3, а затем основной колпак 2 камеры печи, выполненной из металлического каркаса с огнеупорной футеровкой. Нагревательные элементы 4 расположены по боковым стенкам колпака и в кладке стенда. Питание нагревательных элементов осуществляется с помощью гибких кабелей и штепсельных разъемов.

При отжиге требуется длительное охлаждение изделий под муфелем, поэтому одним колпаком можно обслуживать несколько стендов, перенося колпак с одного стенда на другой мостовым краном.

Мощность колпаковых ЭПС достигает нескольких сотен киловатт, а вес загрузки - до 100 т. Благодаря тому, что колпак и муфель могут быть герметизированы, нагрев и остывание садки можно проводить в защитной атмосфере.

К недостаткам колпаковых ЭПС можно отнести следующее: для них необходимы цехи большой высоты и краны большой грузоподъемности; в каждом цикле нагрева, при переносе колпака от одного стенда на другой, в среднем теряется около 15% всей аккумулированной печью теплоты; очень трудно также обеспечить равномерность нагрева загрузки.

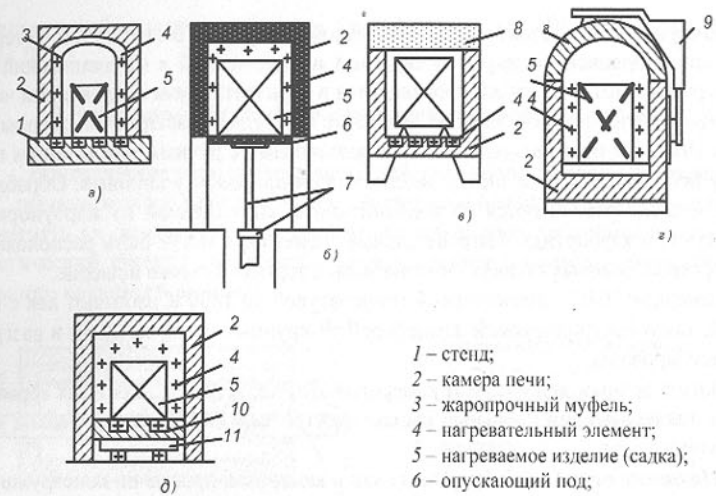


Рисунок 2.1 – Печи сопротивления периодического действия:

а - колпаковая; б - элеваторная;

в - камерная; г - шахтная;

д - с выдвижным подом.

- 1 – стенд;
- 2 – камера печи;
- 3 – жаропрочный муфель;
- 4 – нагревательный элемент;
- 5 – нагреваемое изделие (садка);
- 6 – опускающий под;
- 7 – подъемное устройство;
- 8 – свод;
- 9 – механизм подъема свода;
- 10 – подовая плита;
- 11 – выдвижная тележка.

Элеваторные печи (рис.2.1,б) служат для отжига, эмалирования, цементации, обжига керамических изделий, спекания и металлизации деталей. Элеваторная печь состоит из открытой снизу неподвижной камеры нагрева 2 и опускающегося пода 6. Она представляет собой цилиндрическую или прямоугольную камеру, установленную на колоннах на высоте 3-4 м над уровнем пола цеха.

Под печи поднимается и опускается гидравлическим или электромеханическим подъемником, который установлен под камерой нагрева. Нагреваемые изделия - садку 5 нагружают на тележку, затем с помощью лебедки продвигают под печь и поднимают подъемником 7, вдвигая в камеру. По окончании технологического процесса под опускается и изделие снимается. В низкотемпературных печах нагреватели 4 расположены на стенках, а в высокотемпературных - на стенках и в поду.

Электропитание в малых элеваторных печах осуществляется гибкими кабелями, в крупных - при помощи разъемных контактов. Печи комплектуются многоступенчатыми трансформаторами.

Мощность потерь холостого хода и потери на аккумулированную футеровкой теплоту в этих ЭПС близки к потерям в колпаковых. Недостатком элеваторных печей является их конструктивная сложность и требование большой высоты цеха.

Промышленность выпускает элеваторные электропечи на 700, 1000 и 1500 К мощностью до 1000 кВт и массой загрузки до 30 т.

Камерные печи (рис.2.1,в) являются простейшими по конструкции и вместе с тем наиболее универсальными. Они предназначены для термической обработки металлов при индивидуальном и серийном производстве.

Камерная печь состоит из прямоугольной камеры 2 с огнеупорной футеровкой и теплоизоляцией, перекрытой сводом 8 и помещенной в металлический кожух. Загрузка и выгрузка садки производится в горизонтальном направлении через закрываемое футерованной дверцей отверстие в передней части печи. Дверцы камерных ЭПС, как правило, выполняются подъемными с ручным или ножным приводом у небольших ЭПС и электромеханическим приводом у крупных. Обрабатываемые изделия размещаются на подовой плите, выполненной из жароупорного материала или карборунда. Нагревательные элементы 4 могут быть расположены на полу, своде, боковых стенках, реже на задней торцевой стенке и дверце.

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

Определенным недостатком камерных ЭПС является трудность их герметизации, а также высокий удельный расход электроэнергии и высокий расход контролируемого газа.

Шахтные печи (рис.2.1,з), также как и камерные, просты по конструкции и достаточно универсальны. Они применяются в мелкосерийном производстве для различных видов термообработки длинномерных, крупногабаритных или мелких изделий в специальных корзинах. Рабочее пространство шахтных ЭПС представляет собой открытую сверху шахту 2 с круглым, квадратным или прямоугольным сечением. Сверху шахта закрывается крышкой 8. Подъем и поворот крышки в сторону производится с помощью гидро- или пневматического механизма 9. Нагреватели 4 в этих ЭПС обычно размещаются на боковых стенках, реже на дне электропечи.

Нагреваемые изделия 5 загружают и выгружают через отверстие сверху шахты. Изделия помещают в специальную жароупорную корзину, которую загружают в рабочее пространство ЭПС; длинномерные изделия подвешивают в вертикальном положении непосредственно в ЭПС на приспособлениях. Загрузку и выгрузку тяжелых изделий можно осуществлять мостовым краном, тельфером и т.д. Шахтные ЭПС обычно заглубляются в землю, что облегчает их обслуживание, герметизацию и способствует снижению тепловых потерь.

Электропечи с выдвижным подом (рис. 2.1,д) являются механизированной модификацией камерных печей. Они применяются в единичном и мелкосерийном производстве для термообработки сравнительно крупных изделий (заготовок больших шестерен, валов, корпусов, рулонов металлической ленты и др.).

Печь состоит из стационарной камеры нагрева 2, выдвижного пода 10 и механизма перемещения пода 11. Выдвижной под с передней стенкой и установленной на нем загрузкой перемещается по рельсам в камеру и обратно с помощью электромеханического привода. Нагреватели 4 могут располагаться на боковых стенках и своде камеры, на выкатном полу и на дверце. Питание нагревателей осуществляется через понижающие трансформаторы; нагреватели пода включаются посредством контактного разъемного устройства при установке выкатной тележки в рабочее положение.

Печи с выдвижным подом выпускаются серийно на температуры 700, 1000, 1500 К, а также для индивидуальных технологических процессов. Мощность

крупных печей с выдвижным подом достигает 3 - 5 тыс. кВт в единице, а вес садки до 10 т.

2.3 Электрические печи сопротивления непрерывного действия

Электрические печи непрерывного действия (методические) по сравнению с ЭПС периодического действия имеют значительно большую производительность. Применять их целесообразно в тех случаях, когда имеется установившийся технологический процесс термообработки и требуется произвести термообработку большого количества изделий.

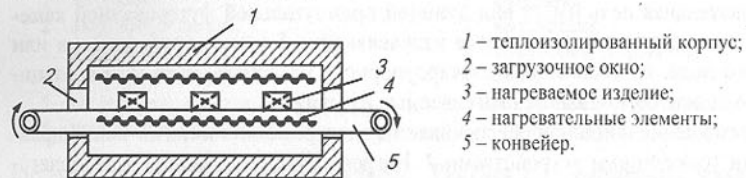


Рисунок 2.2 - Схема конвейерной электропечи

Электропечи непрерывного действия, как правило, имеют несколько тепловых зон с самостоятельным регулированием температуры, что дает возможность создавать температурные режимы.

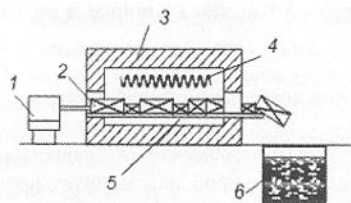
Конструкции ЭПС непрерывного действия различаются в основном механизмами перемещения изделий в рабочем пространстве печи.

Конвейерные электропечи (рис.2.2) 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.

Конвейерная печь представляет собой прямоугольную футерованную камеру 1, изделия 3 внутри которой перемещаются на конвейерной ленте 5. Нагревательные элементы 4 чаще всего размещаются на своде или в полу под верхней частью ленты конвейера, реже на боковых стенках.

Конвейер размещается целиком в камере печи и не остывает. При этом валы конвейера находятся в очень тяжелых условиях и требуют водяного охлаждения. Поэтому часто концы конвейера выносятся за пределы печи. В этом случае значительно облегчаются условия работы валов, но возрастают потери теплоты в связи с остыванием конвейера у погрузочных и разгрузочных концов. Конвейерные ЭПС применяются в основном до температур 1200 К, хотя имеются ЭПС, работающие при 1500 К. Мощность выпускаемых промышленностью конвейерных ЭПС может превышать 1000 кВт. При работе этих ЭПС с контролируемой атмосферой они комплектуются охладительными устройствами или закалочным баком.

Толкательные электропечи (рис.2.3) применяются для отжига, нормализации, цементации и закалки как мелких, так и крупных стальных изделий, а также для термической обработки изделий из цветных металлов и чугуна.



- 1 - толкатель;
- 2 - закаливаемый материал;
- 3 - футеровка;
- 4 - нагреватели;
- 5 - направляющие;
- 6 - закалочный бак.

Рисунок 2.3 – Толкательная закалочная электропечь

Толкательная печь имеет вид длинной прямоугольной футерованной камеры 3. На поду печи устанавливаются направляющие 5 в виде труб, рельсов или роликового пода, изготовленных из жароупорного материала, и по ним в специальных поддонах перемещаются нагреваемые изделия 2.

Перемещение поддонов обеспечивается электромеханическими или гидравлическими толкающими устройствами 1. Нагревательные элементы 4 располагают на своде и на стенах печи.

Основное преимущество толкательных ЭПС перед другими типами - их относительная простота, отсутствие сложных деталей из жароупорных материалов. Их недостатки - наличие поддонов, применение которых ведет к увеличению тепловых потерь и к повышенному расходу электроэнергии, ограниченный срок службы поддонов.

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

Толкательные печи могут работать также с контролируемой атмосферой.

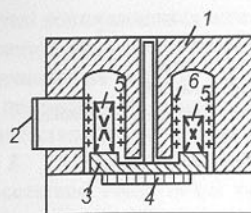
Разновидностью толкательных печей являются *ручьевые* печи, в которых перемещение сравнительно небольших изделий правильной формы осуществляется по узким лоткам - ручьям в несколько рядов по ширине рабочей камеры печи. В каждом ручье проталкивание изделий осуществляется автономно - своим толкателем. Ручьевые печи, в частности, используются в автоматической линии производства подшипников качения для закалки колес.

Карусельные электропечи (рис.2.4) используются для низкотемпературного отпуска (до 500 К) стальных изделий, для закалки (до 1100 К) мелких стальных изделий, для нагрева перед штамповкой (до 1500 К) и для нагрева (до 1600 К) под прокатку в металлургии.

Карусельные печи имеют круглый вращающийся под 3, на котором через загрузочную дверцу 2 кладутся изделия. Изделия 5 вращаются вместе с подом.

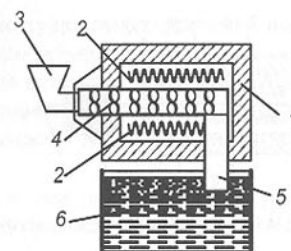
Процесс нагрева производится примерно за один оборот печи. Обработанные изделия выгружаются через разгрузочную дверцу, находящуюся рядом с загрузочной.

Механизм вращения 4 пода карусельной печи находится под печью вне зоны высоких температур. Внутри печи (кроме нагревательных элементов 6) нет жароупорных деталей, что позволяет повысить рабочую температуру печи до 1700 К. Карусельные ЭПС могут работать и с контролируемой атмосферой. Недостатком является сложность механизации загрузки и выгрузки изделий.



- 1 - футеровка;
- 2 - загрузочная дверца;
- 3 - вращающийся под;
- 4 - механизм вращения;
- 5 - нагреваемые изделия;
- 6 - нагреватели.

Рисунок 2.4 – Карусельная электропечь



- 1 - футеровка;
- 2 - нагреватели;
- 3 - загрузочное устройство;
- 4 - шнек;
- 5 - разгрузочное устройство;
- 6 - закалочный бак.

Рисунок 2.5 – Барабанная закалочная электропечь

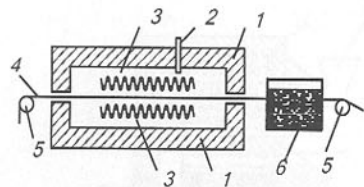
Барабанные электропечи (рис.2.5) предназначены для закалки мелких стальных изделий, имеющих округлую до 80 мм диаметром, без острых кромок форму (ролики, шарики, мелкие кольца и т.п.), а также для нагрева порошкообразных материалов. Перемещение нагреваемых изделий или порошка через электропечь осуществляется во вращающемся барабане - муфеле из жаропрочной стали. Барабан имеет внутри ребра, образующие винтовую полость 4, по которой изделия при вращении барабана перемещаются от загрузочного устройства 3 к разгрузочному. Непосредственно под камерой печи размещен закалочный бак 6, в который падают из разгрузочного лотка 5 закаливаемые детали.

Промышленность выпускает барабанные ЭПС для термической и химико-термической обработки деталей, а также для нагрева сыпучих материалов до температуры от 500 до 1300 К, мощностью от 10 до 500 кВт, диаметром рабочего пространства от 400 до 1600 мм и длиной муфеля от 1,2 до 10 м.

Протяжные электропечи (рис.2.6) предназначены для нагрева проволоки, ленты, тонкого листа, тонкостенных труб большой длины, а также для сушки и полимеризации лаков или пластмасс. Она представляет собой муфель 1 с нагревателями 3, через который пропускается нагреваемое изделие 4.

Печи с рабочей температурой до 1500 К оборудованы металлическими футерованными муфелями, а при более высокой температуре - керамическими.

Печи с температурой 1600 К оборудованы многоканальным алундовым муфелем, поверх которого намотан молибденовый нагреватель. Перемещение изделий в печи осуществляется протяжкой от специальных протяжных или намоточных устройств, находящихся перед загрузочным и за разгрузочным проемами печи.

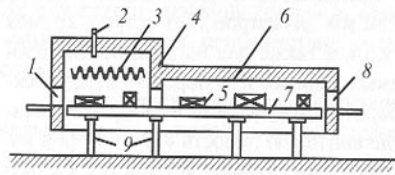


- 1 – футеровка;
- 2 – термопара;
- 3 – нагреватели;
- 4 – закаливаемая проволока;
- 5 – барабан;
- 6 – закалочная ванна.

Рисунок 2.6 – Протяжная электропечь для закалки проволоки

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.

Электропечи с шагающим подом (рис.2.7) применяются для нагрева изделий сложной конфигурации, которые невозможно транспортировать в других ЭПС непрерывного действия (например, трубы с фланцами); для нагрева достаточно длинных изделий до температуры 1500-1600 К; для нагрева достаточно длинных изделий в тех случаях, когда требуется располагать их в рабочем пространстве поперек ЭПС.



- 1 – загрузочное окно; 2 – термопара;
- 3 – нагреватели; 4 – футеровка;
- 5 – нагреваемые изделия;
- 6 – камера охлаждения;
- 7 – шагающая балка;
- 8 – разгрузочное окно;
- 9 – гидропривод балки.

Рисунок 2.7 – Электропечь с шагающим подом

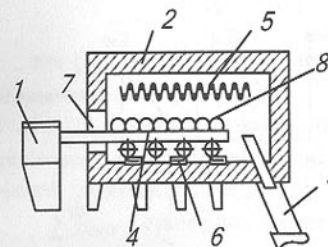
Перемещение изделий 5 в таких печах производится посредством футерованной балки 7, проходящей вдоль всей длины пода печи. Балка при помощи гидравлического или электромеханического привода 9 поднимается вверх, снимая загрузку с неподвижной части пода и, перемещаясь вперед, несет изделия в сторону разгрузочного окна 8. Затем балка, опускаясь вниз, устанавливает изделия на неподвижный под (но уже в другом месте - ближе к разгрузочному окну), а сама, опустившись ниже, возвращается в исходное положение. Преимущество такой печи в том, что внутри ее нет жароупорных деталей и предельная температура нагрева определяется материалом нагревательных элементов.

К недостаткам ЭПС с шагающим подом относятся сравнительно большая неравномерность температуры в рабочем пространстве печи, трудность герметизации из-за наличия продольных щелей между подвижными балками и неподвижными частями пода печи, а также недостаточная надежность в эксплуатации механизма шагающего пода.

Электропечи с пульсирующим подом (рис.2.8) применяются для термообработки мелких изделий под закалку (до 1200 К); для отжига и высокотемпературного отпуска (до 1000 К). Эти печи легко встраиваются в автоматические и точные линии. Перемещение изделий 8 в ЭПС с пульсирующим подом осуществ-

ляется путем повторяющихся возвратно-поступательных движений подовой плиты 4 - плавного медленного вперед с резким остановом и быстрого - назад. Изделия находящиеся на поду, во время резкой остановки и движения назад пода по инерции перемещаются вперед. Возвратно-поступательное движение подовой плиты осуществляется механизмом кулачкового типа с пружинами или пневмоприводом 1.

Недостатком таких печей является низкая рабочая температура и относительно небольшая производительность, определяемая длиной подовой плиты.



- 1 – механизм пульсации;
- 2 – футеровка;
- 3 – разгрузочный поток;
- 4 – подовая плита;
- 5,6 – нагреватели;
- 7 – загрузочное окно;
- 8 – нагреваемое изделие.

Рисунок 2.8 – Печь сопротивления с пульсирующим подом

Туннельные электропечи (рис.2.9) применяются в основном в огнеупорной промышленности для обжига керамики до 1600 К, хотя в отдельных случаях используются для сушки сварочных электродов при температуре до 600 К.

Главным преимуществом туннельных ЭПС 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.

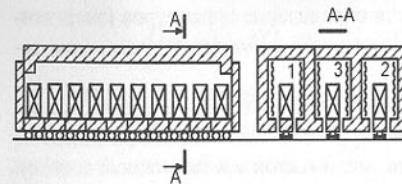


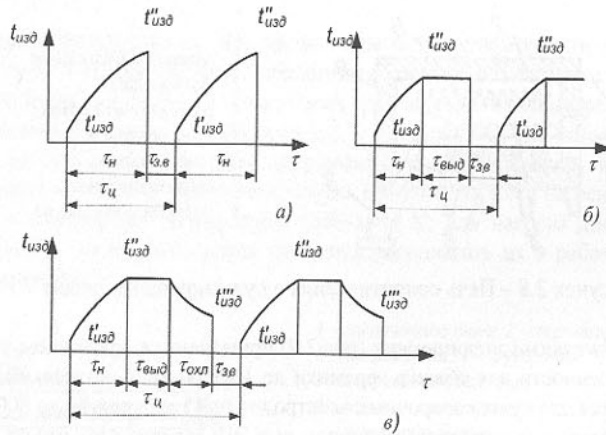
Рисунок 2.9 – Схема туннельной печи

Недостатком туннельных 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.

2.4 Тепловой расчет печей сопротивления периодического действия

Количество энергии, потребляемой из сети, и установленная мощность печи зависят, прежде всего, от температурного режима обработки, заданного технологическим процессом, т.е. цикла работы печи. Наиболее широко применяемые в практике циклы термической обработки металлов и неметаллических материалов показаны на рис. 2.10.



