

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

# **ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ**

**Конспект лекций**

по дисциплине «Электротехнологические установки и освещение»

**Раздел: Установки нагрева, нагревательные и плавильные печи**

Иркутск 2010

УДК 621.311  
ББК 31.2  
Э 45

С о с т а в и т е л ь :

**Г.Н. Ополева**, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта»

Р е ц е н з е н т ы :

**М.О. Умнова**, доцент кафедры «Электротехника и электроснабжение» ИрГТУ;

**В.В. Потапов**, доцент кафедры «Электротехника и электроснабжение» ИрГТУ

**Электротехнологические установки** : конспект лекций / сост.  
**Э 45** Г.Н. Ополева. – Иркутск : ИрГУПС, 2010. – 74 с.

Конспект лекций содержит описание принципов действия, конструкции, области применения плавильных и нагревательных электротехнологических установок. Рассмотрены режимы работы электроустановок, основные технические характеристики, влияние на системы электроснабжения.

Конспект лекций предназначен для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 190401.65 «Электроснабжение железных дорог» по специализации 190401.65.03 «Электроснабжение предприятий железнодорожного транспорта».

Ил. 42. Табл. 13. Библиогр.: 5 назв.

**УДК 621.311**  
**ББК 31.2**

© Иркутский государственный университет  
путей сообщения, 2010

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

**Электротехнологическими установками (ЭТУ)** называются установки, в которых электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии с одновременным выполнением технологического процесса.

По характеру действия на обрабатываемое вещество все ЭТУ условно делятся на электротермические, электрохимические, электромеханические и электрокинетические.

Классификация ЭТУ представлена на рис. 1.1.

**Электротермические установки** – это установки, в которых электрическая энергия служит для нагрева материалов и изделий. В электротермических установках преобразование электрической энергии в тепловую производится следующими способами:

- нагрев сопротивлением;
- индукционный нагрев;
- диэлектрический нагрев;
- дуговой нагрев;
- электронно- и ионно-лучевой нагрев;
- плазменный нагрев;
- лазерный нагрев.

**В электрохимических и электрофизических установках** используется электрохимическое действие тока. К ним относятся: электролизные; электрохимические; электроэрозионные; электрохимико-механические установки.

**В электромеханических установках** действие электрического тока приводит к каким-то механическим усилиям. К ним относятся: магнитоимпульсные; электромагнитные; электрогидравлические; ультразвуковые.

**Электрокинетические установки** – установки, в которых используется электронноионная технология, включающая в себя: электризацию вещества, формирование движения в электрическом поле и др. Развитие получили следующие виды установок. *Электрогазоочистка* – выделение из газового (воздушного) потока твердых тел или жидких частиц. *Электросепарация* – разделение многокомпонентных систем на составные части. *Электроокраска* – нанесение твердых или жидких покрытий на изделия и др.