а – нагрев без выдержки; *б* – нагрев с выдержкой; *в* – нагрев с выдержкой и последующим охлаждением.

Рисунок 2.10 – Циклы работы печи

Целью теплового расчета печи является определение параметров (энергетических, тепловых, геометрических), при которых обеспечивается проведение заданного технологического процесса.

Цикл (рис. 2.10,*а*) характерен для нагрева без выдержки времени тонкостенных изделий из черных металлов или материалов с высоким коэффициентом теплопроводности (алюминия и его сплавов, меди и сплавов на медной основе). Наиболее часто этот цикл встречается в печах для нагрева заготовок под горячую деформацию цветных металлов или для закалки тонкостенных изделий.

Цикл (рис. 2.10,*б*) – наиболее распространенный. Он предусматривает выдержку изделий при определенной температуре с целью выравнивания температуры по сечению изделия и обеспечения необходимых превращений в его материале. Этот цикл характерен для процессов закалки, отпуска, нормализации и термохимической обработки металлов.

Цикл (рис. 2.10,*в*) имеет место в печах для отжига металлов, керамики, спекания металлокерамических изделий, получения монокристаллов и в других случаях, когда по технологии процесса требуются медленное охлаждение и выдача изделий из печи после охлаждения при определенной температуре. При таком цикле работы в печах периодического действия имеют место большие потери те-

плоты, аккумулированной кладкой в период нагрева и выдержки. Вследствие этого КПД печи низок, а удельный расход электроэнергии велик.

В печах непрерывного действия охлаждение изделий осуществляется вне печи в специальной камере охлаждения, при этом КПД печи и расход электроэнергии не зависят от времени охлаждения.

В общем случае для цикла работы садовой печи с охлаждением (рис.2.11,*в*) расход теплоты за цикл составит:

$$Q_{\text{ц}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + \sum Q_{\text{пот}}, \quad (2.1)$$

где $Q_{\text{пол}}$ – количество теплоты, необходимое для нагрева загрузки до заданной конечной температуры, Дж;

$Q_{\text{всп}}$ – количество теплоты, необходимое для нагрева вспомогательных жароупорных устройств, входящих вместе с загрузкой в печь (корзин, поддонов, муфель, подвесок) и газа, Дж;

$\sum Q_{\text{пот}}$ – суммарные тепловые потери печи за цикл, Дж.

Полезная теплота $Q_{\text{пол}}$, Дж, на нагрев изделий определяется по формуле:

$$Q_{\text{пол}} = c_{\text{изд}} \cdot G_{\text{изд}} \cdot (t_{\text{изд}}'' - t_{\text{изд}}'), \quad (2.2)$$

где $c_{\text{изд}}$ – средняя удельная теплоемкость материала загрузки, Дж/(кг·°C);

$G_{\text{изд}}$ – масса загрузки, кг;

$t_{\text{изд}}''$ и $t_{\text{изд}}'$ – конечная и начальная температура изделий, °C.

Аналогично определяется $Q_{\text{всп}}$, Дж:

$$Q_{\text{всп}} = Q_{\text{ж}} + Q_{\text{г}} = c_{\text{ж}} \cdot G_{\text{ж}} \cdot (t_{\text{ж}}'' - t_{\text{ж}}') + c_{\text{г}} \cdot G_{\text{г}} \cdot (t_{\text{г}}'' - t_{\text{г}}') \quad (2.3)$$

где $c_{\text{ж}}$, $c_{\text{г}}$ – удельные теплоемкости жароупорного материала и газа, Дж/(кг·°C);

$G_{\text{ж}}$, $G_{\text{г}}$ – массы вспомогательных жароупорных устройств и газа, расходуемого за цикл работы печи, кг;

$t_{\text{ж}}''$, $t_{\text{ж}}'$, $t_{\text{г}}''$, $t_{\text{г}}'$ – конечная и начальная температуры жароупорных изделий и газа, °C.

Суммарные тепловые потери печи $\sum Q_{\text{пот}}$, Дж, равны:

$$\sum Q_{\text{пот}} = k_{\text{п}} (q_{\text{пот.н}} \cdot \tau_{\text{н}} + q_{\text{пот.выд}} \cdot \tau_{\text{выд}} + q_{\text{пот.охл}} \cdot \tau_{\text{охл}} + q_{\text{пот.з.в.}} \cdot \tau_{\text{з.в.}}), \quad (2.4)$$

где $q_{\text{пот.н}}$, $q_{\text{пот.выд}}$, $q_{\text{пот.охл}}$ – мощность тепловых потерь через стенки печи в период нагрева, выдержки и охлаждения, Вт;

$q_{\text{пот.з.в.}}$ – мощность тепловых потерь через загрузочные проемы и шели при загрузке и выгрузке, Вт;

$\tau_n, \tau_{\text{выд}}, \tau_{\text{охл}}, \tau_{\text{з.в.}}$ - время периода нагрева, выдержки, охлаждения, загрузки и выгрузки, с;

$k_{\text{п}} = 1,15 - 1,3$ коэффициент неучтенных тепловых потерь, который вводится для учета трудно определяемых тепловых потерь (через неплотности и щели, конвекцией, через выходы нагревателей, термопары и другие элементы конструкции печи).

Количество теплоты, прошедшее через стенки печи за период охлаждения, есть не что иное, как потери теплоты, аккумулированной кладкой:

$$q_{\text{пот.охл}} \cdot \tau_{\text{охл}} = Q_{\text{акк}}'' - Q_{\text{акк}}' \quad (2.5)$$

где $Q_{\text{акк}}''$, $Q_{\text{акк}}'$ - аккумулированная кладкой теплота, соответствующая температурам изделия $t_{\text{изд}}''$, $t_{\text{изд}}'$.

Очевидно, что при работе печи по циклам на рис. 2.10, а и б кладка теряет только небольшую часть аккумулированной ею теплоты за период загрузки и выгрузки за счет потерь теплопроводностью через стенки, излучением и конвекцией через открытые проемы. Суммарные тепловые потери печи $\sum Q_{\text{пот}}$, Дж, для этих циклов равны:

$$\sum Q_{\text{пот}} = k_{\text{п}} (q_{\text{пот}} \cdot \tau_{\text{ц}} + q_{\text{з.в.}} \cdot \tau_{\text{з.в.}}), \quad (2.6)$$

Тепловые потери в периоды нагрева и выдержки могут быть приняты одинаковыми и определяются отдельно для участков кладки, отличающихся по конструкции и материалам, по формулам (1.6), (1.7). Потери излучением $Q_{\text{изл}}$, Дж, за время выгрузки и загрузки через печные проемы равны:

$$Q_{\text{изл}} = q_{\text{з.в.}} \cdot \tau_{\text{з.в.}} = \psi \cdot C_S \epsilon_{\text{кл}} \left[\left(\frac{T_{\text{вн}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{нар}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{з.в.}}, \quad (2.7)$$

Потребная мощность печи периодического действия $P_{\text{потр}}$, Вт, определяется по расходу теплоты в период нагрева, так как именно в этот период требуется максимальное количество энергии:

$$P_{\text{потр}} = \frac{Q_{\text{ц}}}{\tau_{\text{н}}}, \quad (2.8)$$

Для цикла на рис. 2.10, в

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{выд}} + q_{\text{пот.н}} \cdot \tau_{\text{н}} + q_{\text{пот.охл}} \cdot \tau_{\text{охл}} + Q_{\text{изл}} = Q_{\text{ц}} - q_{\text{пот.выд}} \cdot \tau_{\text{выд}}, \quad (2.9)$$

Для циклов на рис. 2.10, а, б составляющая $q_{\text{пот.охл}} \cdot \tau_{\text{пот.охл}} = 0$.

Полученное значение потребной мощности следует увеличить на 10-50 %; установленная мощность печи $P_{\text{уст}}$, Вт, будет равна:

$$P_{\text{уст}} = k_{\text{м}} \cdot P_{\text{потр}} = (1,1 - 1,5) P_{\text{потр}} \quad (2.10)$$

Коэффициент запаса мощности $k_{\text{м}}$ учитывает:

- 1) возможность понижения напряжения сети против номинального значения;
- 2) увеличение сопротивления нагревательных элементов с течением времени («старение» материала нагревателей);
- 3) форсирование режима разогрева печи с холодного состояния.

Тепловой КПД печи периодического действия равен отношению полезной теплоты, расходуемой на нагрев садки, ко всей теплоте, затрачиваемой за время цикла:

$$\eta_{\text{т}} = (Q_{\text{пол}} / Q_{\text{ц}}) \cdot 100\%, \quad (2.11)$$

Удельный расход электроэнергии a , кВт·ч/кг, т.е. расход ее на единицу массы материала, обрабатываемого в печи, равен:

$$a = Q_{\text{ц}} / G_{\text{изд}}, \quad (2.12)$$

где $G_{\text{изд}}$ - масса загрузки, обрабатываемой в печи.

2.5 Особенности теплового расчета печей непрерывного действия

Тепловой расчет печи непрерывного действия основывается на условиях транспортировки загрузки и на температурной кривой, заданной технологическим процессом или рассчитанной в соответствии с техническим заданием на проектирование печи.

Потребная мощность печи непрерывного действия:

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{пол}} + P_{\text{всп}} + k_{\text{п}} (\sum P_{\text{пот.ст}} + P_{\text{изл}}), \quad (2.13)$$

где $k_{\text{п}}$ - коэффициент неучтенных потерь;

$\sum P_{\text{пот.ст}}$ - суммарная мощность тепловых потерь через стенки печи, Вт.

Мощность, расходуемая на нагрев изделий, Вт:

$$P_{\text{пол}} = c_{\text{изд}} \cdot G_{\text{изд}} (t_{\text{изд}}'' - t_{\text{изд}}') \cdot \frac{1}{3600}. \quad (2.14)$$

Мощность, затрачиваемая на нагрев жароупорных конструкций и газа, подаваемого в печь, Вт:

$$P_{\text{всп}} = c_{\text{ж}} \cdot g_{\text{ж}} \cdot \left(t_{\text{ж}}'' - t_{\text{ж}}' \right) \frac{1}{3600} + c_{\text{г}} \cdot g_{\text{г}} \cdot \left(t_{\text{г}}'' - t_{\text{г}}' \right) \frac{1}{3600}. \quad (2.15)$$

Здесь $g_{\text{ж}}$ - масса жароупорных конструкций (поддонов, конвейерных лент и т.п.), проходящих вместе с загрузкой через печь за 1ч, кг/ч;

$g_{\text{г}}$ - часовой расход газа, кг/ч.

Для каждой тепловой зоны потребная мощность определяется по формуле (2.13) в соответствии с кривыми нагрева и мощности тепловых потерь, относящихся к данной зоне.

Для каждой зоны вводится свой коэффициент запаса мощности. Полученное значение установленной мощности зоны $P_{\text{уст.з}} = k_{\text{м.з}} \cdot P_{\text{пот.з}}$ является исходным параметром для расчета нагревательных элементов зоны. Мощность печи представляет собой сумму установленных мощностей зон.

$$P_{\text{уст.печи}} = \sum P_{\text{уст.з}}$$

Тепловой КПД печи непрерывного действия равен:

$$\eta_{\text{г}} = 100 \left(P_{\text{пол}} / P_{\text{потр}} \right), \%, \quad (2.16)$$

а удельный расход электроэнергии a , кВт·ч/кг, при производительности $g_{\text{изд}}$, кг/ч, равен:

$$a = P_{\text{потр}} / g_{\text{изд}}. \quad (2.17)$$

2.6 Электрический расчет печей сопротивления

2.6.1 Расчет удельной поверхностной мощности нагревателя. Цель электрического расчета заключается в определении размеров (сечения и длины) нагревателей (по фазам) в соответствии с требуемым для выделения необходимой мощности сопротивлением, а также в зависимости от условий теплообмена между нагревателями и нагреваемыми изделиями. Кроме того, рассчитанные нагреватели определенной конструктивной формы надо разместить на стенках печи.

В печах сопротивления с рабочей температурой более 1000 К теплообмен между нагревателем и изделием осуществляется преимущественно излучением.

Если представить себе электрическую печь, в которой отсутствуют потери через кладку печи ($P_{\text{потр}} = 0$) и нагреватель выполнен в виде сплошного тонкого листа, охватывающего загрузку, то при допущении равенства поверхности нагревателя и изделия ($F_{\text{н}} = F_{\text{изд}}$) уравнение теплообмена излучением между таким идеальным нагревателем и поверхностью нагреваемого изделия имеет вид:

$$P_{\text{печи}} = C_s \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{н}}, \quad (2.18)$$

откуда удельная поверхностная мощность идеального нагревателя

$$w_{\text{ид}} = \frac{P_{\text{печи}}}{F_{\text{н}}} = C_s \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.19)$$

где $P_{\text{печи}}$ - мощность печи, Вт;

$F_{\text{н}}$ - поверхность нагревателя, м²;

$T_{\text{н}}, T_{\text{изд}}$ - температуры нагревателя и изделия, К;

$C_s = 5.7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - излучательная способность абсолютно черного тела;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ - приведенный коэффициент теплового излучения:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{н}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} - 1 \right). \quad (2.20)$$

Здесь $\varepsilon_{\text{н}}$ и $\varepsilon_{\text{изд}}$ - коэффициенты теплового излучения материала нагревателя и материала изделия.

В реальных условиях работы печи часть мощности нагревателя, равная тепловым потерям через стенку печи, поглощается футеровкой. Теплообмен излучением в камере печи с реальным нагревателем (РН) представляет собой сложную картину. Имеет место взаимное экранирование отдельных витков и секций (спирали, зигзаги) нагревателя. Если нагреватели укладываются в пазы на полочки, футеровка также частично экранируется нагревателем. Кроме того, внутренняя поверхность футеровки участвует в теплообмене с поверхностью нагреваемого изделия. Поэтому для учета этих факторов вводят понятие условной эффективной поверхности нагревателя площадью $F_{\text{эф}}$, считая, что $w_{\text{р.н}} \cdot F_{\text{р.н}} = w_{\text{ид}} \cdot F_{\text{эф}}$, откуда

$$w_{\text{р.н}} = \frac{F_{\text{эф}}}{F_{\text{р.н}}} \cdot w_{\text{ид}} = \alpha_{\text{эф}} \cdot w_{\text{ид}}, \quad (2.21)$$

где $w_{\text{р.н}}$, $F_{\text{р.н}}$ - удельная поверхностная мощность и площадь поверхности реального нагревателя;

$\alpha_{\text{эф}}$ - коэффициент эффективности излучения нагревателя, который зависит от взаимных поверхностей облучения нагревателя, изделия и стенок печи, их приведенных коэффициентов излучения и от относительной величины тепловых потерь ($P_{\text{пот}} = P_{\text{н}}$).

Рекомендуемые значения $\alpha_{\text{эф}}$ для различных условий работы нагревателя приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1 – Рекомендуемые значения $\alpha_{\text{эф}}$ при нагреве различных материалов ($P_{\text{пот}} / P_{\text{н}} = 0,25$)

Конструкция нагревателя	Материал нагреваемых изделий		
	Сталь, $\epsilon=0,8$	Сталь в защитной атмосфере, $\epsilon=0,45$	Алюминий, $\epsilon=0,3$
Ленточный зигзагообразный свободно подвешенный	0,46	0,51	0,54
Ленточный зигзагообразный в пазу	0,44	0,48	0,5
Проволочный зигзагообразный или стержневой свободно подвешенный	0,62	0,65	0,68
Проволочный зигзагообразный в пазу	0,56	0,60	0,63
Проволочный спиральный на трубке	0,46	0,49	0,50
Проволочный спиральный на полочке	0,39	0,44	0,47
Проволочный спиральный в пазу	0,31	0,34	0,35
Литой свободно подвешенный	0,60	0,63	0,65

Порядок расчета нагревателя:

1) зная максимальную температуру нагрева изделия ($t_{\text{изд}}$, °C), по формуле

$$t_{\text{н}} = t_{\text{изд}} + (50 - 200), \text{ } ^\circ\text{C}$$

определяем температуру нагревательного элемента $t_{\text{н}}$, °C.

По табл. ПА.1 приложения А выбирается материал нагревательного элемента, для которого рабочая температура $t_{\text{макс}} = t_{\text{н}}$;

2) для выбранного материала нагревателя, его рабочей температуры $t_{\text{н}}$, температуры нагреваемого изделия $t_{\text{изд}}$ по формуле (2.19) с учетом (2.20), определяют $w_{\text{ид}}$;

3) для принятой конструкции нагревателя по табл.2.1 определяется $\alpha_{\text{эф}}$, а затем по формуле (2.21) рассчитывается $w_{\text{р.н.}} = w_{\text{доп}}$.

2.6.2 Расчет геометрических размеров нагревателей. Определение размеров сечения и длины нагревателя основывается на двух уравнениях, одно из которых отражает условия теплообмена

$$P_{\text{н}} = w_{\text{доп}} \cdot F_{\text{н}}, \quad (2.22)$$

а второе – электрическую связь параметров нагревателя

$$P_{\text{н}} = \frac{U_{\text{ф}}^2}{R_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{ф}}^2 \cdot f_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}} \cdot L_{\text{н}}}, \quad (2.23)$$

где $P_{\text{н}}$ - мощность нагревателя на каждую фазу, Вт;

$w_{\text{доп}}$ - допустимая поверхностная мощность нагревателя выбранной конструкции, Вт/м²;

$U_{\text{ф}}$ - фазное напряжение нагревателя (согласно схеме соединения), В;

$F_{\text{н}}$ - площадь поверхности нагревателя, м²;

$R_{\text{н}}$ - сопротивление одной ветви фазы нагревателя, Ом;

$L_{\text{н}}$ - длина нагревателя (проволоки или ленты) на одну ветвь фазы, м;

$f_{\text{н}}$ - сечение нагревателя, м²;

$\rho_{\text{н}}$ - удельное электрическое сопротивление материала нагревателя при рабочей температуре, Ом·м.

Выразив в формуле (2.22) площадь поверхности нагревателя через периметр Π и длину $L_{\text{н}}$ нагревателя $F_{\text{н}} = \Pi \cdot L_{\text{н}}$, получим выражение для длины нагревателя:

$$L_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\left(\Pi \cdot w_{\text{доп}}\right)}. \quad (2.24)$$

Из уравнения (2.23) имеем:

$$L_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2 \cdot f_{\text{н}}}{P_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{н}}}. \quad (2.25)$$

Приравняв выражения (2.24) и (2.25) и группируя в левой части полученного уравнения члены, содержащие размеры сечения, получаем:

$$f_{\text{н}} \cdot \Pi = \frac{P_{\text{н}}^2 \cdot \rho_{\text{н}}}{U_{\text{ф}}^2 \cdot w_{\text{доп}}}. \quad (2.26)$$

Для нагревателей круглого сечения (проволочных и стержневых) имеем:

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \pi \cdot d = \frac{P_{\text{н}}^2 \cdot \rho_{\text{н}}}{U_{\text{ф}}^2 \cdot w_{\text{доп}}},$$

откуда расчетный диаметр нагревателя, м

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot P_{\text{н}}^2 \cdot \rho_{\text{н}}}{\pi^2 \cdot U_{\text{ф}}^2 \cdot w_{\text{доп}}}} \quad (2.27)$$

Обозначив отношение сторон ленточного или стержневого нагревателя прямоугольной формы $m=b/a$ (рис.2.11,в) и подставив в (2.26), получим толщину ленты, м:

$$a = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{н}}^2 \cdot \rho_{\text{н}}}{2 \cdot m \cdot (m+1) \cdot U_{\text{ф}}^2 \cdot w_{\text{доп}}}} \quad (2.28)$$

так как $f_{\text{н}} = a \cdot b = m \cdot a^2$ и $\Pi = 2 \cdot (a+b) = 2 \cdot (m+1) \cdot a$.

Обычно принимают $m=5-15$.

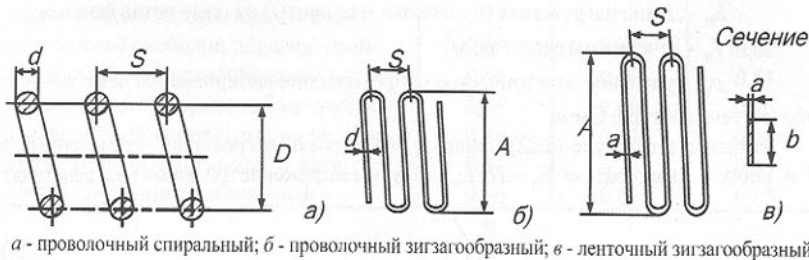


Рисунок 2.11 – Схемы исполнения нагревателей

Полученные расчетные значения диаметров или размеров сечения ленты округляются до ближайших больших из имеющихся по сортаменту размеров (табл. ПА.2, приложения А).

Для обеспечения надежной работы печей с температурой более 1000 К не рекомендуется применение для нагревателей проволоки $d < 5$ мм и ленты толщиной $a < 1.5$ мм, так как при малых размерах сечения окисление материала приводит к значительному сокращению срока службы нагревателей.

С учетом корректировки размеров сечения $f_{\text{нф}}$ определяем фактическую длину $L_{\text{нф}}$, м, и массу $G_{\text{нф}}$, кг нагревателя (проволоки, ленты, или стержня) на фазоветвь:

$$L_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{н}}^2 \cdot f_{\text{нф}}}{P_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{н}}}; \quad (2.29)$$

$$G_{\text{нф}} = \gamma \cdot f_{\text{нф}} \cdot L_{\text{нф}}, \quad (2.30)$$

где γ - удельная плотность материала нагревателя, кг/м³;
 $f_{\text{нф}}$ - фактическое сечение нагревателя, м².

Для проволочных нагревателей с диаметром проволоки 5-9 мм (рис.2.11,а) рекомендуется шаг спирали $S = 2d$, а диаметр спирали D :

- для никельсодержащих сплавов (нихромы) $D=(7-10)d$;

- для хромоалюминиевых (фехралы) $D=(5-7)d$.

Для проволочных зигзагообразных нагревателей (рис. 2.11, б) из проволоки $d=6-15$ мм высоту зигзага выбирают в пределах $A=400-600$ мм по условию механической прочности. Шаг волны $S=5d$ определяется технологическими возможностями изготовления качественного нагревателя.

У ленточных зигзагообразных нагревателей (рис. 2.11, в) высота зигзага рекомендуется $A=100a$, а шаг волны $S=2a$. длина „гармошки“ зигзагообразного ленточного и проволочного нагревателей

$$l_{\Gamma} = n \cdot S = L_{\text{нф}} \cdot S/2A,$$

где n - число волн в гармошке.

Рассмотренный расчет нагревателей средне- и высокотемпературных печей можно распространить и на низкотемпературные печи. Разница заключается в определении допустимой удельной поверхностной мощности нагревателя, т.к. в низкотемпературных печах существенную роль играет конвекция.

2.7 Электрооборудование печей сопротивления

В установку печи сопротивления косвенного нагрева, кроме собственно печи, как правило, входят вспомогательные механизмы с приводом, комплектные устройства, датчики и исполнительные устройства систем измерения и регулирования и т.д.

Для включения и управления нагревателями и электродвигателями применяют щиты управления серий ИЗР и ИЗРП (И - измерение, З - запись, Р - регулирование температуры, П - наличие приборов контроля тока и напряжения), а также станции управления серии ПТХ.

Щит управления типа ИЗР, ИЗРП представляет собой комплектное устройство в виде шкафа с силовой коммутационной и контрольно-измерительной аппаратурой для включения и управления нагревателями, двигателями вспомогательных механизмов мощностью до 10кВт, контроля и регулирования одной тепловой зоны печи.

Щиты управления изготавливаются в виде шкафов закрытого типа с обслуживанием со стороны фасада.

В настоящее время разработана новая серия низковольтных комплектов устройств типа ШОТ 9200 и ШОТ 9700 (некоторая модификация шкафов ИЗР и ИЗРП). В шкафах предусмотрена аварийная сигнализация, материалоемкость снижена на 20-30 %, увеличен полезный объем для установки аппаратуры.

Станции серии ПТХ 9600 представляют собой объединенное общей конструкцией комплектное устройство, в которое входят автоматические выключатели для защиты нагревателей от токов короткого замыкания, контакторы и промежуточные реле для ручного и автоматического включения нагревателей многозонной печи.

Станции целесообразно применять в установках крупных печей с большим количеством зон.

На рис. 2.12 показаны возможные схемы подключения ЭПС к распределительному пункту (РП).

Питание щитов управления предусматривается от силового РП радиальными линиями, проводами и шинами. Для питания ЭПС используется трех- или однофазный ток промышленной частоты напряжением 220, 380 и 660 В.

Трансформаторы и автотрансформаторы применяют при отличии напряжения нагреваемых элементов от напряжения питающей сети.

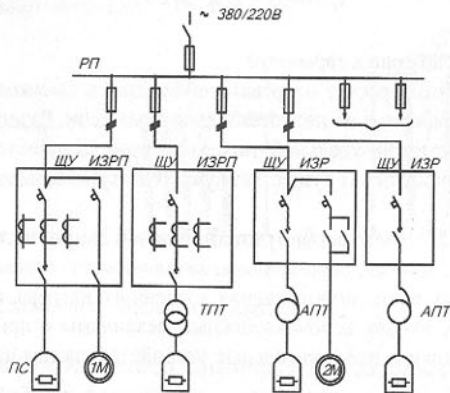


Рисунок 2.12 – Схема питающей и распределительной сети 380/220 В трехфазных печей сопротивления

Применяются однофазные и трехфазные трансформаторы серии ТПО и ТПТ мощностью от 1,6 до 250 кВА, а также однофазные автотрансформаторы серии АПО мощностью 180-360 кВА и трехфазные – серии АПТ мощностью 6-25 кВА и 40-100 кВА.

Для плавного регулирования напряжения, следовательно и температуры, выпускают одно- и трехфазные трансформаторы мощностью 25-250 кВА серии РОТ и РТТ - сухие, РОТМ и РТТМ - масляные.

Кроме того, для плавного регулирования напряжения применяются индукционные однофазные и трехфазные регуляторы серии ИР.

Для питания ЭПС используют также тиристорные управляемые источники питания для систем непрерывного регулирования температуры и тиристорные переключатели – для систем позиционного регулирования температуры.

Тиристорные управляемые источники питания (ТУИП) выпускаются однофазными типа РНТО (регулятор напряжения тиристорный однофазный) мощно-

стью 12 - 200кВт и трехфазными типа РНТТ мощностью 35 – 590 кВт. Источники выполнены по схеме фазово-импульсного управления; характер нагрузки - активный или активно-индуктивный. Быстродействие составляет не более 0,25 с для РНТО и 0,02 для РНТТ.

Источники рассчитаны на длительный режим работы. КПД в номинальном режиме - не менее 0,98; коэффициент мощности 0,865 (при работе на активную нагрузку), так как в номинальном режиме выходное напряжение принято равным 0,865 напряжения сети.

Во всех источниках тиристоры включены по встречно-параллельной схеме. Максимальная мощность, потребляемая из сети ТУИП,

$$P = 2,22 \cdot \xi \cdot U_H \cdot I_{T.H}, \quad (2.30)$$

где $I_{T.H}$ - номинальный ток тиристора (среднее значение);

U_H - напряжение на выходе источника;

$\xi=1$ - для однофазных источников, $\xi=1,73$ и 3 - для трехфазных, соединенных соответственно звездой и треугольником.

Принципиальная схема силовой части тиристорного трехфазного ТУИП показана на рисунке 2.13.

Тиристорный переключатель (ТП) (рис. 2.14) по сравнению с электромагнитным контактором (пускателем) имеет большую допустимую частоту переключений (8000 ч⁻¹ вместо 600 - 1200 для контактора); большой срок службы, бесшумность работы, искро- и взрывобезопасность, простоту обслуживания и существенно меньшие эксплуатационные расходы. Однако, стоимость ТП в три-четыре раза выше стоимости контакторов.

Естественный коэффициент мощности ПС косвенного действия зависит от оборудования, используемого для регулирования мощности нагревателей, и имеет следующие значения:

- 0,95-0,98 при трансформаторе или автотрансформаторе со ступенчатым регулированием напряжения;
- 0,7-0,9 - при тиристорном регуляторе с фазным управлением;
- 0,99-1 при контакторах или тиристорных регуляторах с широтно-импульсным управлением и питанием нагревателей непосредственно от сети 220, 380 и 660В.

Если в установке дополнительно предусматривается понижающий трансформатор, то коэффициент мощности снижается на 0,01-0,02.

Все промышленные печи сопротивления работают в режиме автоматического регулирования температуры, что позволяет проводить в соответствие мощность печи с требуемым температурным режимом, а это, в свою очередь, ведет к снижению удельного расхода электроэнергии по сравнению с ручным регулированием. Температура в рабочем пространстве ЭПС контролируется термодарами, термометрами сопротивления, фотоэлементами. В некоторых случаях для измерения высоких температур применяют радиационные, оптические и цветовые пирометры.

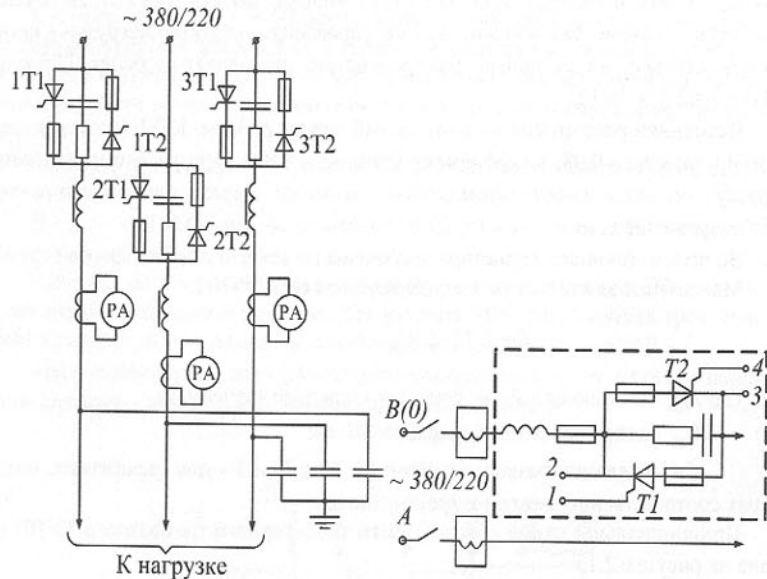


Рисунок 2.13 – Принципиальная схема силовой печи трехфазного ТУИП

Рисунок 2.14 – Принципиальная схема силового блока тиристорного переключателя с бесконтактным управлением

Техника безопасности для всех видов печей сопротивления, а также установок и печей прямого нагрева основывается прежде всего на мерах безопасности, применяемых к цеховому электрооборудованию, работающему при напряжении до 1000 В.

Основные меры безопасности от поражения током при эксплуатации электрических печей сводятся к следующему:

1) токоведущие части, выходящие за пределы кладки (выводы нагревателей, токопроводы к электродам, контактам), должны быть ограждены так, чтобы исключить возможность прикосновения к ним;

2) кожухи печей и нагревательных устройств должны быть надежно заземлены;

3) открывание загрузочных проемов и осуществление загрузки и выгрузки изделий в печах садового типа не допускается при включенных нагревателях: в схемах питания должна быть предусмотрена блокировка, автоматически отключающая нагреватели при открывании дверей или крышек печи;

Эксплуатация печей сопротивления создает в цехах, где они установлены, повышенную пожароопасность и опасность ожогов обслуживающего персонала, поэтому необходимо строгое соблюдение правил пожарной безопасности.

В электропечах в вакуумных и работающих с контролируруемыми атмосферами имеется опасность взрыва, что вызывает необходимость в выполнении обслуживающим персоналом всех правил по взрывобезопасности таких печей.

Цеха или отделения цехов, где установлены электрические печи сопротивления, должны иметь вентиляцию, рассчитанную на удаление газов и отвод тепловых потерь, чтобы обеспечить требуемые по санитарным нормам чистоту и температуру воздуха.

2.8 Установки и печи прямого нагрева

В отличие от печей сопротивления косвенного нагрева, в установках и печах прямого нагрева преобразование электрической энергии в тепловую происходит непосредственно в нагреваемом теле, включенном в цепь тока.

Количество теплоты Q , Дж, выделяемой в теле при прохождении тока, по закону Джоуля-Ленца равно:

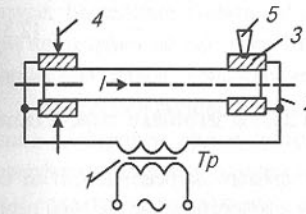
$$Q = I^2 R \tau, \quad (2.31)$$

где I - ток, А;

R - активное сопротивление проводника, Ом;

τ - время прохождения тока, с.

2.8.1 Установки прямого нагрева предназначены для нагрева заготовок и изделий из черных и цветных металлов для горячей обработки давлением (ковки, штамповки, гибки и т.п.) и термической обработки (закалки, отпуска, отжига).



1 – трансформатор;
2 – токопровод;
3 – контакты;
4 – зажимы;
5 – датчики нагрева.

Рисунок 2.15 - Схема установки прямого нагрева

По сравнению с ЭПС косвенного нагрева они имеют следующие преимущества:

- температура нагрева практически ограничена только температурой плавления и испарения материала заготовки, поскольку нет нагревательных элементов;
- высокая скорость нагрева обуславливает малые потери тепла и высокий термический КПД установки, возможность выполнения ее без футеровки;
- производительность установок прямого нагрева во много раз больше, чем косвенного.

Установка прямого нагрева (рис.2.15) включает в себя следующие основные узлы:

- понижающий трансформатор I , монтируемый в кожухе установки с обмоткой, охлаждаемой водой, и несколькими ступенями напряжения в диапазоне 5-25В, обеспечивающий нагрев тел, имеющих разное сопротивление;
- токопровод 2 от выводов обмотки низкого напряжения трансформатора до водоохлаждаемых зажимов;
- зажимы 3 , обеспечивающие крепление нагреваемого изделия и необходимое давление в контактах подвода питания;

г) привод контактной системы 4;

д) приборы 5 контроля и автоматического регулирования процесса нагрева.

Контакты изготовляют из материала с высокими электропроводностью и прочностью и малой теплопроводностью. Основными материалами являются медь и бронза.

В установках непрерывного действия для нагрева проволоки, труб, прутков применяются контакты скользящие сухие, полужидкостные (сухие с поливом токопроводящей жидкостью) и жидкостные (расплавленный свинец, расплавы солей и щелочей).

Мощность трансформатора установки прямого нагрева можно определить из выражения:

$$S_{\text{тр}} = \frac{P_3}{\eta \cdot \cos \varphi} \quad (2.32)$$

Мощность P_3 , кВт, вводимая в заготовку длиной l_3 , определяется по формуле:

$$P_3 = 4,18 \cdot \frac{a \cdot l_3}{100} \quad (2.33)$$

где a – скорость выделения тепла на 100 мм длины заготовки, определяется на действующих установках.

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

$$r_{\text{сц}} = r_{2\text{T}} + r_{\text{сп}} + r_{\text{k}} + r_{\text{нт}}, \quad (2.34)$$

где $r_{2\text{T}}$ – сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$r_{\text{сп}}, r_{\text{k}}$ – сопротивление соединительных проводов и контактов.

$r_{\text{нт}}$ – сопротивление нагреваемого тела, то.

$$\eta = r_{\text{нт}} / r_{\text{сц}} \quad (2.35)$$

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

2.8.2 Печи прямого нагрева применяют для различных технологических процессов: графитации угольных изделий, варки стекла, получения карборунда и т.п.

Графитация угольных изделий, т.е. получение искусственного графита, требует длительного (40-100 ч) нагрева при 2600-3100 К. Работа печи косвенного действия при таких температурах была бы возможна только при наличии вакуума или нейтральных защитных газов в рабочей камере для защиты изделий и нагревателей от окисления.

Графитировочные печи прямого нагрева конструктивно очень просты и надежны в эксплуатации. Они выполняются, как правило, однофазными в виде прямоугольных камер с разъемными стенками. Подвод тока осуществляется графитированными электродами и блоками через одну или две торцевые стенки печи.

Для питания графитировочных печей применяют специальные трансформаторы с широким диапазоном регулирования вторичного напряжения (в пределах 100-250 В) и мощностью 5-15 тыс. кВА. Печи с односторонним подводом имеют коэффициент мощности и КПД более высокие, чем печи с двухсторонним токоподводом ($\cos \varphi = 0.6-0.75$; $\eta = 0.5-0.6$).

В последние годы для варки не только специальных (оптических, декоративных), но и сортовых стекломасс применяют вместо газовых печей электрические комбинированные газоэлектрические печи.

Стекловаренная электропечь представляет собой (рис.2.16) ванну, футерованную блоками из высокоглиноземистых, магнезитовых или других огнеупорных материалов. Ванна имеет несколько отделений, в которых происходят расплавление шихты, варка стекла и выдача готовой стекломассы при определенной температуре. Выделение теплоты в стекломассе происходит по закону Джоуля-Ленца при протекании по ней тока. Материалы электродов – железо, молибден, графит; формы электродов – цилиндрические, прямоугольного сечения и пластинчатые.

По расположению в печи различают электроды пристенные и донные. Питание электродов осуществляется от понижающих однофазных и трехфазных трансформаторов с регулируемым вторичным напряжением (в пределах 50-200 В). Соответственно электроды образуют однофазные и трехфазные группы. Мощности печей могут достигать нескольких сотен и тысяч киловатт.

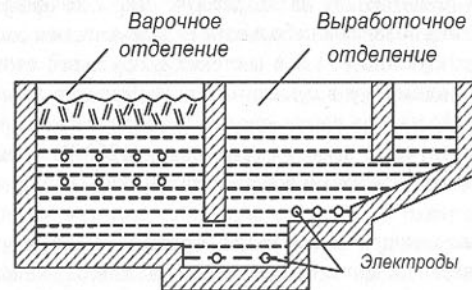


Рисунок 2.16 – Схема конструкции электрической стекловаренной печи

Преимущества электронагрева по сравнению с газовым при производстве стекла заключаются в следующем: повышается качество стекла, так как отсутствует взаимодействие стекломассы с продуктами сгорания топлива; ускоряется процесс варки, так как теплота выделяется непосредственно в стекломассе; увеличивается тепловой КПД печи; уменьшаются габариты печи; улучшаются условия труда.

К печам прямого нагрева относятся также электродные водоподогреватели и паровые котлы, поскольку преобразование электрической энергии в тепловую в них происходит непосредственно в нагреваемом теле – воде. Промышленность выпускает электродные водоподогреватели (котлы) высокого напряжения (3-35 кВ) и низкого напряжения (380 В).

Техника безопасности для установок и печей прямого нагрева основывается на выполнении правил и мер безопасности, применяемых к цеховому электрооборудованию, работающему при напряжении до 1000 В исключение составляют высоковольтные электроподогреватели, которые относятся к группе высоковольтного электрооборудования.

2.9 Установки электроотопления и электрообогрева

Электрические нагревательные установки применяются для сушки изделий после окраски, пропитки; сушки помещений при строительных работах; подогрева газов для различных технологических целей; отопления помещений; разогрева емкостей с жидкостью; прогрева технологических трубопроводов; прогрева бетона, грунтов и дорожных покрытий.

В электроотоплении и электрообогреве используется большое разнообразие различных электронагревательных устройств. К ним относятся фены, электрокалориферы, различные устройства радиационного обогрева, электрокотлы, электрические теплоаккумулирующие устройства, устройства для оттаивания грунта и т.д.

Электрокалорифер – это электронагревательный аппарат, состоящий из нагревательного элемента и вентилятора. Он предназначен для нагрева воздуха и различных газов в технологических процессах.

При невысоких температурах нагревательных элементов (500 К) в калориферах применяется подвешенная на изоляторах открытая проволочная спираль. Калориферы этого типа обладают небольшим гидравлическим сопротивлением.