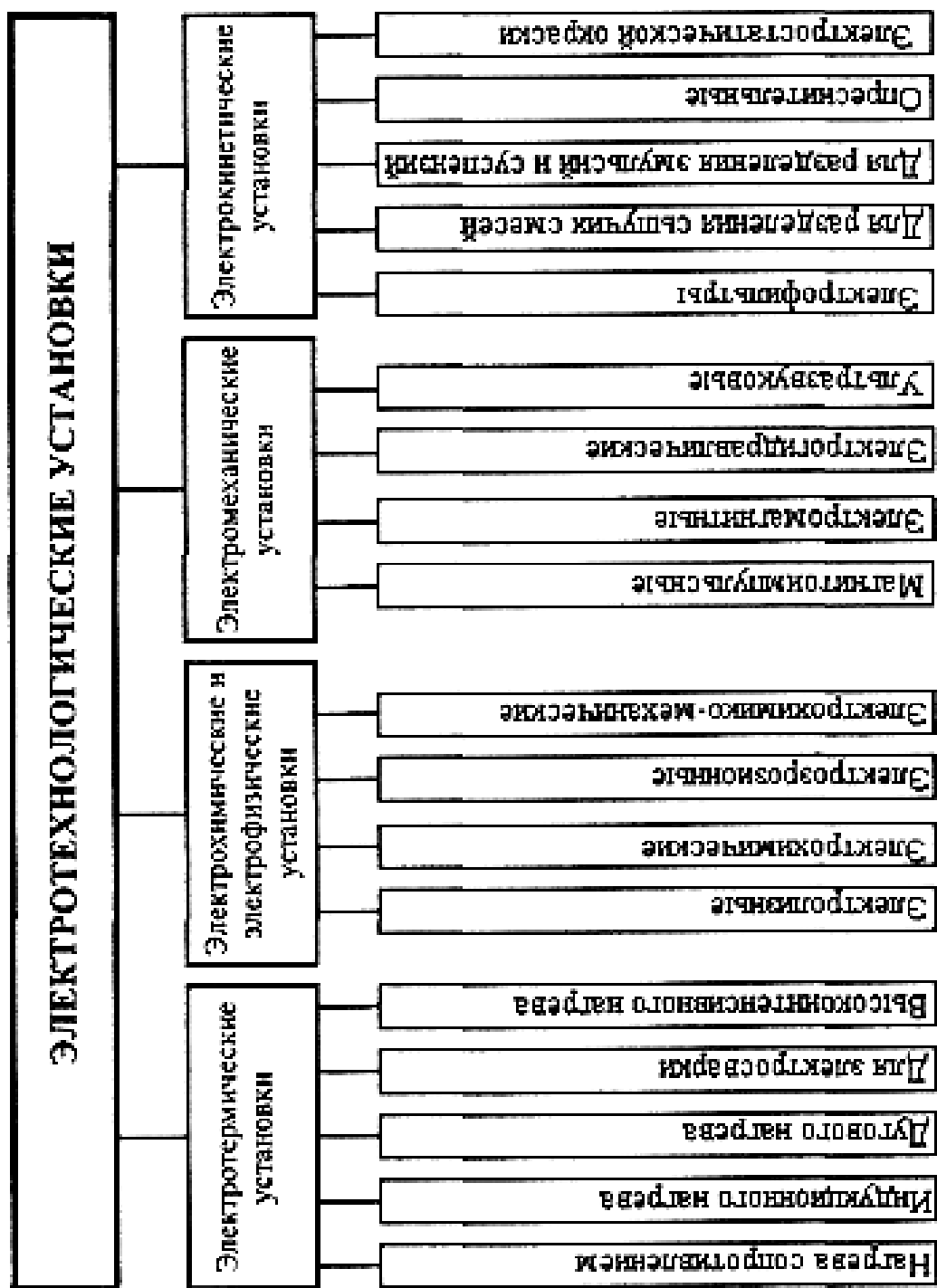


Рис. 1.1. Классификация электротехнологических установок

## 2. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НАГРЕВА СОПРОТИВЛЕНИЕМ

### 2.1. Общие сведения

Нагрев сопротивлением происходит за счет выделения теплоты в проводящем материале при протекании по нему электрического тока. Этот вид нагрева основан на законе Джоуля-Ленца. Выделяемая в проводнике тепловая энергия  $Q$  в ккал пропорциональна квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени протекания тока:

$$Q = 0,00024I^2Rt \text{ (ккал)},$$

где  $Q$  – количество выделяющейся теплоты, ккал;

$I$  – ток, А;

$R$  – сопротивление, Ом;

$t$  – время, с.

Активная мощность, выделяемая при протекании тока:

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

где  $P$  – мощность, выделяющаяся в проводнике, Вт;

$U$  – напряжение, В;

$F$  – площадь сечения, м<sup>2</sup>;

$\rho$  – удельное сопротивление проводника, Ом·м;

$l$  – длина проводника, м.

Выделяемая в проводнике тепловая энергия может быть использована непосредственно для нагрева самого проводника, который в этом случае является нагреваемым телом (принцип прямого нагрева). При косвенном нагреве энергия нагрева передается специальными проводниками (нагревателями), по которым проходит электрический ток к другим изделиям, подлежащим нагреву путем конвекции и излучения тепловой энергии. В обоих случаях нагреваемый объект может быть в твердом, жидком или газообразном состоянии.

### 2.2. Электрические печи сопротивления

Электрические печи сопротивления (ЭПС) применяются в машиностроении, металлургии, легкой и химической промышленности, строительстве, коммунальном и сельском хозяйстве и др.

По назначению ЭПС подразделяются:

- на нагревательные, которые служат для обработки материалов (нагрева, термической, химико-термической и вакуумной обработки, а также обжига, сушки, спекания различных металлических и керамических материалов);
- плавильные, предназначенные для плавки металлов.

Достоинства печей:

- возможность получения в печной камере любых температур до 3000 °С;
- достаточно равномерный нагрев изделия путем соответствующего расположения нагревателей по стенкам печной камеры или применением принудительной циркуляции печной атмосферы;
- легкость автоматического управления мощностью, а следовательно, и температурным режимом печи;
- удобство механизации и автоматизации печей;
- компактность.