Для нагрева воздуха до 400 К в системах воздушного отопления, вентиляции, искусственного климата и в сушильных установках применяются калориферы с трубчатыми оребренными нагревателями.

Для нагрева воздуха до высоких температур (1200 К) применяется калорифер с нагревательными элементами в виде металлических труб; воздух нагревается, протекая внутри них.

Радиационные электронагреватели. В различных отраслях промышленности и сельском хозяйстве широко используются радиационные нагреватели, передающие энергию в окружающее пространство излучением. Проникновение излучения вглубь нагреваемого тела зависит от длины волны излучения и прозрачности тела. Для осуществления нагрева в различных диапазонах длин волн существуют соответствующие радиационные нагреватели.

Светлый (ламповый) излучатель представляет собой лампу накаливания с вольфрамовой нитью и стеклянной колбой. Нижняя прилегающая к цоколю часть колбы изнутри алюминирована для создания направленного излучения. Температура вольфрамовой нити – около 2000 К, максимум излучения приходится на длину волны 1,3 мкм. Основная часть энергии излучается в диапазоне волн 0,8-3,5 мкм.

Светлый (кварцевый) излучатель представляет собой трубку из кварцевого стекла, внутри которой размещаются вольфрамовые, нихромовые или хромоалюминиевые спирали. По сравнению с ламповым излучателем он имеет больший срок службы, меньшие габаритные размеры при одной и той же мощности и позволяет получать большую плотность лучистого потока (до 60 кВт/м²).

Темный излучатель представляет собой трубчатый электронагреватель, расположенный в фокусе полированного отражателя. Рабочая температура поверхности излучателя 700 – 1000 К, максимум излучения приходится на длины волн 2-5 мкм.

Электрические сушила. Установки для сушки изделий могут быть радиационного или смешанного действия, когда передача теплоты излучением сочетается с конвекцией (установки конвективно-радиационного типа).

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

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

В качестве установок для сушки различного рода поверхностей могут применяться специальные *излучательные панели*. Нагреватели панелей выполняют в виде нихромовой спирали, намотанной на керамические трубки. Схема включения панели-излучателя позволяет осуществлять два режима: непрерывный и регулируемый, при котором по достижению воздухом заданной температуры нагреватели отключаются, а при понижении температуры включаются вновь.

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

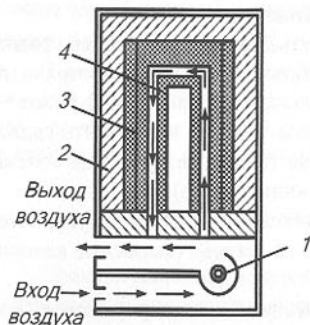
Применяют следующие виды электроотопления: отопление электрокалориферами с подогревом воздуха; отопление с помощью панельных нагревателей; отопление с использованием низкотемпературного, лучистого обогрева.

Для отопления помещений используются также *теплоаккумулирующие устройства* (рис. 2.17) Они в ночное время подключаются к электрической сети, работают на обогрев помещений и одновременно запасают теплоту в теплоаккумуляторе. Затем в дневное время отдают запасенную теплоту в отапливаемое помещение, будучи отключенными от электрической сети.

Выбор мощности и теплоаккумулирующей способности установки определяется площадью отапливаемого помещения и климатическими условиями местности.

Использование систем с теплоаккумуляторами положительно сказывается на работе электростанций, снабжающих электроэнергией данный район, поскольку

ку в этом случае повышается электрическая нагрузка станций в ночное время, что приводит к выравниванию суточного графика нагрузки и более рациональному использованию мощности системы.



- 1 – вентилятор;
2 – теплоизоляция;
3 – запасающий теплоту элемент;
4 – тепловыделяющий элемент.

Рисунок 2.17—Электрический теплоаккумулирующий нагреватель

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

Для нагрева потока жидкости применяют специальные электрические обогреватели трубопроводов. Они представляют собой плоские металлические обручи толщиной до 5 мм. Между двумя такими обручами размещен нагреватель, намотанный на миканитовую полосу толщиной 0,5 мм. Элементы имеют стяжные обручи, с помощью которых достигается плотное обгание обогреваемой поверхности.

Наиболее рациональный способ электропрогрева бетона – пропускание через него тока. Для ввода энергии в массу прогреваемого бетона служат различные электроды. Их изготавливают из арматурной диаметром 6-10 мм или полосовой стали.

Различают внутренние электроды, закладываемые в тело бетона, нашивные, прикрепляемые к поверхности опалубки или щитам со стороны, примыкающей к бетону, и плавающие, укладываемые на открытую поверхность бетона.

Электронагрев прямым пропусканием тока применяют и для оттаивания грунтов.

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

Вопросы для самопроверки

1. Как классифицируются печи сопротивления?
2. Какие наиболее распространенные печи сопротивления периодического действия, их конструктивное исполнение и принцип работы?
3. Какие наиболее распространенные печи сопротивления непрерывного действия, их конструктивное исполнение и принцип работы?
4. Какие наиболее характерные циклы работы печей сопротивления?
5. В чем состоит тепловой расчет печи сопротивления периодического действия?
6. В чем состоит особенность теплового расчета печи сопротивления непрерывного действия?
7. Как рассчитывается удельная поверхностная мощность нагревателя?
8. Как рассчитать геометрические параметры проволочных и ленточных нагревателей?
9. Какие существуют схемы подключения печей сопротивления к питающей сети?
10. Какое электрическое оборудование используется для подключения печей сопротивления к электрической сети?
11. Назначение тиристорных источников питания и тиристорных переключателей; их достоинства и недостатки.
12. Конструктивное исполнение и принцип действия установок прямого нагрева, где они применяются?
13. В чем состоит преимущество электронагрева перед газовым?
14. Какие установки применяются для электроотопления и электрообогрева?
15. Какие правила техники безопасности необходимо соблюдать при эксплуатации печей сопротивления?

3 ИНДУКЦИОННЫЙ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ

3.1 Физические основы индукционного нагрева

Индукционный нагрев проводящих тел – проводников первого и второго рода основан на поглощении ими электромагнитной энергии, возникновении наведенных вихревых токов, нагревающих тело по закону Джоуля-Ленца. Переменное магнитное поле создается индуктором, который по отношению к нагреваемому телу является первичной обмоткой трансформатора, содержащей один короткозамкнутый виток (рис.3.1).

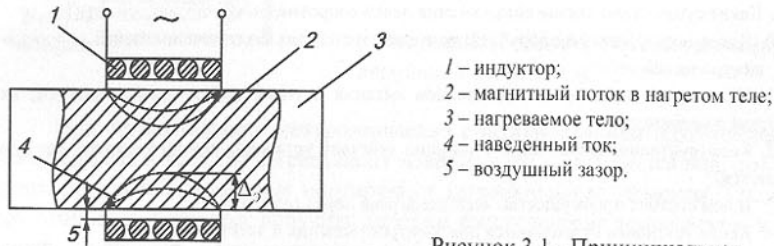


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема индукционного нагрева

Переменный магнитный поток 2, создаваемый первичной обмоткой – индуктором 1, пропорционален его МДС и обратно пропорционален сопротивлению магнитной цепи. Возникающая в нагреваемом теле ЭДС

$$E = 4,44 \cdot \Phi \cdot w \cdot f \cdot 10^{-8}, \text{ В}, \quad (3.1)$$

при известном значении сопротивления нагреваемого тела, обеспечивает возникновение в нем вихревого тока 4 и выделение соответствующей мощности

$$P = I^2 r = E^2 r / z^2. \quad (3.2)$$

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

Принципиальная схема индукционного нагрева включает в себя индуктор 1, зазор 5 и нагреваемое тело 3. Эти элементы определяют эффективность преобразования электрической энергии, получаемой от источника питания, в тепловую.

Исходными уравнениями для исследования электромагнитных процессов при индукционном нагреве металлических тел (в пренебрежение токами смещения) являются уравнения Максвелла:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{j}; & \operatorname{div} \mathbf{H} &= 0; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; & \operatorname{div} \mathbf{E} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где \mathbf{H} и \mathbf{E} – векторы напряженностей магнитного и электрического поля соответственно;

\mathbf{B} – вектор магнитной индукции;

\mathbf{j} – плотность тока проводимости.

При решении уравнений, используя прямоугольную систему координат, направляя векторы \mathbf{H}_0 и \mathbf{E}_0 по координатам x и y , как показано на рис. 3.2, а координату z в глубину тела, заменяя

$$\delta = \mathbf{E} / \rho \quad \mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H}$$

без учета краевого эффекта и полагая синусоидальное изменение \mathbf{H}_0 , \mathbf{E}_0 получаем:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-kz}; \quad \mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-kz}, \quad (3.4)$$

где $k = \sqrt{j\omega\mu_a/\rho} = (1+j)/\Delta_3$; $\Delta_3 = \sqrt{2\rho/(\omega\mu_a)}$.

Здесь ρ – удельное электрическое сопротивление металла, Ом·м;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость тела;

Δ_3 – глубина проникновения тока, м;

ω – угловая частота, рад/с.

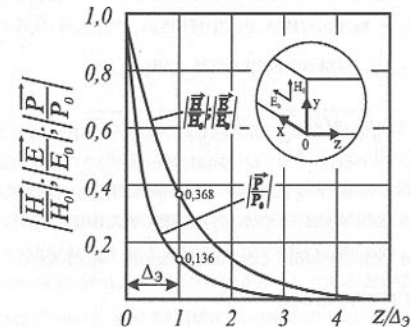


Рисунок 3.2 - Зависимость амплитуд электромагнитных волн в металлическом полуограниченном теле от отношения z/Δ_3 ,

Анализируя уравнения (3.3) и (3.4), видим, что электрическая волна ослабляется по мере удаления от поверхности в глубину тела по координате z , и тем быстрее, чем больше k (или меньше глубина проникновения волны Δ_3). Ослабление

волн происходит по экспоненциальному закону. На расстоянии $z = \Delta_3$ от поверхности амплитуды \mathbf{E} и \mathbf{H} падают (рис. 3.2) до значений:

$$\left. \begin{aligned} E &= E_0 e^{-1} = 0,368 E_0 \\ H &= H_0 e^{-1} = 0,368 H_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

При проникновении электромагнитной волны в проводящую среду она ослабляется из-за поглощения средой энергии этой волны. На некотором расстоянии от поверхности проводящего тела волна практически поглощается телом (рис. 3.2).

Для *индукционных установок*, содержащих систему "индуктор – нагреваемое тело", в первую очередь следует рассчитать активную и реактивную энергии, индуцированные в них электромагнитной волной. Вектор поверхностной плотности потока электромагнитной энергии определяется вектором Умова-Пойнтинга:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{E}} \times \dot{\mathbf{H}}^* \quad (3.6)$$

Здесь $\dot{\mathbf{H}}^*$ – комплексная величина, сопряженная с $\dot{\mathbf{H}}$.

Поскольку вектор Умова-Пойнтинга представляет собой энергию, отнесенную ко времени и площади поверхности, его единица равна Дж/(с·м²) или Вт/м².

Поток энергии на глубине Δ_3 уменьшается в e^2 раз, т.е. в 7,4 раза, по сравнению с потоком энергии на поверхности P_0 и составляет 0,136 P_0 (рис. 3.2).

Следовательно, в слое толщиной Δ_3 поглощается 86,4% всей энергии, прошедшей через поверхностный слой тела.

Заменяв $\mu_a = \mu_r \cdot \mu_0$ и $\omega = 2\pi f$, где μ_r – относительная магнитная проницаемость металла и μ_0 – магнитная постоянная, равная $0,4\pi \cdot 10^{-6}$ Гн/м, глубину проникновения тока Δ_3 , м, можно выразить так:

$$\Delta_3 = \sqrt{2\rho/\omega\mu_a} = 503\sqrt{\rho/(\mu_r \cdot f)} \quad (3.7)$$

Для любого металлического тела, помещенного в электромагнитное поле индуктора с током I_1 и числом витков $w_{1,0}$, приходящимся на единицу длины индуктора, м, активная и реактивная составляющие мощности P_a, P_p будут равны (кВт/м² и квар/м², соответственно):

$$\left. \begin{aligned} P_a &= 2 \cdot 10^{-6} (I_1 w_{1,0})^2 \sqrt{\rho \mu_r f} F_{\text{ин(ш)}} \\ P_p &= 2 \cdot 10^{-6} (I_1 w_{1,0})^2 \sqrt{\rho \mu_r f} G_{\text{ин(ш)}} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

где $F_{\text{ин(ш)}}$ и $G_{\text{ин(ш)}}$ являются сложными функциями, зависящими от относительной толщины плоского тела $2\Delta_{\text{ин}}/\Delta_3$ (или от относительного радиуса цилиндрического тела $r_0\sqrt{2}/\Delta_3$);

$\Delta_{\text{ин}}$ – толщина плоского нагреваемого изделия;

r_0 – радиус наружной поверхности цилиндрической детали.

Зависимости (3.8) показывают, что регулирование мощности при индукционном нагреве может осуществляться за счет изменения числа витков индуктора, тока намагничивания и его частоты.

Для полуограниченного тела (или плиты с относительной толщиной $2\Delta_{\text{ин}}/\Delta_3 \geq 3$) и для цилиндров с $r_0\sqrt{2}/\Delta_3 \geq 10$ $F_{\text{ин(ш)}} = G_{\text{ин(ш)}} = 1$, т.е. $P = Q$, а коэффициент мощности составит:

$$\cos \varphi = P / \sqrt{P^2 + Q^2} = 1 / \sqrt{2} = 0,707 \quad (3.9)$$

Таким образом, теоретически максимальное значение $\cos \varphi$ при индукционном нагреве равно 0,707. В действительности при определении коэффициента мощности системы необходимо учитывать активные $P_{\text{и}}$ и реактивные $Q_{\text{и}}$ мощности выделяющиеся не только в нагреваемом теле, но и в индукторе и особенно в зазоре:

$$\cos \varphi = 1 / \sqrt{1 + (Q_{\text{и}} + Q_3 + \Delta Q_{\text{и}})^2 / (P_{\text{и}} + \Delta P_{\text{и}})^2} \quad (3.10)$$

где $\Delta P_{\text{и}}$ и $\Delta Q_{\text{и}}$ – потери активной и реактивной мощности в индукторе;

Q_3 – потери реактивной мощности в зазоре.

Электрический КПД системы индуктор – нагреваемое тело определяется из соотношения полезной активной мощности, выделяющейся в металле, и активных потерь в индукторе:

$$\eta_3 = 1 / (1 + \Delta P_{\text{и}} / P_{\text{и}}) \quad (3.11)$$

Максимальное значение КПД составляет 0,70–0,881. Потери энергии в зазоре снижают КПД системы приблизительно на 10% (при больших зазорах).

При выводе вышеприведенных формул не учитывались многие явления, которые в действительности имеют место при индукционном нагреве металла. Так, в процессе нагрева изменяется и глубина проникновения тока, и мощность, потребляемая нагреваемым телом, поскольку ρ и μ_r тела изменяются в процессе нагрева с его температурой, а μ_r и с напряженностью магнитного поля.

Для ферромагнитных материалов при $t=730-770$ °С относительная магнитная проницаемость μ_r от значения 50–100 падает до 1; для немагнитных металлов μ_r всегда равна 1. Поэтому для ферромагнитных металлов глубина проникновения при достижении телом точки магнитных превращений (точки Кюри) резко увеличивается, а поглощаемая мощность при этом уменьшается.

Кроме этого, в индукционных нагревательных установках имеют место: *поверхностный эффект* – вытеснение тока к поверхности проводника при увеличении частоты изменения тока; *эффект близости* – повышение плотности тока на внутренних сторонах двух проводников; *катушечный эффект* – повышение плотности тока на внутренней стороне кольцевого проводника с током.

Следствия из теории индукционного нагрева:

1) глубина проникновения электромагнитной волны определяется по формуле

$$\Delta_3 = 503 \sqrt{\rho / \mu_r f};$$

2) в слое толщиной Δ_3 выделяется 86,4% всей подаваемой мощности;

3) максимальное значение $\cos \varphi = 0,707$.

3.2 Классификация индукционных установок и области их применения

По назначению индукционные установки делятся на плавильные индукционные печи, миксеры и нагревательные установки.

Индукционные плавильные печи предназначены для нагрева металлов и сплавов выше температуры их расплавления и перегрева металла до температуры разливки.

Миксеры служат как для подогрева жидкого металла до температуры разливки, так и для выравнивания его состава и поддержания необходимой температуры.

Нагревательные установки служат для нагрева деталей до температуры термообработки (меньшей, чем температура расплавления металла). Они применяются для сквозного нагрева деталей, поверхностной закалки, отпуска и пр.

По частоте тока источника питания индукционные установки делятся на печи и нагревательные установки *низкой* (промышленной) *частоты* (50 Гц); *средней частоты* (150-10000 Гц) и *высокой частоты* (50-1000 кГц).

По конструкции индукционные печи и нагревательные установки выполняются *открытыми*, т.е. работающими при атмосферном давлении, и *герметически закрытыми*, т.е. работающими с вакуумом внутри плавильного пространства, или под давлением при заполнении рабочего пространства нейтральным газом (азотом, аргонном, водородом).

По режиму работы различают печи и установки *периодического* и *непрерывного* действия.

В зависимости от *формы плавильного пространства* индукционные плавильные печи подразделяются на два типа: *канальные* (печи с сердечником) и *тигельные* (печи без сердечника). Конструкции этих печей в значительной мере определяют их электрические параметры, энергетические характеристики и технологические возможности.

3.3 Индукционные плавильные печи

Индукционные плавильные печи используют в литейных цехах металлургических заводов для плавки чугуна, стали и цветных металлов. Расширению их использования способствует увеличение потребности в высококачественных марках стали, синтетическом и высокопрочном чугуне, а также в других сплавах с высокими качественными показателями.

Большим достоинством индукционных печей является уменьшение загазованности и запыленности, что особенно важно для предприятий в крупных промышленных центрах.

3.3.1 Индукционные каналные печи. Индукционные каналные печи (ИКП) применяются для плавки чугуна и цветных металлов – меди и медных сплавов, алюминия, цинка.

Они могут выполняться с *горизонтальным* и *вертикальным* каналами. Работа ИКП основана на использовании явления электромагнитной индукции.

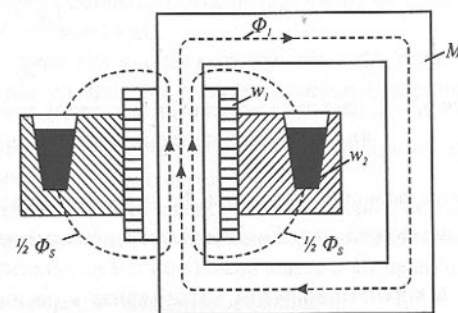


Рисунок 3.3 - Схема индукционной каналной печи

По электротехническим характеристикам каналные печи подобны силовым трансформаторам с распределенной по длине вторичной обмотки нагрузкой.

Принципиальная схема ИКП приведена на рис. 3.3. С целью уменьшения потока рассеяния Φ_S первичную w_1 и вторичную w_2 обмотки располагают на одном стержне магнитопровода M , по которому протекает основной магнитный поток Φ_1 .

Индукционная каналная печь имеет следующие отличия от силовых трансформаторов:

- 1) вторичная обмотка совмещена с нагрузкой и имеет только один виток с относительно малой высотой по сравнению с высотой индуктора;
- 2) низкий коэффициент мощности печи $\cos \varphi_n = 0,3-0,7$ из-за наличия большого потока рассеяния Φ_S , вызванного необходимостью футеровки печи.

Практически Φ_S составляет приблизительно 20-25% от основного потока Φ_1 .

На рис. 3.4 а, б представлены эквивалентная схема замещения и векторная диаграмма ИКП. Она соответствует схеме замещения трансформатора в режиме короткого замыкания.