### 2.2.1. Нагревательные печи

#### Классификация нагревательных печей.

1. По принципу действия: косвенного и прямого действия. В ЭПС *косвенного действия* электрическая энергия превращается в тепловую в специальных нагревателях, а затем передается в рабочее пространство посредством теплопроводности, конвекции и излучения. В ЭПС *прямого действия* нагреваемое тело включается непосредственно в электрическую цепь. Нагревательные элементы в печах косвенного действия и нагреваемые тела, включаемые в цепь ЭПС прямого действия, могут быть проводниками первого и второго рода.

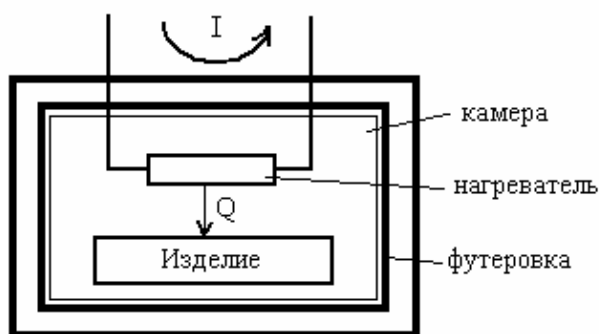
2. По уровню достигаемых температур печи подразделяются: на низкотемпературные (до 650 °С); среднетемпературные (до 1250 °С); высокотемпературные (выше 1250 °С).

3. По режиму работы: периодического и непрерывного действия.

4. По конструктивному исполнению печи периодического действия могут быть камерными, шахтными, колпаковыми, элеваторными. Печи непрерывного действия – конвейерные, рольганговые, карусельные, с шагающим подом, барабанные, протяжные.

#### Электropечи сопротивления с нагревательными элементами периодического действия.

Печи с нагревательными элементами (рис. 2.1) представляют собой футерованную камеру, в которой размещены нагреватели и обрабатываемое изделие. По нагревателю пропускают электрический ток, температура нагревателя повышается, тепло от нагревателя передается нагреваемому изделию.



**Рис. 2.1. Устройство электропечи сопротивления с нагревательными элементами периодического действия**

**Футеровка.** В низкотемпературных печах футеровка содержит только теплоизоляционный слой, а жесткость футеровки обеспечивается двумя связанными между собой внутренним и внешним каркасами.

В среднетемпературных печах в футеровке появляется огнеупорный слой, выполненный из легковесных волокнистых огнеупоров.

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

**Нагревательные элементы (НЭ).** В низко- и среднетемпературных печах с температурой до 800 °С НЭ выполняются из фехраля и константана, с температурой до 100 °С – из нихрома. Нихромы представляют собой сплав никеля (75–78 %) и хрома (около 25 %); фехрали – сплав железа (73 %), хрома (13 %), алюминия (4 %); хромоникелевые жаропрочные стали – сплав железа (до 61 %), хрома (22–27 %), никеля (17–20 %).

В высокотемпературных печах используются неметаллические нагревательные элементы: карборундовые; угольные; графитовые или металлические. Карборундовые получают при спекании кремнезема и угля. Металлические выполняются из тугоплавких металлов (молибдена, тантала, вольфрама и др.). Во избежание растрескивания неметаллические нагревательные элементы должны разогреваться постепенно при малой мощности, что требует применения средств регулирования подводимого напряжения.

По форме среднетемпературные НЭ выполняются в виде зигзагов, проволочных и ленточных, или спиралей, а высокотемпературные – в виде стержней круглого или квадратного сечения и труб.

Для низкотемпературного нагрева широко применяются трубчатые электронагреватели – ТЭНы, которые представляют собой металлическую трубку, заполненную теплопроводным электроизоляционным материалом с электронагревательной спиралью. ТЭНы электробезопасны, могут работать в любой среде, стойки к вибрациям. Мощность ТЭНов до 15 кВт, напряжение до 380 В, ресурс до 40 тыс. ч, рабочая температура до 730 °С.

**Основные элементы и конструкция печей периодического действия.** На рис. 2.2 представлены колпаковые, элеваторные, камерные и шахтные печи, которые отличаются расположением и материалом НЭ, способами установки обрабатываемых изделий в камеру печи, устройством футеровки и т.д., а также механизмами передачи тепловой энергии от НЭ к изделию.

В низкотемпературных печах основным механизмом передачи тепла является конвенция (тепло передается потоком циркулирующего воздуха). Для интенсификации процесса теплопередачи печи снабжаются вентиляторами.

В средне- и высокотемпературных печах основное тепло от нагревателя к изделию передается излучением в форме электромагнитных волн. В таких печах необходимо наличие оптической связи между НЭ и изделием.

**Колпаковая печь** – печь периодического действия с открытым снизу подъемным нагревательным колпаком и неподвижным стендом (рис. 2.2 а). Нагреваемые детали (садка) 5 с помощью подъемно-транспортных устройств помещаются на стенд. 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 НЭ осуществляется с помощью гибких кабелей и штепсельных разъемов. По окончании нагрева электропитание колпака отключается и он переносится на соседний стенд, где уже установлена очередная загрузка для нагрева. Остывание садки происходит на стенде под жароупорным муфелем, что обеспечивает необходимую скорость остывания.

В колпаковых печах при каждом цикле теряется лишь теплота, запасенная в муфеле и кладке стенда, что составляет 10–15 % от теплоты, запасенной в кладке колпака. Мощность колпаковых печей достигает нескольких сотен киловатт. Благодаря тому, что колпак и муфель могут быть герметизированы, нагрев и остывание садки можно проводить в защитной атмосфере.

**Элеваторная электропечь** – печь периодического действия с открытой снизу неподвижной камерой нагрева 2 и с опускающимся подом 6. Печь 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 электро-механическим подъемником, который установлен под камерой нагрева. Нагреваемые изделия 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 нагревательные элементы 4 расположены на стенках, в высокотемпературных печах – на стенках и в поду.



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

**Камерная электропечь** – печь периодического действия с камерой нагрева, загрузка и разгрузка садки которой производятся в горизонтальном направлении. Камерная печь состоит из прямоугольной камеры 2 с огнеупорной футеровкой и теплоизоляцией, перекрытой сводом 8 и помещенной в металлический кожух. Печь загружается и выгружается через закрываемое дверцей отверстие в передней части.

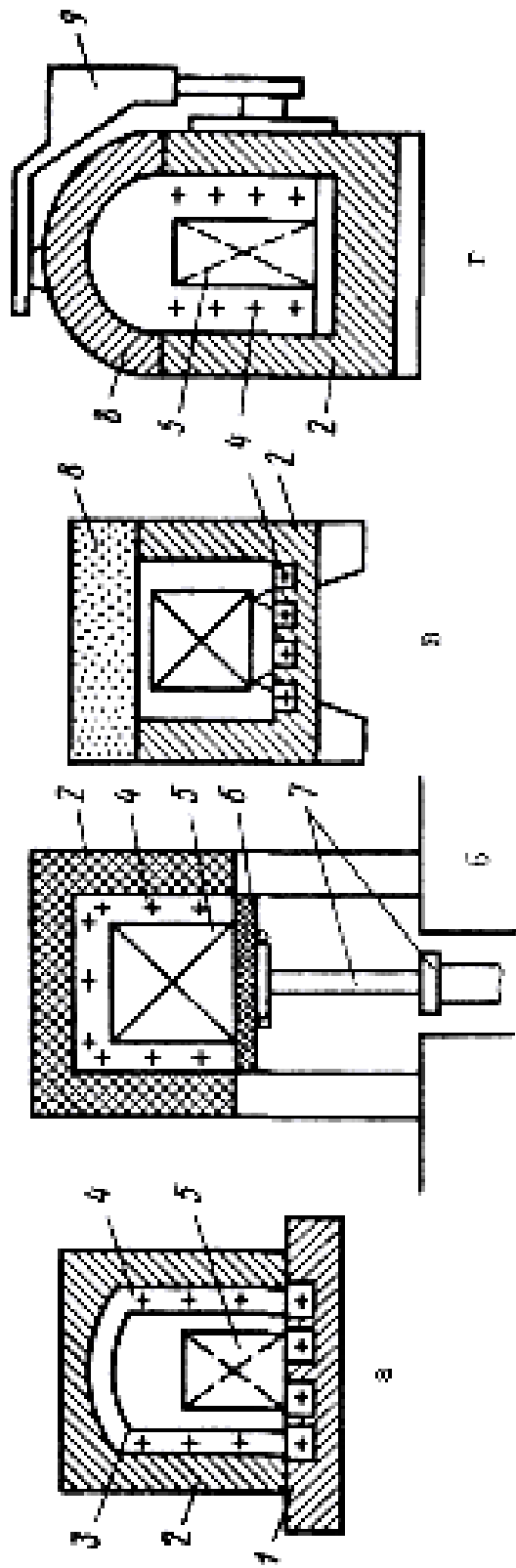
В поду камерной печи обычно имеется жароупорная плита, на которой расположены нагреватели 4. В печах до 1000 К теплообмен обеспечивается за счет излучения или вынужденной конвекции, обеспечиваемой замкнутой циркуляцией печной атмосферы. Печи с номинальной температурой до 1800 К работают как с воздушной, так и с контролируемой атмосферой. В крупных печах загрузка и разгрузка механизированы.