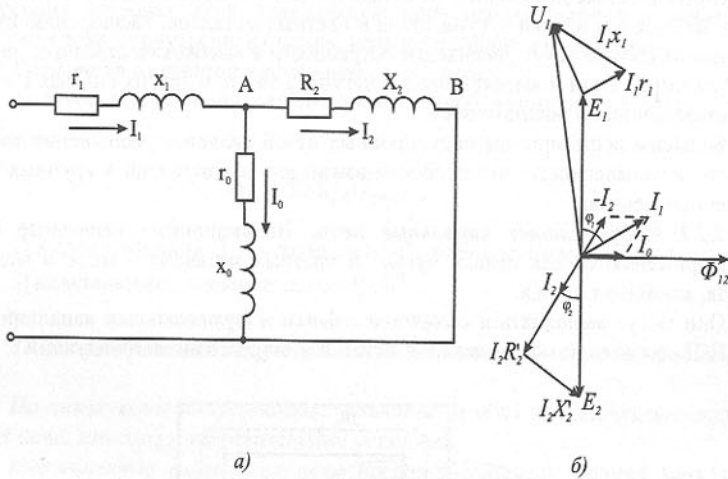


Рисунок 3.4 - Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) индукционной каналной печи.

Магнитный поток первичной обмотки Φ_1 , пересекая канал с металлом, наводит в нем электродвижущую силу E_2 . Ее действующее значение, В, определяется по формуле (3.1).

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

$$P = I_2^2 R_2'$$

В соответствии с векторной диаграммой

$$E_2 = \sqrt{(I_2 R_2')^2 + (I_2 X_2')^2} = I_2 Z_2', \quad (3.12)$$

где E_2 - ЭДС вторичной обмотки, В;

I_2 - ток в канале печи, А;

R_2' , X_2' - приведенные активное и реактивное сопротивления металла в канале соответственно, Ом;

Z_2' - полное приведенное сопротивление, Ом.

При условии синусоидального напряжения коэффициент мощности печи

$$\cos \varphi_{11} = R_2' / Z_2' = R_2' / \sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}. \quad (3.13)$$

Из формулы следует, что $\cos \varphi_{11}$ уменьшается с увеличением потока рассеяния и уменьшением активного сопротивления металла. Для улучшения $\cos \varphi_{11}$ параллельно индуктору печи присоединяют конденсаторную батарею, реактивная мощность которой должна быть равна реактивной мощности печи.

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

- 1) высокий энергетический КПД η_3 , достигающий в зависимости от рода переплавляемого металла значений 60-95 %;
- 2) малый угар металла, так как здесь нет большого перегрева металла на поверхности ванны печи и сильного окисления металла;
- 3) наличие электродинамического перемешивания металла в каналах печи позволяет получать однородный по химическому составу металл без применения каких-либо механических перемешивателей.

Однако, при выборе типа ИКП необходимо считаться и с их недостатками, главные из которых:

- 1) необходимость непрерывного, круглосуточного режима работы;
- 2) необходимость оставления несливной части металла - "болота" (обычно 25-30 % от полной емкости печи);
- 3) сложность перехода к плавке других металлов, так как пришлось бы производить промывные плавки, что вызвано излишней затратой электроэнергии и времени;
- 4) малая стойкость огнеупорной футеровки каналной части для плавки высокотемпературных металлов и сплавов.

Индукционные каналные печи с открытым горизонтальным каналом в силу своих недостатков (малая удельная мощность, выделяемая в металле, низкий $\cos \varphi_{11}$, наклон поверхности металла) были вытеснены печами с вертикальным закрытым каналом и печами с наклонными каналами.

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

Промышленность выпускает: печи для плавки меди и ее сплавов серий ИЛК и ИЛКМ (миксер для выдержки и перегрева металла), печи для плавки алюминия и его сплавов серии ИАК, стационарные печи для плавки цинка серии ИЦК и чугуна серии ИЧК, а также печи для выдержки и перегрева чугуна серий ИЧКМ и ИЧКР.

При эксплуатации каналных печей и миксеров необходимо выполнять все инструкции согласно правилам и нормам эксплуатации электротехнических установок и требованиям *техники безопасности*. От соблюдения правил эксплуатации зависит безаварийность работы, производительность печей, расход электроэнергии, срок службы футеровки.

3.3.2 Индукционные тигельные печи. Индукционные тигельные печи (ИТП) промышленной частоты используют для плавки и выдержки чугуна, а так-

же в качестве миксеров. Тигельные печи повышенной частоты применяются преимущественно для плавки легированных сталей и алюминиевых сплавов.

Характерным электротехническим признаком ИТП является то, что нагреваемые в них электропроводящие тела образуют с индуктором, создающим переменное электромагнитное поле, систему двух индуктивно связанных контуров с

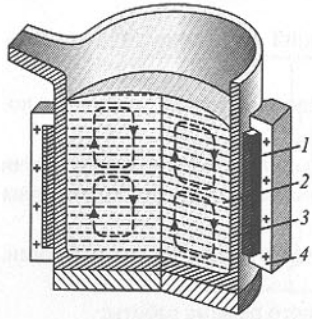


Рисунок 3.5 – Схема индукционной тигельной печи

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

Преимущества тигельных печей по сравнению с каналными связаны главным образом с отсутствием канала. Это значительно упрощает конструкцию печи; позволяет полностью сливать жидкий металл, облегчает осмотр и ремонт поврежденных участков футеровки.

Индукционная тигельная печь (рис. 3.5) состоит из следующих основных частей: индуктора 1,

подключаемого к источнику переменного тока, расплавляемого металла 2, находящегося внутри огнеупорного тигля 3, внешнего магнитопровода 4, а также токопроводов и устройства для наклона печи при сливе металла.

В зависимости от электрических свойств материала тигля различают ИТП с *непроводящим* и *проводящим* тиглем.

К первой группе относятся печи с диэлектрическим керамическим тиглем, ко второй группе - печи со стальным, графитовым или графито-шамотным тиглем. Печи с проводящим тиглем имеют теплоизоляцию.

По характеру рабочей среды ИТП можно разделить на *открытые*, работающие в атмосфере, и *вакуумные*. Конструкции вакуумных печей обеспечивают как плавку, так и разливку металла в вакууме, благодаря чему содержание растворенных в металле газов получается очень низким.

По частоте питающего тока ИТП можно классифицировать следующим образом:

- а) *высокочастотные* (50-500 кГц) с питанием от ламповых генераторов;
- б) *печи средней* (повышенной) частоты (150-10000 Гц) с питанием от умножителей частоты, вращающихся машинных генераторов и статических преобразователей;
- в) *печи низкой* (промышленной) частоты 50 Гц с питанием от цеховых электрических сетей.

Индукционные тигельные печи обладают следующими преимуществами:

- а) возможность опорожнения печи при переходе на плавку других металлов или при длительном простое печи;
- б) возможность получения чистых по химическому составу металлов и сплавов, поскольку отсутствует соприкосновение с топливом или электродами;

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

г) отсутствие перегрева футеровки печи, что повышает срок ее службы;

д) малая окисляемость и небольшой угар компонентов состава из-за наличия более холодного шлака на поверхности зеркала расплавленного металла.

К недостаткам ИТП относятся:

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

Для обеспечения достаточно высокого КПД нагрева частоту питающего тока можно определить по формуле

$$f \approx 25 \cdot 10^6 \rho_{\text{гор}} / d_0^2. \quad (3.14)$$

Эта формула справедлива при условии

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

где $r_0 = d_0 / 2$ - радиус тигля, м;

$\Delta_{\text{э,гор}} = 503 \sqrt{\rho_{\text{гор}} / \mu_r f}$ - глубина проникновения электромагнитной волны в горячий металл;

$\rho_{\text{гор}}$ - удельное электрическое сопротивление горячего металла, Ом.

Из формулы (3.14) следует, что частота источника питания ИТП зависит от геометрических размеров (диаметра d_0). В ИТП большой емкости (больших диаметров) применяются источники питания промышленной частоты, в печах средней и малой емкости - повышенной и высокой частоты.

Коэффициент полезного действия печи $\eta_{\text{п}}$ и коэффициент мощности печи существенно зависят от зазора между индуктором и садкой (расплавленным металлом в тигле печи). При уменьшении толщины стенки тигля электрический КПД $\eta_{\text{эл}}$ увеличивается, а тепловой КПД $\eta_{\text{т}}$ падает, так как при этом повышаются тепловые потери через футеровку. Обычно для ИТП $\eta_{\text{эл}} = 0,6 - 0,8$, причем большее значение относится к печам большой емкости для выплавки черных металлов, а меньшее - к печам для плавки цветных металлов (медь, алюминий, сплавы на их основе). Тепловой КПД $\eta_{\text{т}} = 0,8 - 0,85$.

Таким образом, общий КПД тигельной печи $\eta_{\text{т}} = 0,48 - 0,68$.

Естественный коэффициент мощности ИТП $\cos \varphi_{\text{п}} = 0,08 - 0,25$. Для его повышения используют батареи конденсаторов.

При эксплуатации индукционных тигельных печей должны соблюдаться правила **техники безопасности** для электротехнических установок соответствующего класса. Кроме того, должны быть приняты меры безопасности, связанные со специфическими особенностями тигельных печей.

Основная опасность, возникающая при работе ИТП, заключается в возможности прожига витков водоохлаждаемого индуктора расплавленным металлом при повреждении футеровки. При этом не исключается выброс металла из печи вследствие бурного парообразования или даже взрыв. Для предотвращения аварий такого рода устанавливаются сигнализаторы состояния футеровки, которые отключают питание печи и включают сигнализацию при появлении трещин в тигле или недопустимом утоньшении его стенок. Действие сигнализатора основано на измерении сопротивления между расплавленным металлом и специальными электродами, запеканными в стенку и подину тигля, и на срабатывании реле при уменьшении сопротивления.

3.4 Индукционные нагревательные установки

Индукционные нагревательные установки широко применяются в различных технологических процессах в машиностроительной и других отраслях промышленности.

По сравнению с другими видами нагрева (в пламенных печах и печах сопротивления) индукционный нагрев имеет следующие преимущества:

- 1) большая скорость нагрева, а значит, и производительность;
- 2) малый угар металла и меньший брак из-за попадания окалины в обрабатываемое изделие;
- 3) возможность нагрева отдельных участков детали, что уменьшает деформацию всей детали и повышает КПД нагрева;
- 4) возможность производить нагрев на заданную глубину;
- 5) меньшая площадь, занимаемая непосредственно нагревателем.

К недостаткам индукционных нагревательных установок следует отнести более высокую стоимость энергии и относительно большие капитальные затраты (источники тока средней и высокой частоты, конденсаторные батареи и помещения для них), особенно при средней и малой годовой производительности. Поэтому экономическая эффективность применения индукционного нагрева определяется возможностью реализации его основных преимуществ и в каждом конкретном случае должна быть обоснована.

По назначению индукционные нагревательные установки подразделяют на два основных типа: установки *сквозного* и *поверхностного* нагрева.

3.4.1 Установки сквозного нагрева. Индукционный сквозной нагрев применяется для нагрева заготовок перед ковкой, штамповкой, прокаткой, гибкой, прессовкой и т.п., а также с целью сварки (поперечной и продольной сварки труб).

При сквозном нагреве применяют глубинный нагрев.

Глубинным нагревом называют нагрев, происходящий путем выделения теплоты в слое достаточной глубины x_k по сечению детали при отсутствии большого перепада температуры между поверхностью и слоем x_k ; за этим слоем температура резко падает (рис. 3.6, а).

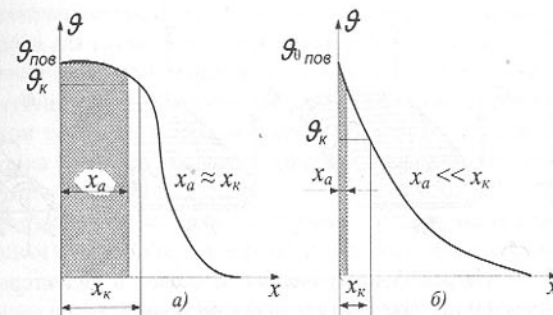


Рисунок 3.6 – Графики распределения температуры при глубинном (а) и поверхностном (б) нагреве

Толщину активного слоя x_a , в котором выделяется основное количество тепла, определяют по формуле:

$$x_a = (\Delta_{э.хол} + \Delta_{э.гор})/2, \quad (3.15)$$

где $\Delta_{э.хол}$, $\Delta_{э.гор}$ - глубина проникновения тока в металл холодной и горячей заготовок.

Принято, что при $x_a = (0,3-1)x_k$ нагрев считается глубинным. Нагрев будет также глубинным, если соблюдается условие

$$r_0\sqrt{2}/\Delta_{э.гор} = 3 \div 5,$$

где r_0 - радиус нагреваемой заготовки.

Необходимая частота $\Gamma_{ц}$, для сквозного нагрева цилиндрических стальных заготовок ориентировочно может быть определена по соотношению

$$f = 3 \cdot 10^4 / d_0^2, \quad (3.16)$$

где d_0 - диаметр нагреваемой заготовки, см.

Чем больше диаметр, тем ниже берется частота тока. При стальных заготовках диаметром более 100 мм может быть использована частота 50 Гц.

Сквозной нагрев заготовок осуществляется в специальных индукционных нагревательных установках, основным элементом которых является индуктор.

Наибольшее распространение получили индукторы цилиндрического, овального и щелевого типа (рис. 3.7).

Прямоугольные тела нагревают в овальных (прямоугольных), реже щелевых индукторах. Для цилиндрических тел используют индукторы всех трех типов, причем в овальных индукторах цилиндры могут располагаться вдоль (рис. 3.7,б) или поперек (рис. 3.7,в) оси индуктора (нагрев в продольном или поперечном магнитном поле индуктора).

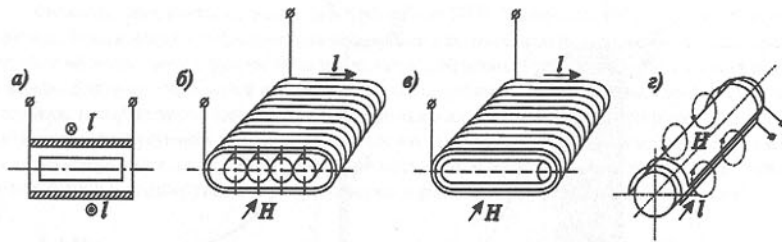


Рисунок 3.7 – Нагрев цилиндрических заготовок в индукторах различных типов: цилиндрическом (а) овальном (б) и (в) и щелевом (г)

Выбор типа индуктора необходимо производить по совокупности электрических, тепловых и конструктивных характеристик.

По режиму работы установки сквозного нагрева подразделяют на установки периодического и непрерывного действия. В установках *периодического* действия нагревается только одна заготовка или ее часть. В установках *непрерывного* действия одновременно нагреваются несколько заготовок, расположенных в продольном или поперечном магнитном поле (рис. 3.7, б, в). В процессе нагрева они перемещаются по длине индуктора, нагреваясь до заданной температуры. В нагревателях непрерывного действия полнее используется мощность источника питания, поскольку средняя мощность, потребляемая ими от источника питания, выше, чем средняя мощность, потребляемая нагревателем периодического действия.

Индукционные нагревательные установки непрерывного действия имеют более высокий КПД источника питания и производительность их выше, чем установок периодического действия.

Питание установок сквозного нагрева осуществляется по *индивидуальным* и *централизованным* схемам. В первом случае один или несколько согласованно работающих нагревателей питаются от одного источника. Во втором случае все источники объединяются в генераторную подстанцию; к ней присоединяются индукторы нагревательных установок, число и мощность которых меняется во времени.

3.4.2 Установки поверхностного нагрева. Индукционные установки поверхностного нагрева применяются для нагрева деталей под последующую термообработку (закалка, цементация, азотирование и т.п.).

Поверхностным называют нагрев, когда теплота передается от поверхности вглубь металла главным образом теплопроводностью при сильном перегреве поверхности (рис. 3.6, б). Нагрев принято считать поверхностным при $x_a < 0,1x_k$.

Индукционный поверхностный нагрев сопровождается проявлением *поверхностного эффекта* и *эффекта близости*.

Вследствие поверхностного эффекта ток в нагреваемом изделии распределяется неравномерно. Наибольшая плотность тока имеет место в поверхностных слоях изделия. Большие плотности тока можно получить при высоких частотах, что обеспечит быстрый нагрев металла.

Наиболее распространенным видом термообработки является закалка.

Индукционной поверхностной закалке подвергают трущиеся поверхности стальных деталей для уменьшения их износа при эксплуатации.

Индукционная закалка заключается в быстром нагреве поверхности изделия из стали или чугуна с последующим быстрым охлаждением на воздухе, в воде или масле. При этом поверхность приобретает высокую твердость и способность хорошо работать на трение, а "мягкая" сердцевина изделия обеспечивает высокую сопротивляемость ударным нагрузкам.

Индукционная закалка имеет следующие преимущества по сравнению с печным сквозным нагревом (в газовых печах, печах сопротивления, соляных ваннах и др.):

- 1) меньшее время термообработки, что приводит к увеличению производительности в десятки раз;
- 2) малая площадь цеха, занимаемая закалочными станками;
- 3) отсутствие загрязнения окружающей среды;
- 4) при местной закалке деталей отпадает необходимость в защите не подлежащих закалке мест;
- 5) вследствие быстрого локального нагрева уменьшается деформация изделия;
- 6) сокращается расход электроэнергии.

Различают три вида поверхностной закалки: одновременная, одновременно-поочередная и непрерывно-последовательная (рис. 3.8).

При *одновременной закалке* вся закаливаемая поверхность нагревается до закалочной температуры и затем одновременно охлаждается жидкостью (рис. 3.8, а).

При *одновременно-поочередной закалке* детали подвергаются поочередной закалке участка за участком (рис. 3.8, б).

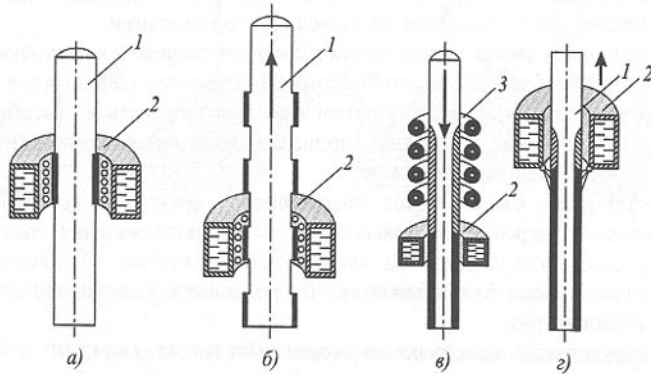
Непрерывно-последовательная закалка (рис. 3.8, в, г) применяется при большой закаливаемой поверхности. Она заключается в последовательном нагреве и охлаждении поверхности детали при поступательном ее движении относительно индуктора (рис. 3.8, в) или индуктора относительно детали (рис. 3.8, г).

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

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

$$P_c = P_{пол} / \eta_c = P_{пол} / (\eta_{и} \cdot \eta_{кб} \cdot \eta_{л} \cdot \eta_{ин}) \quad (3.17)$$

где η_c , $\eta_{и}$, $\eta_{кб}$, $\eta_{л}$, $\eta_{ин}$ - соответственно КПД системы, индуктора, конденсаторной батареи, линии и источника питания.



а - одновременная; б - одновременно-поочередная; в - непрерывно-последовательная;
1 - деталь; 2 - индуктор; 3 - устройство для подачи охлаждающей воды

Рисунок 3.8 - Виды поверхностной закалки

Полезная мощность

$$P_{\text{пол}} = c_p(t_k - t_0)g \cdot n / \tau, \quad (3.18)$$

где c_p - средняя удельная теплоемкость металла детали в интервале температур $t_k - t_0$, Дж/(кг·К);

t_k и t_0 - конечная и начальная температуры детали, К;

n - число заготовок одновременно нагреваемых в индукторе;

τ - время нагрева, с.

Оптимальная частота $f_{\text{опт}}$, необходимая для нагрева на заданную глубину Δ_3 ,

$$f_{\text{опт}} = \rho / (\pi \cdot \mu \cdot \Delta_3^2), \quad (3.19)$$

где ρ - удельное электрическое сопротивление нагреваемого материала, Ом·м.