**Шахтную печь** выполняют в виде круглой, квадратной или прямоугольной шахты, перекрываемой сверху крышкой. Нагревательные элементы в ней установлены обычно по боковым стенкам.

**Электропечи сопротивления с нагревательными элементами непрерывного действия** (методические печи). Конструкции печей непрерывного действия различаются в основном механизмами перемещения нагреваемых изделий в рабочем пространстве печи. По способу перемещения изделия внутри печи различают конвейерные, толкательные, протяжные, туннельные и карусельные печи.

**Конвейерная печь** – с перемещением садки на горизонтальном конвейере (рис. 2.3). Под печи представляет собой конвейер – полотно, натянутое между двумя валами, которые приводятся в движение специальными двигателями. Нагреваемые изделия укладываются на конвейер и передвигаются на нем через рабочее пространство печи. Конвейерная лента может быть выполнена плетеной из нихромовой сетки, штампованных пластин и соединяющих их прутков, а также для тяжелых нагреваемых изделий – из штампованных или литых цепных звеньев.

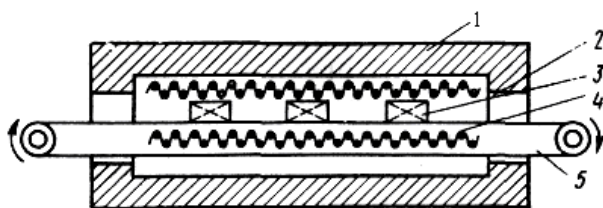
Конвейер размещается целиком в камере печи и не остывает. Однако валы конвейера находятся в очень тяжелых условиях и требуют водяного охлаждения. Поэтому часто концы конвейера выносят за пределы печи. В этом случае значительно облегчаются условия работы валов, но возрастают потери теплоты в связи с остыванием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



1 – стенд; 2 – камера печи; 3 – жаропрочный муфель; 4 – нагревательные элементы; 5 – нагреваемое изделие (садка); 6 – опускающийся под; 7 – подъемное устройство; 8 – свод; 9 – механизм подъема свода.

**Рис. 2.2. Печи сопротивления периодического действия:**  
 а – колпаковая; б – элеваторная; в – камерная; г – шахтная

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



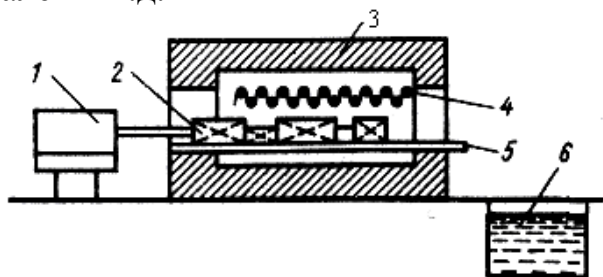
**Рис. 2.3. Конвейерная печь:**  
1 – теплоизолирующий корпус;  
2 – загрузочное окно; 3 – нагреваемое изделие; 4 – нагревательные элементы; 5 – конвейер

**Толкательные печи** с перемещением садки путем проталкивания вдоль рабочего пространства предназначены для высоких температур (выше 1400 К) (рис. 2.4). Они применяются для нагрева как мелких, так и крупных деталей. На поду таких печей устанавливаются направляющие в виде труб, рельсов или роликового пода, изготовленных из жароупорного материала, и по ним в сварных или литых специальных поддонах перемещаются нагреваемые изделия.

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

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

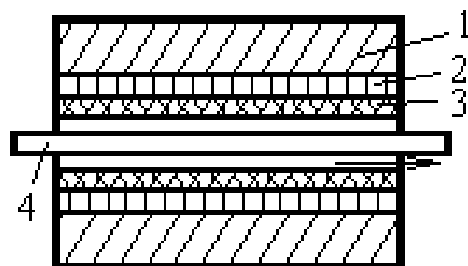
Толкательные водородные печи предназначены для различных технологических процессов, требующих нагрева в водороде или диссоциированном аммиаке. Они широко применяются в электроламповом производстве, при производстве металлокерамических деталей и твердых сплавов, для обжига и спекания керамики, для отжига и пайки металлических деталей и т.д.



**Рис. 2.4. Толкательная печь:**  
1 – толкатель с приводным механизмом; 2 – нагреваемые изделия; 3 – теплоизолирующий корпус; 4 – нагревательные элементы; 5 – подина печи; 6 – закалочная ванна

**Протяжная электропечь** – печь непрерывного действия для нагрева проволоки, прутков или ленты путем непрерывной протяжки через камеру нагрева. Она представляет собой муфель с нагревателями, через который пропускается нагреваемое изделие (рис. 2.5). Печи с рабочей температурой до 1500 К оборудованы металлическими муфелями, а при более высокой

температуре – керамическими. Печи с температурой 1600 К оборудованы многоканальным алундовым муфелем, поверх которого намотан молибденовый нагреватель. В протяжных печах применяется также смешанный способ нагрева: прямой – с помощью контактных приводных роликов и косвенный – с помощью нагревателя. Косвенный нагрев обеспечивает термообработку концов прутка в начале и в конце процесса, когда прямой нагрев не может быть осуществлен.

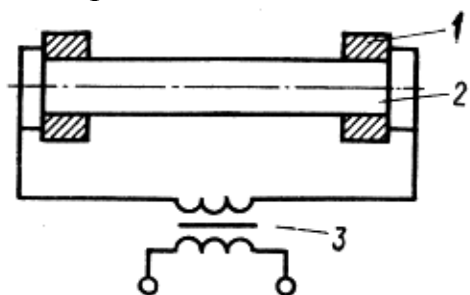


**Рис. 2.5. Протяжная печь:**  
 1 – теплоизолирующий корпус;  
 2 – нагревательные элементы;  
 3 – муфель;  
 4 – нагреваемое изделие

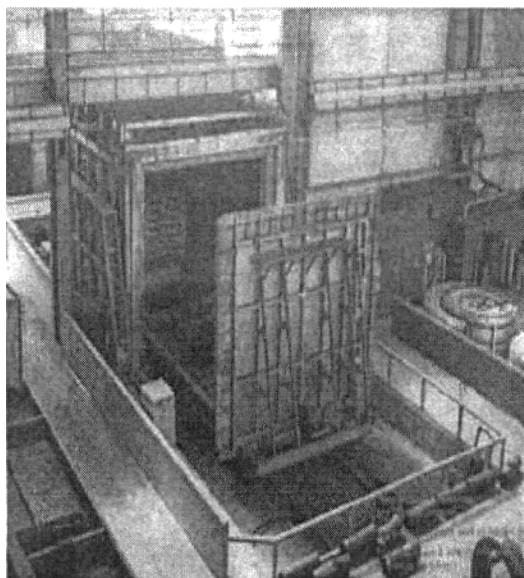
### Установки (печи) прямого нагрева.

Предназначены для нагрева заготовок под ковку, отжига труб, проволоки, пружинной проволоки под навивку. Установки не имеют пределов по достижимым температурам, обладают высокой скоростью, пропорциональной вводимой мощности, имеют высокий КПД. Принципиальная схема прямого нагрева показана на рис. 2.6. Существуют печи прямого нагрева периодического действия для спекания прутков и штабиков из порошков редких и тугоплавких металлов при температуре до 3000 К в защитной атмосфере. Установки прямого нагрева включают в себя следующие основные узлы:

- понижающий трансформатор, монтируемый в кожухе установки с обмоткой, охлаждаемой водой. Трансформатор имеет несколько ступеней напряжения в диапазоне 5–25 В для нагрева тел, имеющих разное сопротивление;
- токопровод от выводов обмотки низкого напряжения трансформатора до водоохлаждаемых зажимов;
- зажимы, обеспечивающие крепление нагреваемого изделия и необходимое давление в контактах подвода питания;
- привод контактной системы;
- приборы контроля и автоматического регулирования процесса нагрева.



**Рис. 2.6. Установка прямого нагрева:**  
 1 – водоохлаждаемые зажимы;  
 2 – нагреваемое изделие;  
 3 – печной трансформатор



**Рис. 2.7. Общий вид печи сопротивления с выдвижным подом для закалки деталей**

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

Печи прямого нагрева используются также для графитизации угольных изделий, получения карборунда и т.д. Графитировочные печи выполняют однофазными прямоугольной формы с разъемными стенками. Достигаемая температура 2600–3100 К в вакууме или нейтральной атмосфере.

Диапазон регулирования вторичного напряжения 100–250 В, потребляемая мощность 5–15 тыс. кВт·А. КПД установок прямого нагрева зависит от сопротивления нагрузки в цепи питания и составляет 70–80 %, коэффициент мощности – 0,8.

### **2.2.2. Вакуумные печи сопротивления и сушильные шкафы**

Вакуумные печи сопротивления предназначены для термообработки, пайки, спекания различных материалов и сплавов, сушки. В печах имеется возможность осуществлять технологические процессы при температурах до 2000–2500 °С как в вакууме до  $10^{-5}$  мм рт. ст., так и в среде нейтральных газов (аргон, азот повышенной чистоты) при давлениях вплоть до атмосферного. Выпускаются камерные и шахтные вакуумные печи сопротивления. Для сушки материалов применяются сушильные шкафы с температурой 200–250 °С. Параметры наиболее важных технологических процессов для вакуумных печей сопротивления приведены в табл. 2.1, технические характеристики вакуумных печей и сушильных шкафов предприятия ОАО «ВНИИЭТО» даны в табл. 2.2.