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

Электрический КПД индуктора зависит от ряда величин: соотношения диаметров детали d_2 , индуктора d_1 , удельного сопротивления металла индуктора ρ_1 и заготовки ρ_2 , магнитной проницаемости μ_2 металла заготовки:

$$\eta_3 = 1 / [1 + (d_1 / d_2) \sqrt{\rho_1 / (\rho_2 \cdot \mu_2)}]. \quad (3.20)$$

Чем больше ρ нагреваемого изделия, тем выше η_3 . Так, при нагреве стали предельный $\eta_3 = 0,7 - 0,8$, а при нагреве цветных металлов он может быть несколько выше 0,5.

Тепловой КПД индуктора при неизменной удельной мощности падает с повышением частоты и с увеличением диаметра нагреваемой заготовки, так как относительная глубина проникновения тока в металл уменьшается и для нагрева изделия требуется большее время, что приводит к увеличению тепловых потерь. Так, например, при нагреве тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена, ниобия и др.) до температуры 2100-2300 К тепловой КПД может снизиться до 0,5-0,3.

Индукционные нагревательные установки имеют, как правило, низкий естественный коэффициент мощности, поэтому для его повышения используют конденсаторные батареи.

3.5 Физические основы диэлектрического нагрева

Высокочастотный нагрев диэлектрических и полупроводящих материалов осуществляется при их помещении между пластинами конденсатора, к которому подведено напряжение в несколько сотен или тысяч вольт при частоте тока, исчисляемой десятками мегагерц. Этот вид нагрева часто называют *диэлектрическим* нагревом. Если частота тока равна нескольким тысячам мегагерц (СВЧ-нагрев), то нагреваемый материал помещается не в поле конденсатора, а в волновод или объемный резонатор.

Диэлектрический нагрев происходит за счет процессов поляризации имеющих в диэлектрике "связанных" зарядов. Под действием электрического поля заряженные частицы (диполи, ионы) стремятся ориентироваться в направлении поля, при этом накапливается энергия. Если снять поле, то заряженные частицы возвращаются в свое "нейтральное" положение и из-за наличия между частицами материала межмолекулярного трения потенциальная энергия превращается в тепловую. Если диэлектрик поместить в переменное электрическое поле, то при каждом изменении поля внутри материала будет выделяться некоторое количество теплоты. Чем чаще изменяется направление поля (чем выше частота тока), тем больше теплоты выделится в диэлектрике за единицу времени.

Проходящий через конденсатор с диэлектриком ток имеет две составляющие: ток смещения $I_{\text{см}} = j\omega CU$ и ток проводимости $I_{\text{п}} = gU$ (рис. 3.10). Полный ток, проходящий через диэлектрик, $I_{\text{д}} = I_{\text{п}} + I_{\text{см}} = (g + j\omega C)U$. Разность $\delta = 90^\circ - \phi$ характеризует потери в диэлектрике и называется *углом диэлектрических потерь*.

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

При преобладании токов смещения, токами проводимости можно пренебречь, и выделяющуюся в диэлектрике мощность $P_{\text{д}}$ можно получить из векторной диаграммы.

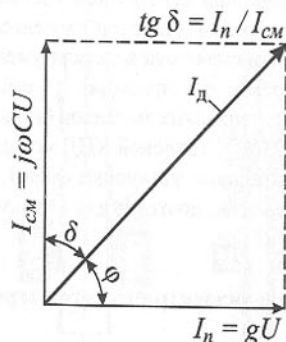


Рисунок 3.9 – Векторная диаграмма в переменном электрическом поле

$$P_d = U \cdot I_d \cdot \cos \varphi \approx U \cdot I_n \cdot \operatorname{tg} \delta = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (3.21)$$

где $\omega = 2\pi f$ - угловая скорость, рад/с;

C - емкость плоского конденсатора, Ф.

Для плоского конденсатора

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S / a,$$

где S - площадь пластин конденсатора, м²;

a - расстояние между ними, м;

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ - диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;

ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика.

Имея в виду, что объем диэлектрика равен $V_d = S \cdot a$ и напряженность электрического поля $E = U/a$ (В/м), мощность p_0 (Вт/м³), выделяющаяся в единицу объема диэлектрика,

$$p_0 = \frac{P_d}{V_d} = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot E^2 \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (3.22)$$

Подводимая удельная мощность p_0 расходуется на нагрев материала, испарения влаги или других летучих компонентов.

Из выражения (3.22) видно, что мощность, выделяющаяся в помещенном в переменное электрическое поле диэлектрике, зависит только от электрических характеристик материала (ε и $\operatorname{tg} \delta$) и параметров поля – частоты и напряженности поля в материале и не зависит от теплопроводности материала, которая у диэлектриков, как правило, мала. Эта особенность является существенным преимуществом диэлектрического нагрева, позволяющим значительно ускорить процесс нагрева материала по сравнению с любым другим традиционным видом нагрева.

3.6 Установки диэлектрического нагрева

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

Установки *первого* вида используются в процессах промышленной обработки крупных изделий, требующих быстрого нагрева в однородном электрическом поле: сушка волокон, шерсти или хлопка, целлюлозы и лесоматериалов, обжиг крупных электроизоляторов и фарфоровых изделий, производство звуко- и теплоизоляционных материалов, сварка пластмасс и полимерных пленок.

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

Установки *третьего* вида применяются для процессов, не требующих быстрого и однородного нагрева: размораживание продуктов, разогрев и быстрое приготовление блюд, обжиг простых керамических изделий, сушка грибов, чая и т.п.

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

В зависимости от частоты тока различают следующие установки диэлектрического нагрева:

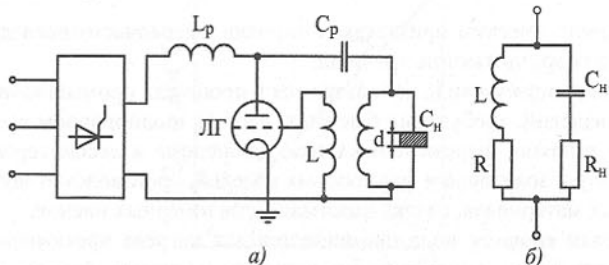
1) установки *средневолнового диапазона* ($f = 0,3 - 3$ МГц). Они применяются для нагрева материалов с большим фактором потерь $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$, к которым относятся очень влажные материалы с относительно большой массой. Генераторы этих установок имеют сравнительно высокий КПД (0,5-0,6) и мощность до нескольких сотен киловатт. Нагрев производится на низких удельных мощностях ($p_0 = 0,01 \div 1,0$ Вт/см³) при длительном нагреве в десятки часов и высоком напряжении на рабочем конденсаторе (10-15 кВ);

2) установки *коротковолнового диапазона* ($f = 3 - 30$ МГц). Применяются для нагрева материалов со средним значением фактора потерь. КПД таких установок 0,4-0,55. Мощность генератора составляет несколько десятков киловатт, объем одновременно нагреваемого материала небольшой. Удельная мощность $p_0 = 1,0 \div 100$ Вт/см³;

3) установки *метрового диапазона* ($f = 30 - 300$ МГц) имеют КПД равный 0,3-0,4. Применяются для нагрева материалов с малым значением $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$. Объем рабочей камеры невелик ($p_0 = 0,1 \div 3$ кВт/см³), время нагрева – секунды.

Кроме рассмотренных частот для нагрева диэлектриков применяются *сверхвысокие* частоты (СВЧ), которые позволяют получать достаточно высокие удельные мощности при сниженных значениях напряженности электрического поля. Применяются установки СВЧ для нагрева материалов с низким значением фактора потерь - продуктов, слоистых материалов, медицинских препаратов и т.д.

Они используют частоты 433, 915 и 2375 МГц, относящиеся к дециметровому диапазону для электромагнитных волн.



L_p – разделительный дроссель, защищающий выпрямитель от высокой частоты;
 ЛГ – ламповый генератор; C_p – разделительная емкость; C_n – нагрузочная емкость;
 L_k – индуктивность колебательного контура; L – катушка связи; R_n – активное сопротивление нагрузки; R_1 – активное сопротивление катушки связи и соединительных проводов.

Рисунок 3.10 – Схема высокочастотного генератора для диэлектрического нагрева (а) и схема замещения нагрузочного контура (б)

В комплект установок диэлектрического нагрева входят высокочастотный генератор; системы защиты и сигнализации; технологический узел (рис. 3.10). Технологический узел – конденсатор с нагреваемым материалом – включен в колебательный контур.

Полное активное сопротивление контура $R_k = R_n + R_1$. Если оно незначительно, то частоту генератора с достаточной точностью определяют по условию резонанса контура без потерь:

$$1/(\omega C_n) = \omega L_k, \quad \text{или} \quad f = 1/(2\pi\sqrt{L_k C_n}). \quad (3.23)$$

Все серийно выпускаемые установки диэлектрического нагрева снабжены экранировкой от радиопомех, механической блокировкой дверей шкафов и блоков для обеспечения безопасного обслуживания. Кожухи установок должны иметь надежное заземление. Все установки питаются от сетей промышленной частоты 50 Гц, напряжением 380 В, через повышающие трехфазные трансформаторы.

Промышленность выпускает следующие типы установок диэлектрического нагрева:

а) для нагрева терморезистивных пресс-материалов перед прессованием ВЧД-1,6/40, ВЧД-4/40, ВЧД-2,5/81, ВЧД-6/81 соответственно колебательной мощностью $P_k = 1,6$ и 4 кВт, $f = 40,68$ МГц и $P_k = 2,5$ и 6 кВт и $f = 81,36$ МГц;

б) для сварки термопластичных материалов (пленок) - ВЧД-0,63/40-СП, ВЧД-1,6/40-СП, ВЧД-2,5/40-СП, ВЧД-4/40-СП мощностью $P_k = 0,63, 1,6, 2,5$ и 4 кВт, $f = 40,68$ МГц;

в) для склейки древесины - ВЧД-2,5/13-СД, ВЧД-10/5-СД, ВЧД-25/27-СД - мощностью $P_k = 2,5, 10$ и 25 кВт и $f = 13,56, 5,26$ и 27,12 МГц;

д) для сушки стержней - ВЧД-63/27-3 мощностью $P_k = 63$ кВт и $f = 27,12$ МГц. Существующие СВЧ-установки для тепловой обработки пищевых продуктов, известные под названием "СВЧ-печь", "микроволновая печь" или "магнетронная кухня", имеют мощность 0,7-2 кВт, частоту 2375 или 2450 МГц, в зависимости от принятого в стране-изготовителе стандарта разрешенных частот.

3.7 Электрооборудование и схемы питания установок индукционного и диэлектрического нагрева

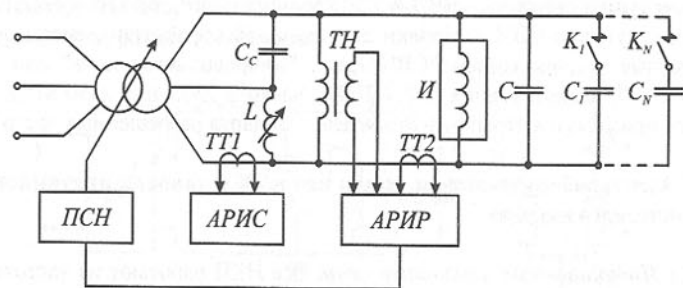
3.7.1 Индукционные каналные печи. Все ИКП работают на частоте 50 Гц, поскольку достаточно высокий электрический КПД системы индуктор-канал может быть обеспечен на этой частоте при любом удельном сопротивлении расплавляемого металла. Характерной особенностью ИКП является наличие двух зон – зоны выделения энергии ("индукционная единица") и плавильной зоны (ванны печи). *Индукционной единицей* в ИКП является трансформатор, вторичной обмоткой которого служит металл в канале печи. По конструкции индукционные единицы бывают *одинарные* и *сдвоенные* с одним или двумя каналами на один индуктор.

Мощность одинарной однофазной индукционной единицы может составлять величину от 50 до 1000 кВт. В печах большой мощности применяются двухфазные (сдвоенные), а также трехфазные индукционные единицы. Мощность их может составлять 700-1500 кВт. Часто крупные каналные печи оборудуются несколькими индукционными единицами.

Индукционные единицы мощностью до 300 кВт можно питать от индивидуальных однофазных электропечных автотрансформаторов, подключаемых к сети 380 В с ручной или автоматической регулировкой вторичного напряжения от 0 до 500 В (автотрансформаторы АПО-180/500 и АПО-360/500 мощностью 180 и 360 кВА соответственно) в зависимости от требуемой производительности. Регулирование может быть осуществлено для поддержания температуры и параметров электрического режима на определенном уровне.

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

Для подключения электропечных трансформаторов к высоковольтным сетям служат комплектные распределительные устройства (КРУ), которые собираются из стандартных шкафов с масляными выключателями, разъединителями, трансформаторами тока и напряжения, измерительными приборами, а также аппаратурой защиты и сигнализации. Для компенсации реактивной мощности печи служат конденсаторы, подключаемые параллельно индуктору. Часть из них включена постоянно, а другая (обычно 1/2-1/3 общей емкости) включается через магнитные пускатели или перекидные рубильники. Дополнительная емкость необходима в случае перехода на плавку другого состава расплава.



ПСН – переключатель ступеней напряжения; C_c – симметрирующая емкость; L – реактор симметрирующего устройства; $C-C_n$ – компенсирующая конденсаторная батарея; I – индуктор печи; *АРИС* – регулятор симметрирующего устройства; *АРИР* – регулятор режима; K_1-K_n – контакторы управления емкостью батареи C_1-C_n ; *ТТ1*, *ТТ2* – трансформаторы тока

Рисунок 3.11 – Схема питания индукционной канальной печи от силового трансформатора ПТ с симметрирующим устройством и регуляторами режима печи

На рис. 3.11 показана схема подключения индукционной канальной печи к трехфазной сети с помощью симметрирующего устройства. Оно состоит из реактора L с регулированием индуктивности методом изменения воздушного зазора в магнитной цепи и конденсаторной батареи C_c , подключаемых с индуктором по схеме треугольника. Силовые трансформаторы мощностью 1000, 2500 и 6300 кВА имеют 9-23 ступени вторичного напряжения с автоматическим регулированием мощности на желаемом уровне.

ИКП снабжаются регуляторами электрического режима *АРИР*, которые в заданных пределах обеспечивают поддержание напряжения, мощности P_n и $\cos \varphi_n$ путем изменения числа ступеней напряжения силового трансформатора и подключения дополнительных секций конденсаторной батареи. Регуляторы и измерительная аппаратура размещены в шкафах управления.

3.7.2 Индукционные тигельные печи. Индукционные тигельные печи емкостью более 2т и мощностью свыше 1000 кВт питаются от трехфазных понижающих трансформаторов с регулированием вторичного напряжения под нагрузкой, подключаемых к высоковольтной сети промышленной частоты. Печи выполняются однофазными, а для обеспечения равномерной нагрузки фаз сети в цепь вторичного напряжения подключают симметрирующее устройство.

Печи меньшей емкости и мощности питаются от однофазных трансформаторов мощностью 400-2500 кВА; при потребляемой мощности свыше 1000 кВт также устанавливают симметрирующие устройства, но на стороне высшего напряжения силового трансформатора. На рис. 3.12 приведена схема питания ИТП промышленной частоты и структурная схема ее автоматического регулирования.

Система регулирования для ИТП, работающей на частоте 50 Гц (рис. 3.12), включает в себя локальные регуляторы, осуществляющие переключения ступеней напряжения питающего трансформатора T и переключение емкостей в конденсаторных батареях печного контура и симметрирующего устройства.

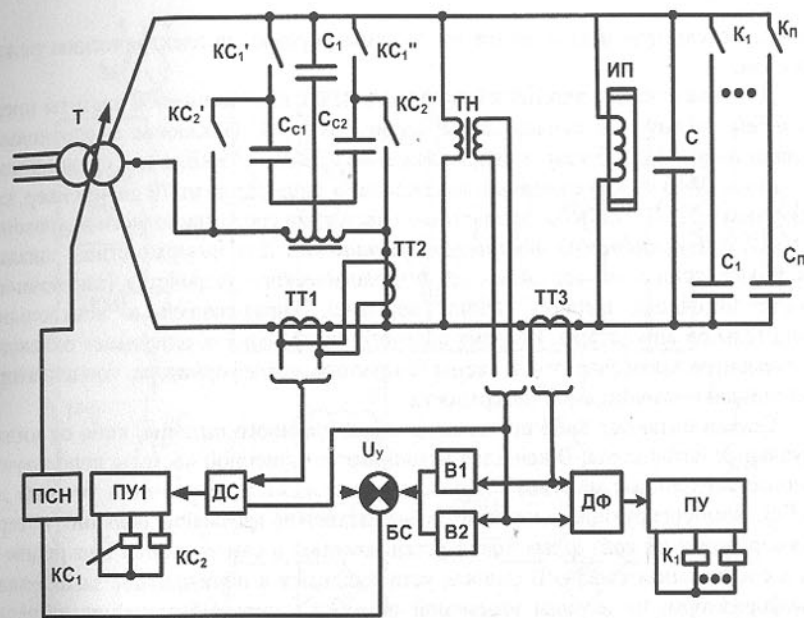


Рисунок 3.12 – Силовая схема индукционной тигельной печи, работающей на частоте 50 Гц, и структурная схема системы ее автоматического регулирования

Компенсирующая емкость печи ИТП имеет постоянную часть C и подключаемые контакторами K_1-K_n группы конденсаторов C_1-C_n . Симметрирующее устройство состоит из дросселя-делителя L , постоянно включенной емкости C_c и емкостей C_{c1} и C_{c2} , переключаемых контакторами схемы симметрирования KC'_1 , KC'_2 , KC''_1 , KC''_2 .

Датчик фазы *ДФ*, реагирующий на сигналы трансформатора напряжения *ТН* и трансформатора тока *ТТ3*, с помощью переключающего устройства *ПУ2* подбирает переменную емкость контура таким образом, чтобы с точностью $\pm 3\%$ сохранялось заданное значение коэффициента мощности. Коммутация конденсаторов осуществляется под нагрузкой. Переключатель ступеней напряжения *ПСН* получает команды от блока сравнения *БС*, на входы которого подаются напряжение уставки U_y и сигналы, пропорциональные току и напряжению печного контура, от выпрямителей *В1* и *В2*. Плавка ведется на ступени напряжения трансформатора, соответствующей его максимальной допустимой нагрузке по току.

Датчик симметрирования *ДС* получает сигнал от трансформаторов тока *ТТ1*, *ТТ2* и через переключающее устройство *ПУ1* воздействует на контакторы KC_1 и KC_2 , поддерживая симметрию загрузки питающей трехфазной сети по току с точностью $\pm 5\%$.

При отсутствии симметрирующего устройства или применении питающего трансформатора без переключения ступеней напряжения соответствующие ло-

кальные регуляторы исключаются из системы управления электрическим режимом печи.

Для компенсации реактивной мощности печей промышленной частоты предназначены косинусные конденсаторы типов КМ и КС (масляные и соволовые) мощностью от 14 до 75 квар и напряжением от 0,22 до 1,05 кВ, а для средних частот – типов ЭМВ и ЭСВ с водяным охлаждением мощностью от 70 до 400 квар, напряжением 0,375-2,0 кВ и со стандартными частотами среднечастотного диапазона.

3.7.3 Индукционные закалочные установки. Для поверхностной закалки используют установки, состоящие из технологического устройства (закалочного станка), источника питания, линии передачи, управляющей и контрольно-измерительной аппаратуры. Система водяного охлаждения обеспечивает охлаждение элементов высокочастотной схемы (индуктора, трансформатора, конденсатора и источника) и закаливаемой поверхности.