Таблица 2.1

**Параметры технологических процессов вакуумных печей сопротивления**

Технологические процессы	Материал	Температура, °С	Среда и давление, Па
Термическая обработка	Титан и его сплавы, высоколегированные стали, пермаллой, сплавы на основе никеля	900–1300	$10^{-1}$ – $10^{-2}$

Технологические процессы	Материал	Температура, °С	Среда и давление, Па
	Молибден, ниобий, вольфрам и их сплавы	1800–2200	$10^{-2}$ – $10^{-5}$
	Лейкосапфир и фианиты	1200–1800	$10^{-1}$ – $10^{-2}$
Термообработка и спекание	Тугоплавкие материалы	1600–2200	$10^{-1}$ – $10^{-2}$
Спекание	Высоколегированные стали, в том числе быстрорежущие	1100–1300	$10^{-1}$ – $10^{-2}$
	Титан, цирконий и сплавы на их основе	900–1200	$10^{-2}$ – $10^{-3}$
	Уран и его сплавы	1000–1300	$10^{-2}$ – $10^{-3}$
	Магнитные материалы систем ЮНДК	1000–1300	$10^{-2}$ – $10^{-3}$
Спекание	Редкие и редкоземельные металлы и их сплавы (скандий, иттрий, неодим, самарий, орбий)	1000–1300	$10^{-2}$ – $10^{-3}$
	Оксидная керамика	1600–2300	$10^{-1}$ – $10^{-2}$ Ar- $10^{-5}$
	Ниобий, тантал и их сплавы	1800–2200	$10^{-2}$ – $10^{-5}$
	Молибден, вольфрам и их сплавы	1900–2500	$10^{-1}$ – $10^{-2}$

Таблица 2.2

### Параметры вакуумных камерных печей предприятия ОАО «ВНИИЭТО»

Параметры	Камерные		Шахтные		Сушильные шкафы
	СНВЭ	СНВЭ	СШВЭ	СШВГ	СНВС
Тип печи	СНВЭ	СНВЭ	СШВЭ	СШВГ	СНВС
Материал нагревательного блока	ТМ	УКМ	ТМ	УКМ	ТМ, УКМ
Мощность, кВт	12–34	6–40	3,1	3,1–7,75	2,5–4
Температура, °С	1100–2000	1300–2200	2500	2200–2500	200–250
Остаточное давление, Па	$3 \times 10^{-3}$ – $10^{-2}$	$1$ – $10^{-2}$	$6 \times 10^{-3}$	$10^{-1}$ – $10^{-2}$	0,1 мм рт. ст.
Масса печи, т	0,8–0,95	0,8–3	1	1–1,3	
Масса загрузки, кг	15–30	15–125	12	12–20	

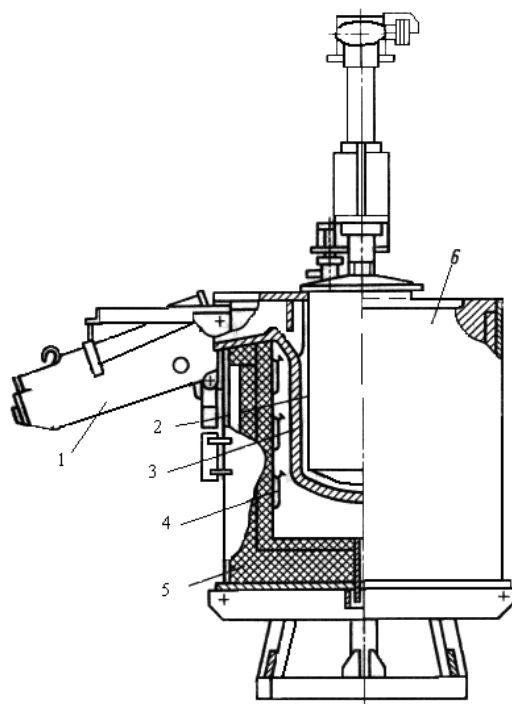
### 2.2.3. Плавильные электропечи сопротивления

Плавильные электропечи сопротивления (ЭПС) предназначены для выплавки олова, свинца, цинка и различных сплавов на их основе, а также других металлов, имеющих температуру плавления 600–800 К. Печи для плавки алюминия и его сплавов позволяют достичь высокой степени очистки металла. Печи имеют простую конструкцию. По конструктивному исполнению различают тигельные и камерные (или ванны) печи.