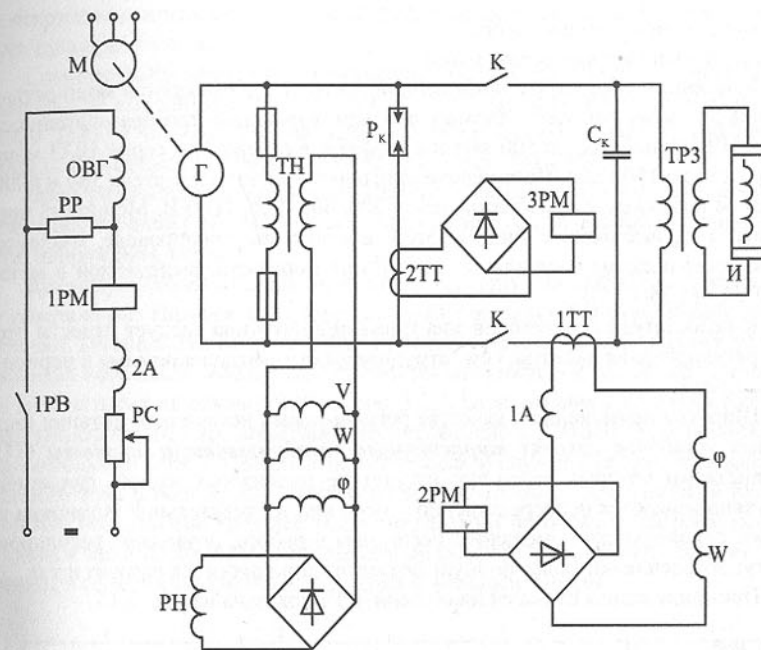
Станки питаются либо по схеме централизованного питания, либо от индивидуальных источников. В качестве источника повышенной частоты используют обычные синхронные машины с неявно выраженными полюсами (на частоты до 500 Гц). Компенсирующие конденсаторные батареи во избежание больших потерь в токопроводах от контурных токов устанавливают в самом станке или рядом с ним в специальном шкафу. В станках устанавливают и понижающие закалочные трансформаторы, на выводы вторичной обмотки которых закрепляют нагревательные индукторы. Понижающие трансформаторы применяются для согласования параметров индуктора с параметрами источника питания, поскольку напряжение генератора в несколько раз превышает напряжения на индукторе.

На рис. 3.13 приведена принципиальная электрическая схема питания индукционного закалочного станка от машинного преобразователя частоты типа ВПЧ.

Помимо источника питания *М-Г* схема включает в себя силовой контактор *К*, закалочный трансформатор *ТрЗ*, на вторичную обмотку которого включен индуктор *И*, компенсирующую конденсаторную батарею *С_к*, трансформаторы напряжения и тока *ТН* и *1ТТ*, *2ТТ*, измерительные приборы (вольтметр *V*, ваттметр *W*, фазометр ϕ) и амперметры тока генератора и тока возбуждения *1А*, *2А*, а также реле максимального тока *1РМ*, *2РМ*, *3РМ* для защиты источника питания от коротких замыканий, перегрузок и перенапряжений (вместе с разрядником *Р_к*).

3.7.4 Источники питания. Для питания индукционных установок для термообработки деталей (нагрев под горячую деформацию металла, для поверхностной закалки и прочих процессов) в большинстве случаев используют генераторы средней частоты *индукторного типа*, разработанные проф. В.П. Вологдиным (рис. 3.14).

Зубчатый ротор такого генератора выполнен с открытыми пазами и не имеет обмоток. В то же время на статоре генератора расположены две обмотки: обмотка возбуждения постоянного тока *ОВ*, подключенная к возбудителю, и рабочая обмотка переменного тока повышенной частоты *РО*, к которой подключается индуктор. При вращении ротора его зубцы и впадины поочередно становятся против паза статора, в котором находится обмотка возбуждения. Вследствие этого магнитный поток Φ , созданный обмоткой возбуждения, приобретает пульсирующий характер.



М – приводной двигатель; *Г* – генератор; *ТН*, *ТТ* – трансформаторы напряжения и тока; *К* – контактор; *1РМ*, *2РМ*, *3РМ* – реле тока; *Р_к* – разрядник; *А*, *V*, *W*, ϕ – измерительные приборы; *ТрЗ* – закалочный трансформатор; *ОВГ* – обмотка возбуждения генератора; *РР* – разрядный резистор; *РВ* – контакты реле возбуждения; *РС* – регулируемое сопротивление; *РН* – реле напряжения

Рисунок 3.13 – Принципиальная электрическая схема индукционной закалочной установки

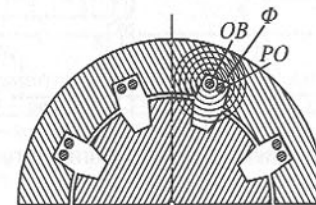


Рисунок 3.14 – Устройство электромашинного генератора повышенной частоты

Этот пульсирующий магнитный поток, пересекая витки рабочей обмотки, индуцирует в них ЭДС, частота которой определяется из выражения

$$f = z \cdot n / 60, \quad (3.24)$$

где z - число зубцов ротора;
 n - частота вращения, 1/мин.

Машинные генераторы повышенной частоты изготавливаются мощностью от десятков до тысяч киловатт. Изготавливают однокорпусные преобразователи серий ВПЧ, ОПЧ мощностью до 500 кВт и однофазные генераторы серии ВГО мощностью от 250 до 1500 кВт. Напряжение приводного электродвигателя 380 и 6000 В. Выходное напряжение преобразователей 200, 400, 800, 1600 В. Мощность преобразователя $P_{пр}$ выбирают с учетом потерь в индукторе, токопроводе, конденсаторах, которые в сумме составляют (25-35)% от мощности, выделяемой в металле P_m , т.е. $P_{пр} = (1,25-1,35)P_m$.

К недостаткам генераторов электромашинного типа следует отнести отсутствие регулирования частоты, чем затрудняется оптимизация режима в период нагрева деталей.

Широкое применение в качестве регулируемых источников питания индукционных установок находят **тиристорные преобразователи частоты** (ТПЧ), достоинствами которых являются: отсутствие подвижных частей, фундамента; они устанавливаются непосредственно у печи или нагревательной установки и не требуют специального помещения; бесшумны в работе, позволяют регулировать частоту; обеспечивают более полную автоматизацию процесса нагрева и т.п.

Принципиальная схема силовой цепи ТПЧ показана на рис. 3.15.

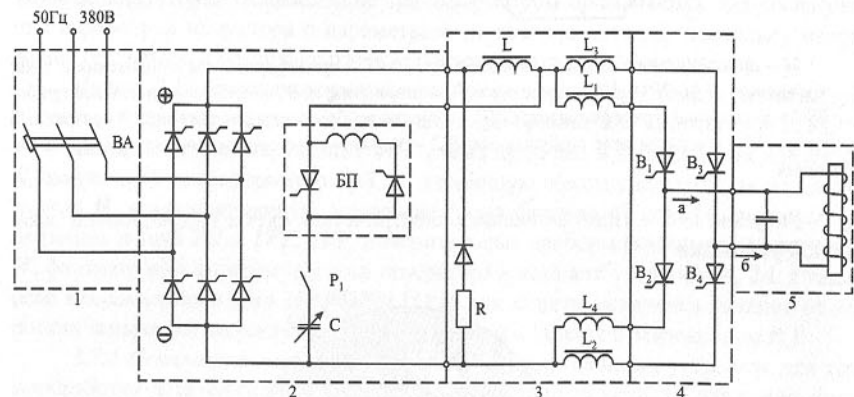


Рисунок 3.15 - Схема силовой цепи тиристорного преобразователя частоты

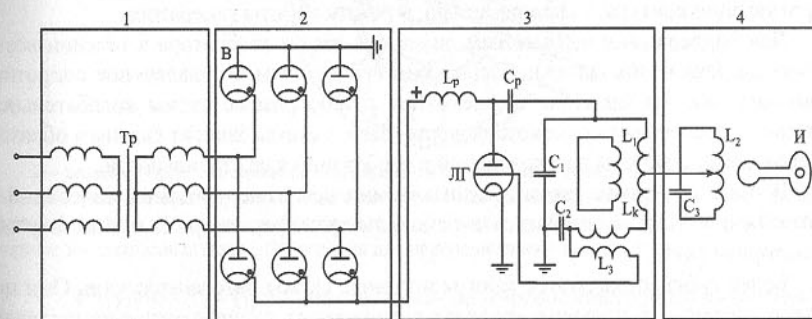
Выпрямительный блок 2 представляет собой трехфазный мостовой управляемый выпрямитель, преобразующий переменный ток промышленной частоты в постоянный ток, блок дросселей (реакторов) 3 осуществляет сглаживание выпрямленного тока, инвертор 4 преобразует постоянный ток в однофазный переменный повышенной частоты. В данном устройстве применен двухтактный инвертор, принцип действия которого основан на поочередном отпираии вентилей моста, в результате чего в нагрузке 5 будет проходить переменный ток, частота которого равна частоте коммутации управляемых вентилей инвертора. При открывании пары вентилей B_1-B_2 ток через нагрузку протекает в направлении a , а

при открывании вентилей B_3-B_4 - в направлении b . Блок пуска БП обеспечивает запуск преобразователя.

Серийно выпускаются тиристорные преобразователи частоты типов ТПЧ на номинальную выходную мощность 100, 250, 630, 800 кВт; и номинальную частоту 1000, 2400 и 4000 Гц; СЧГ на мощность 100 и 250 кВт и частоту 2400, 4000 и 10000 Гц. Выходные напряжения преобразователей 800 и 400 В.

Преобразователи оборудуются системой автоматического регулирования, которая обеспечивает автоматическое поддержание оптимальных значений мощности, напряжения, $\cos \phi$.

Для индукционного нагрева на высоких частотах (50-5000 кГц) служат **ламповые генераторы**. Питание генераторных ламп постоянным током повышает КПД установки. Питание лампы током промышленной частоты осуществляется только в установках небольшой мощности. Генераторы мощностью выше 20 кВт изготавливают в виде четырех отдельных блоков (рис. 3.16). Блок питания 1 включает в себя силовой трансформатор Tr , повышающий напряжение с 220-380 В до 6000-9000 В; выпрямительный блок 2 выполнен на тиратронах и служит для преобразования переменного тока в постоянный напряжением 9000-15000 В; генераторный блок 3 с одной или несколькими трехэлектродными лампами преобразует энергию постоянного тока в энергию электрических колебаний высокой частоты; нагрузочный блок 4 включает в себя трансформатор с индуктором и конденсатором.



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

Рисунок 3.16 - Схема лампового генератора

Высокочастотные ламповые генераторы бывают двух видов: с *независимым возбуждением* и с *самовозбуждением* (автогенераторы). В первых из них напряжение возбуждения на лампу подается от постороннего источника ЭДС, а во вторых - от собственной системы колебательных контуров через обратную связь. В индукционных установках обычно применяются генераторы с самовозбуждением.

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

Мощные генераторные лампы охлаждаются водой, а тиратроны выпрямительного блока – с помощью вентиляторов, обеспечивающих циркуляцию воздуха.

Серьезным недостатком лампового генератора является большая мощность потерь, основную часть которых составляет мощность, рассеиваемая на аноде. КПД лампового генератора не превышает обычно 0,6-0,7. Серийно изготавливают ламповые генераторы ВЧГ, ВЧИ, ВЧС на номинальную выходную мощность от 4 до сотен киловатт, рабочая частота 66, 440, 880, 1760 кГц. В ламповых генераторах мощностью 160 кВт и частотой 66 кГц (ВЧИЗ-160/0,66) используются две генераторные лампы ГУ-23А, работающие параллельно.

Для высокочастотного нагрева диэлектриков применяются ламповые генераторы на более высокие частоты (5,28-300 МГц). Они состоят в основном из тех же узлов, что и генераторы индукционного нагрева проводящих материалов (рис. 3.16). Отличие заключается в том, что нагрузкой является рабочий конденсатор, в котором находится нагреваемый материал. Так как в процессе нагрева емкость C_{II} (рис. 3.10) и активное сопротивление R_{II} изменяются, то меняется эквивалентное сопротивление контура, а следовательно, и режим работы генератора.

Для поддержания неизменным диапазона частот генератора в течении всего режима нагрева необходимо поддерживать неизменным эквивалентное сопротивление нагрузки. На практике применяются разнообразные схемы колебательной системы с обеспечением самовозбуждения. Выбор схемы зависит главным образом от необходимой частоты автоколебаний и требований к ее стабильности.

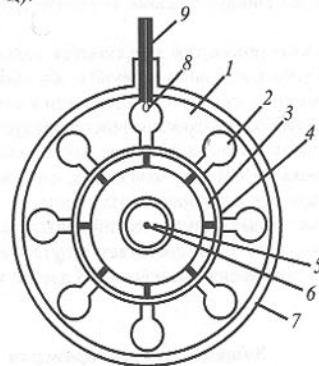
В одноконтурных схемах, используемых для генерирования колебаний с частотой до 1 МГц, применяется в основном трансформаторная или автотрансформаторная связь.

Более гибкими являются многоконтурные схемы автогенераторов. Они позволяют плавно и в широких пределах регулировать эквивалентное сопротивление контура без заметного падения его КПД. Однако они имеют несколько резонансных частот, что может вызвать переход генератора с одной частоты на другую, поэтому необходимо осуществлять обратную связь от вторичного контура с индуктивной связью между контурами. Плавное регулирование сопротивления нагрузки осуществляется за счет перемещения короткозамкнутой индуктивной катушки L_k (рис. 3.16).

В установках СВЧ-нагрева источниками концентрированного электромагнитного излучения служат *магнетроны* (рис. 3.17). Анодный блок магнетрона *1* представляет собой массивный медный цилиндр с центральным круглым сквозным отверстием и симметрично расположенными сквозными полостями *2*, являющимися объемными резонаторами. Каждый из резонаторов соединен щелью с центральным отверстием, в котором расположен катод *5*. Резонаторы образуют кольцевую колебательную систему, которая имеет несколько резонансных частот. При этих частотах на кольцевой колебательной системе укладывается несколько

стоячих волн от 1 до $N/2$ (N - число резонаторов, $N=5-40$). Наиболее приемлемым является вид колебаний, при котором число полуволн равно числу резонаторов (π - вид колебаний). Он так назван потому, что напряжения на двух соседних резонаторах сдвинуты по фазе на π . Для стабильной работы магнетрона необходимо, чтобы ближайшая резонансная частота колебаний системы значительно отличалась от рабочей частоты.

В магнетронах с одинаковыми резонаторами эта разница невелика. Ее можно увеличить введением связок в виде металлических колец *4*, одно из которых соединяет все четные, а другое – все нечетные ламели анода *3*, либо применением разнорезонаторной колебательной системы (четные резонаторы имеют одни размеры, нечетные – другие). В магнетронах движение электронов происходит в скрещенных постоянных электрическом, магнитном и электромагнитном СВЧ-поле (300 МГц - 300 ГГц).



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

Рисунок 3.17 - Принципиальная схема многорезонаторного магнетрона

Техника безопасности. При обслуживании лампового генератора и высокочастотных нагревательных устройств должны строго выполняться правила техники безопасности, разработанные для высоковольтных устройств промышленной частоты, и соблюдаться мероприятия по предохранению обслуживающего персонала от случайного прикосновения к токоведущим шинпроводам и приборам, находящимся под высоким напряжением как промышленной, так и высокой частоты. Несоблюдение этих правил может привести к ожогам и смертельным случаям.

Конструкция нагревательной установки должна исключать возможности случайного прикосновения к элементам, находящимся под высоким напряжением (конденсаторы, выводы первичной обмотки трансформатора и т.п.). Вторичная обмотка трансформатора и все металлические конструкции установки должны быть заземлены. Запрещается прикасаться к индуктору, находящемуся под напряжением, или менять деталь без его отключения. Санитарно-гигиеническими нормами ограничиваются напряженности магнитного и электрического полей в зоне расположения обслуживающего персонала (5 А/м и 20 В/м соответственно). Обычно эти нормы соблюдаются без применения специальных мер. В противном случае используют экранирование индуктора магнитопроводами или кожухами.

При эксплуатации установок с ламповыми генераторами должны выполняться следующие требования: надежное заземление всех кожухов блоков; устройство механических блокировок всех дверей; при наличии смотровых стекол в кожухах блоков покрытие металлическими сетками стекол во избежание прикосновения к токоведущим элементам и приборам при случайном растрескивании стекол и их выпадении. Должно быть предусмотрено устройство, контролирующее расход охлаждающей воды и автоматически выключающее установку при прекращении подачи воды или перегрева ее свыше допустимой температуры (50-60°C), а также релейная защита выключающая установку при перенапряжениях, токовых перегрузках и коротких замыканиях.

Для подавления радиопомех, создаваемых высокочастотной установкой, должно быть предусмотрено экранирование и фильтрация высокочастотных колебаний. Окна и вентиляционные проемы экранируются металлическими сетками, пропускающими свет и воздух.

Для уменьшения проникновения высокочастотных колебаний в питающую электрическую сеть применяют специально сконструированные сетевые фильтры, состоящие из катушек со стальными сердечниками и безиндуктивными конденсаторами, включенными по Г-образной двухзвенной схеме.

Эксплуатация лампового генератора разрешается только при полной его исправности. Персонал, обслуживающий установки, должен пройти обучение и инструктаж на рабочем месте. Характер индивидуальных средств защиты определяется конкретным типом процесса.

Для СВЧ-установок необходимо дополнительно предусмотреть, чтобы дверца в рабочей камере, служащая для загрузки и выгрузки нагреваемых изделий, была снабжена специальными устройствами, препятствующими СВЧ-излучению. Так как всякая прорезь в стенке резонатора, прерывающая путь тока, является источником излучения, то дверца рабочей камеры должна иметь по всему периметру надежный электрический контакт из кнопок или пластинчатых пружинок. Дальнейшее ослабление излучения достигается путем использования четвертьволновых дросселей и прокладок из поглощающего материала. В дверце может быть расположено окно из металлизированного стекла.

Вопросы для самопроверки

1. На чем основан индукционный нагрев проводящих тел?
2. От чего зависит глубина проникновения электромагнитной волны в металлическое тело?
3. От чего зависят КПД и cosφ индукционных установок?
4. Как классифицируются и где применяются индукционные установки?
5. Каковы принципы работы и конструктивное исполнение индукционных канальных печей?
6. Каковы достоинства и недостатки индукционных канальных печей?
7. Какое электрооборудование применяется для подключения индукционной единицы канальной печи к источнику питания?
8. В каких индукционных печах и с какой целью используют симметрирующее устройство?
9. Из каких основных элементов состоит индукционная тигельная печь?
10. Каковы достоинства и недостатки индукционных тигельных печей?
11. Что является источниками питания тигельных индукционных печей?
12. Как повышают cosφ индукционных печей?
13. Каковы достоинства и недостатки индукционных нагревательных установок?
14. Что такое глубинный и поверхностный нагрев?
15. Каковы преимущества индукционной закалки по сравнению с закалкой при печном сквозном нагреве?
16. Какие имеются виды поверхностной закалки?
17. Какие источники служат для питания индукционных нагревательных установок?
18. Из каких блоков состоит тиристорный преобразователь частоты?
19. Как работает генератор индукторного типа?

20. В каких случаях применяются ламповые генераторы? Из каких блоков они состоят?
21. Каковы недостатки лампового генератора?
22. На чем основан диэлектрический нагрев материалов? От чего зависит удельная мощность диэлектрических потерь?
23. Как классифицируются установки диэлектрического нагрева?
24. Из каких основных элементов состоит высокочастотный генератор для диэлектрического нагрева?
25. В чем особенность СВЧ-установок? Где они применяются?
26. Что является источником питания для СВЧ-установок?
27. Какие мероприятия применяют для обеспечения безопасного обслуживания индукционных установок?

4 УСТАНОВКИ И ПЕЧИ ДУГОВОГО НАГРЕВА

4.1 Электрическая дуга

4.1.1 Общие сведения об электрической дуге. Электрическая дуга была открыта в 1803 г. В. В. Петровым. Он показал, что в дуге развивается очень высокая температура и в дуге можно плавить любые вещества, в частности металлы, и даже восстанавливать их из окислов, нагревая в присутствии углеродистых восстановителей. Кроме того, ему удалось получить сваривание металлов в электрической дуге.

Электрической дугой называется один из видов самостоятельного электрического разряда в газе или в парах металла, характеризующийся высокими плотностями тока (порядка $10^2 - 10^6$ А/см²), температурой $(3-5) \cdot 10^3$ К и выше и малым значением катодного падения напряжения (до 15 В).

Электрический ток в газах вызывается перемещением трех основных видов заряженных частиц - электронов, положительных и отрицательных ионов, причем основную роль в газовом разряде играют электроны.

В воздухе в обычных условиях количество свободных ионов и электронов мало, поэтому для создания разряда необходимо ионизировать промежуток между электродами. Процесс возникновения в нейтральном газе заряженных частиц носит название ионизации.

Ионизация газа происходит в результате удаления из нейтральных частиц одного или нескольких электронов. Это удаление требует затраты энергии извне на преодоление кулоновых сил притяжения между электроном и положительно заряженным ионом.

Носителями заряда в электрической дуге могут быть электроны, вышедшие из электрода (катода). Чтобы вывести электрон из металла, необходимо повысить его энергию. Это может быть достигнуто следующими способами: наложением мощного электрического поля (автоэлектронная эмиссия); повышением температуры электрода (термоэлектронная эмиссия).

Автоэлектронная эмиссия - вырывание электронов с поверхности электрода электрическим полем напряженностью $10^6 - 10^7$ В/см (при холодных электродах).

Термоэлектронная эмиссия - вырывание электронов с поверхности электрода (катода) в результате его разогрева за счет бомбардировки ионами. Плотность тока термоэлектронной эмиссии зависит от температуры и материала катода. С увеличением температуры ток эмиссии быстро возрастает.

Электрическая дуга (рис. 4.1) состоит из следующих элементов: катодного пятна 1, катодной области 2 (где скапливаются вылетевшие из катодного пятна электроны), столба дуги 3 (он занимает почти всю длину дуги), анодной области 4 (состоящей из слоя электронов и положительных ионов).

Катодное пятно, является источником эмиссии первичных электронов. Плотность тока в катодном пятне определяется как автоэлектронной, так и термоэлектронной эмиссиями.

Катодная область по протяженности приблизительно равна длине свободного пробега электрона, что при атмосферном давлении составляет около 10^{-7} м.

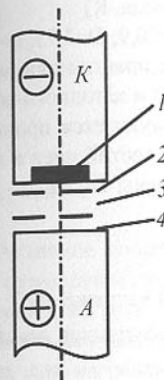


Рисунок 4.1 - Элементы дуги

3) падение напряжения в анодной области U_a (2-20В), затрачиваемое на преодоление объемных зарядов и нагрев анода.

Полное падение напряжения между электродами:

$$U_d = U_a + U_k + E_{ст} \cdot l_{ст}, \quad (4.2)$$

где $E_{ст}$ - напряженность электрического поля (линейный градиент напряжения) дугового столба, В/м;

$l_{ст}$ - длина столба дуги, м.

4.1.2 Электрическая дуга постоянного тока. Дуга постоянного тока применяется в вакуумных дуговых печах, для ряда сварочных установок и в некоторых плазмотронах.

Зависимость между напряжением дуги и её током называют *вольт-амперной характеристикой* (ВАХ) дуги.

Статическая ВАХ свободно горящей дуги в области небольших величин тока (до 100А) является падающей (участок I, рис.4.2), так как при росте величины тока, сопровождаемом увеличением диаметра канала дуги, сопротивление дуги снижается. В этом случае вольт-амперная характеристика с достаточной для практических целей точностью описывается уравнением Айртона:

$$U_d = A + B \cdot I_d + \frac{C + D \cdot I_d}{I_d^n}, \quad (4.3)$$

где A, B, C, D - постоянные, зависящие от материала электродов, состава газа и условий охлаждения дуги;

l_d - длина дуги;

Протяженность анодной области несколько больше (примерно $10^{-5} - 10^{-6}$ м). Вследствие малости катодной и анодной областей общую длину дуги можно считать равной длине столба:

$$l_d \doteq l_k + l_{ст} + l_a \approx l_{ст} \quad (4.1)$$

Напряжение в электрической дуге делится на три характерные части:

1) падение напряжения в катодной области U_k (8-15В), затрачиваемое на эмиссию электронов из катода;

2) падение напряжения в столбе дуги $U_{ст}$ (от нескольких вольт до нескольких киловольт в зависимости от длины и условий горения дуги), затрачиваемое на перемещение зарядов через газовый промежуток $l_{ст}$;

$n = 2,62 \cdot 10^{-4} T_a$ (T_a – температура кипения материала анода, К)

Для угольных электродов, например, $A=59,5$; $B=1,25$; $C=20,9$; $D=3,75$; $n=0,985$.

Для сильноточных дуг ($I > 100$ А) напряжение на дуге практически не зависит от силы тока (участок 2, рис. 4.2), так как сумма анодного и катодного падений напряжения постоянна, площадь сечения столба дуги увеличивается пропорционально силе тока, а проводимость изменяется мало, поэтому третий член в правой части (4.3) становится исчезающе малым и им можно пренебречь. Тогда

$$U_d = a + v \cdot I_d, \quad (4.4)$$

где $a = U_a + U_k$ - сумма анодного и катодного падений напряжения;

v - градиент потенциала в столбе дуги, являющийся функцией температуры, давления, состава газовой среды.

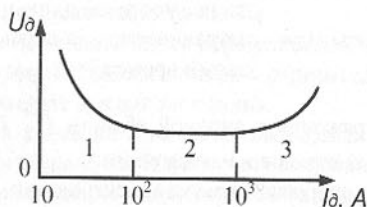


Рисунок 4.2 – Статическая вольт-амперная характеристика дуги

При высокой плотности тока в электроде статическая характеристика становится возрастающей (участок 3, рис. 4.2). Возрастающие характеристики получаются также при интенсификации охлаждения столба дуги струей газа (например, в плазмотронах).

Зажигание и устойчивость дуги постоянного тока. Зажечь дугу можно тремя способами:

- 1) касанием электродов и последующим нарушением контакта между ними;
- 2) электрическим пробоем газового промежутка между электродами подачи высокого напряжения или импульса высокого напряжения, достаточного для зажигания дуги;
- 3) повышением проводимости газового промежутка между электродами за счет внешнего источника ионизации (подачей высокоионизированной плазмы с помощью третьего электрода, облучением газа рентгеновскими, ультрафиолетовыми или γ -лучами и т.п.).

Первый способ используют для возбуждения дуги в начале работы в дуговых печах, для возбуждения сварочной дуги; второй – в некоторых видах сварки и электроимпульсной обработке; третий – применяется очень редко.

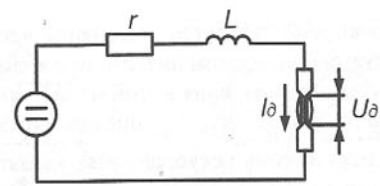


Рисунок 4.3 – Схема замещения электрической цепи дуги постоянного тока

Активное сопротивление r и индуктивность L схемы замещения рис.4.3 равны суммарным активным и индуктивным сопротивлениям всех участков электрической цепи дуги.

В тех случаях, когда дуга используется в качестве полезной нагрузки, например, для нагрева или плавления материалов или для освещения, к дуге предъявляются требования устойчивости её горения. Под устойчивым горением дуги подразумевают такой её режим, при котором она может гореть длительное время, не угасая и не переходя в другие формы разряда.

Для горения дуги необходимо, чтобы напряжение, подведенное к разрядному промежутку было равно такому его значению, которое по вольт-амперной характеристике дуги отвечает току, протекающему через эту дугу. Математически условие устойчивого горения дуги может быть представлено неравенством:

$$\frac{dU_d}{dI_d} < \frac{dU_p}{dI_d}, \quad (4.5)$$

где U_p , U_d , I_d - напряжение, подведенное к разрядному промежутку, напряжение на дуге и ток дуги соответственно.

Иными словами, это соотношение сводится к тому, что крутизна характеристики $U_p = f(I_d)$ должна быть больше, чем крутизна характеристики $U_d = f(I_d)$.

Способы регулирования режима дуги. Регулирование электрической цепи дуги постоянного тока с источником питания неизменного напряжения может производиться тремя способами: регулированием напряжения источника питания; регулированием сопротивления в цепи дуги; регулированием напряжения дуги путем изменения её длины.

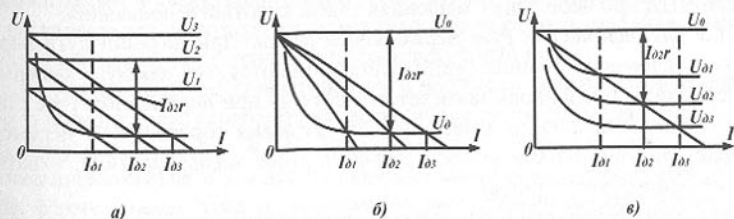


Рисунок 4.4 – Способы регулирования режима дуги

На рис. 4.4,а показано, что путем изменения напряжения дуги источника питания можно в достаточно широком диапазоне изменять ток дуги при постоянном значении активного сопротивления в этой цепи и при постоянной длине дуги.

Значения токов дуги $I_{Д1}$, $I_{Д2}$, $I_{Д3}$ определяются здесь горизонтальными координатами точек пересечения искусственных характеристик источника питания $U_p = f(I_D)$ и вольт-амперной характеристики дуги $U_D = f(I_D)$.

Теоретически при таком способе регулирования предельно низким напряжением источника питания, при котором возможно горение дуги, будет такое его напряжение, когда наклонная характеристика $U_p = f(I_D)$ окажется касательной к характеристике дуги. При дальнейшем снижении напряжения дуга гореть не будет.

Регулирование напряжения источника питания в сторону его увеличения неограниченно. Однако при этом быстро увеличивается мощность источника.

Второй способ регулирования электрической дуги постоянного тока осуществляется путем регулирования сопротивления балластного резистора, включенного последовательно с дугой. Как показано на рис. 4.4,б, уменьшение этого сопротивления вызывает уменьшение угла наклона внешней характеристики источника питания и как следствие увеличения тока дуги.

В процессе регулирования дуги постоянного тока по третьему способу каждой новой длине дуги отвечает своя вольт-амперная характеристика и новая точка пересечения выбранной характеристики дуги с той же наклонной внешней характеристикой источника питания. По мере удлинения дуги увеличивается напряжение дуги, и как показано на рис. 4.4,в уменьшается ток дуги. И в этом случае предельно допустимое удлинение дуги, при котором окажется возможным её зажигание, будет достигнуто в том случае, когда вольт-амперная характеристика дуги окажется касательной ко внешней характеристике источника питания.

Рассмотренные способы регулирования электрической цепи дуги постоянного тока и вопросы устойчивости её горения изложены здесь применительно к маломощным дугам с током, не превышающим немногие десятки ампер.

В электрических цепях промышленных установок для дуговой электросварки рабочие токи дуг измеряются сотнями ампер, а в установках вакуумной дуговой плавки эти токи составляют тысячи и десятки тысяч ампер. Потери энергии в таких установках имеют существенное значение. В связи с этим для промышленных установок используют специальные источники питания с крутопадающими внешними характеристиками, позволяющие иметь относительно высокий электрический КПД при небольших значениях токов короткого замыкания.

4.1.3 Электрическая дуга переменного тока. При питании дуги переменным током условия её горения существенно меняются, так как дуга дважды в течение периода гаснет и вновь зажигается. Поэтому при переменном токе статическая характеристика дуги не имеет смысла. Условия горения дуги переменного тока характеризуют динамические вольт-амперные характеристики, охватывающие время одного полупериода.

Дуга горит устойчиво и непрерывно, если термическая инерция столба дуги и частота тока таковы, что в течение одного полупериода проводимость столба дуги практически постоянна.

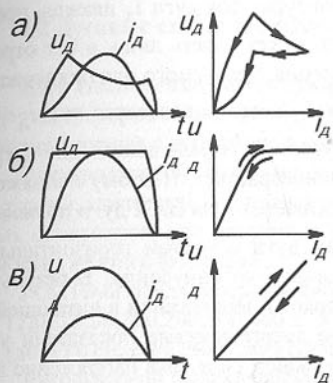


Рисунок 4.5 – Формы динамических характеристик дуг переменного тока

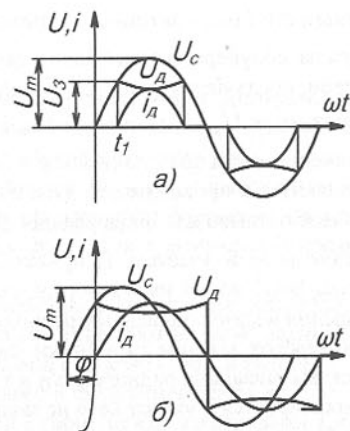


Рисунок 4.6 – Графики напряжения и тока электрической дуги

Характерные осциллограммы тока i_D и напряжения U_D на дуге и вольт-амперная характеристика дуги $U_D = f(i_D)$ для одного полупериода при разных условиях горения дуги показаны на рис. 4.5. В зависимости от силы тока и термической инерции столба дуги, связанной с интенсивностью охлаждения столба, форма кривой напряжения и вольт-амперная характеристика изменяются очень резко.

Для слаботочных дуг и дуг с интенсивным охлаждением характерна осциллограмма напряжения дуги с ярко выраженным пиком зажигания (рис.4.5,а). Когда ток равен нулю, дуга гаснет. В следующем полупериоде, когда напряжение на электродах превысит напряжение зажигания, дуга возникнет вновь. Осциллограммы и вольт-амперная характеристика этого типа характерны для слаботочных дуг в сталеплавильных печах, особенно в начале расплавления, когда дуга горит на холодную шихту.

При больших силах тока термическая инерционность и разогрев столба дуги от электродов настолько значительны, что гистерезис в динамической характеристике и пик зажигания практически могут исчезнуть. Напряжение на дуге может иметь трапециидальную или даже прямоугольную форму (рис. 4.5,б). Такая форма осциллограммы и характеристик имеется у дуг высокого напряжения, горящих между раскаленными электродами, у ртутных дуг высокого давления, у мощной дуги сталеплавильной печи, горящей на расплавленный металл.

Если термическая инерция столба дуги настолько велика, что в течение полупериода проводимость столба практически не меняется, то напряжение на дуге и ток дуги синусоидальны (рис. 4.5,в). Этот случай характерен для сильноточных дуг в руднотермической печи и для дуг в сталеплавильной печи, горящих на шлак.

На форму кривых тока и напряжения дуги сильно влияют параметры её электрического контура и, в частности, его индуктивность. При отсутствии ин-

дуктивности (чисто активное сопротивление контура), ток дуги i_d дважды прерывается за полупериод (рис. 4.6,а), так как дуга может гореть лишь в тот отрезок времени, когда напряжение U_c больше напряжения, требуемого для поддержания горения дуги U_d . С момента зажигания дуги t_1 в цепи появляется ток i_d . При увеличении силы тока ионизация в области дугового разряда вследствие нагрева усиливается, и проводимость дуги существенно возрастает. Поэтому напряжение U_d , необходимое для поддержания дуги, уменьшается и на ВАХ дуги появляется горизонтальный участок. Напряжение мощной дуги с учетом горизонтального участка ВАХ может иметь форму, сильно отличную от синусоиды. В результате появления несинусоидальных периодических токов и напряжений в питающей сети возникают высшие гармоники, снижающие энергетические показатели установки, вызывающие радиопомехи и т.п. При большой силе тока напряжение дуги стабилизируется и уже от него не зависит.

При наличии в цепи индуктивного сопротивления ток и напряжение дуги изменяются по кривым, представленным на рис.4.6,б. Когда напряжение сети снизится до нуля, ток в дуге будет протекать за счет энергии, накопленной в индуктивности цепи. В момент перехода тока i_d через нуль напряжение сети U_c превысит напряжение зажигания U_3 и дуга вновь загорится. В данном случае ток дуги будет протекать непрерывно, а кривая её напряжения представляет собой ряд прямоугольников без разрыва.

Таким образом, наличие индуктивности в цепи горячей дуги стабилизирует последнюю.

Условие непрерывного горения дуги заключается в том, чтобы при переходе тока через нуль напряжение источника питания было равно или превосходило напряжение зажигания дуги, т.е.

$$U_d = U_m \cdot \sin \varphi \geq U_3 \quad (4.6)$$

где U_m - амплитудное значение напряжения источника питания.

Дуга будет гореть непрерывно, если $\cos \varphi \leq 0,85$.

В электропечных установках мощностью до 10 МВ·А для стабилизации дуги увеличивают индуктивность цепи включением реактора. При мощности трансформатора свыше 10 МВ·А, а также при работе печи на жидкой завалке, искусственно-го увеличения индуктивности не требуется, поэтому реакторы не применяют.

Вопросы для самопроверки

1. Какие процессы протекают в электрической дуге?
2. Что такое вольт-амперная характеристика дуги постоянного тока и какой ее вид?
3. Какими способами можно зажечь дугу постоянного тока?
4. В каком случае дуга постоянного тока будет гореть устойчиво?
5. Какими способами можно регулировать ток дуги постоянного тока?
6. В чём особенность горения дуги переменного тока?
7. При каком коэффициенте мощности дуга будет гореть устойчиво?
8. В каких случаях увеличивают индуктивность для стабилизации дуги?

4.2 Дуговые сталеплавильные печи

4.2.1 Назначение, конструкция и работа дуговых печей. Дуговыми называют электротермические установки, источником тепла в которых является дуга, свободно горящая в атмосфере воздуха, в газовой среде или вакууме.

Электродуговой нагрев широко используется для плавки высококачественных сталей, цветных и тугоплавких металлов, производства ферросплавов и плавящихся огнеупоров, для получения некоторых продуктов в химической промышленности (желтого фосфора).

ГОСТами предусмотрены дуговые сталеплавильные печи емкостью 0,5; 3,0; 6,0; 12,0; 25; 50, 100, 200, 300, 400 т. Условно их подразделяют на печи: *малой емкости* (до 6 т), *средней емкости* (12-50 т) и *большой емкости* (100 т и выше).

Дуговые печи бывают прямого, косвенного и смешанного нагрева.

В печах *прямого нагрева* (рис.4.7,а) дуга 2 горит между электродами 1 и расплавленным металлом 3, который является одним из участков электрической цепи. Тепло передается от дуги непосредственно металлу, поэтому в печах прямого нагрева плотность потока энергии к металлу может достигать очень больших значений. Такими печами выполняются сталеплавильные, вакуумные и плазменные.

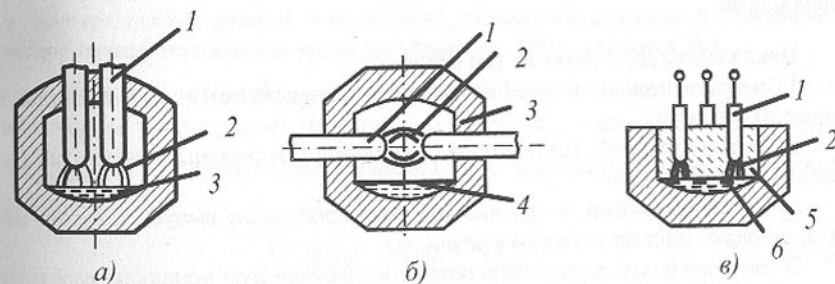


Рисунок 4.7 – Схемы дугового нагрева

В печах *косвенного нагрева* (рис.4.7,б) дуга 2 горит между электродами 1, а расплавленному металлу 4 тепло от дуги передается обычно излучением (в отдельных случаях – частично конвекцией и теплопроводностью).

В печах *смешанного нагрева* (рис.4.7,в) дуга 2 горит в газовой полости внутри расплавленной шихты 5, включенной последовательно или параллельно с дугой; расплав 6 собирается в подине. В этих печах тепло выделяется как в дуге, так и в электрическом сопротивлении шихты (их называют также дуговыми печами сопротивления). По способу загрузки дуговые сталеплавильные печи (ДСП) разделяются на печи с боковой загрузкой через рабочее окно и печи с верхней загрузкой.

На рис.4.8 представлен примерный график изменения мощности и напряжения ДСП при выплавке стали (для печи средней ёмкости).