**Тигельные печи** (рис. 2.8) представляют собой металлический сосуд-тигель (из чугуна с внутренней обмазкой оксидами), помещенный в цилиндрический корпус из огнеупорного материала 5 и покрытый снаружи металлическим кожухом 6. Между тиглем и футеровкой размещены электрические нагреватели 4.

ЭПС оборудована механическим дозатором. Дозирование металла в промежуточный ковш робота-манипулятора или литейную форму производится с помощью механических, пневматических или электромагнитных устройств. Механический вытеснитель 2 размещен на каретке, движущейся вверх и вниз по направляющей колонке. После расплавления металла и доведения его температуры до необходимого уровня вытеснитель опускается в тигель и вытесняет порцию металла, которая по обогреваемому желобу поступает в литейную машину. Тигельные ЭПС других конструкций имеют механизм наклона, позволяющий наклонять печь и сливать расплавленный металл. Удельный расход электроэнергии при плавке алюминия 700–750 кВт·ч/кг, КПД печи 50–55 %.

**Камерные печи** по объему больше тигельных и применяются для переплавки алюминия на слитки. Удельный расход электроэнергии при работе ЭПС ванного типа составляет 600–650 кВт·ч/кг, а КПД 60–65 %. Во всех типах ЭПС возможны два способа обогрева – внутренний и внешний. При внутреннем обогреве нагреватели размещены в расплавленном металле и работают при температуре не выше 800–850 К. При внешнем расположении открытые высокотемпературные НЭ позволяют получить температуры в рабочем пространстве печи 1100–1200 К.



**Рис. 2.8. Тигельная электрическая печь сопротивления:**

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

#### 2.2.4. Электрооборудование и регулирование параметров печей сопротивления

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

- на силовое (трансформаторы, понижающие и регулировочные автотрансформаторы, блоки питания, приводящие в действие механизмы электроприводов, силовая коммутационная и защитная аппаратура);
- аппаратуру управления (комплектные станции управления);
- контрольно-измерительные приборы (КИП),
- пирометрическое.

Большинство печей выполняют на напряжение питающей сети и подключаются к сети без специальных трансформаторов.

Регулировочные трансформаторы и автотрансформаторы применяются для питания соляных ванн и установок прямого нагрева, а также для печей сопротивления с вольфрамовыми, графитовыми и молибденовыми нагревателями. Применение понижающих печных трансформаторов позволяет увеличить рабочие токи и применять для изготовления нагревателей проводники большего сечения, что повышает их прочность и надежность.

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

Регулирование рабочей температуры в печах сопротивления производится изменением поступающей в печь мощности следующими способами:

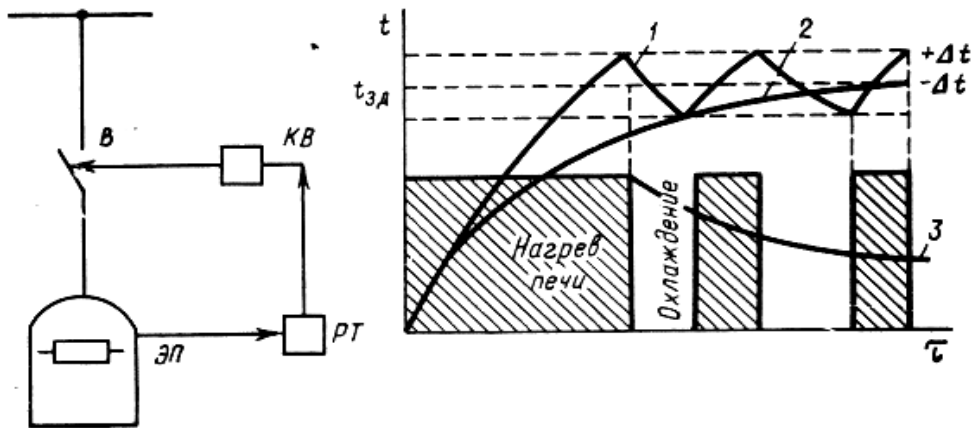
- периодическим подключением печи к питающей сети и отключением (двухпозиционное регулирование);
- переключением нагревателей печи со звезды на треугольник, либо с последовательного соединения на параллельное (трехпозиционное регулирование).

При *двухпозиционном регулировании* температура в рабочем пространстве ЭПС контролируется термopарами или фотоэлементами. Функциональная схема печи и график изменения температуры и мощности при таком способе регулирования показаны на рис. 2.9.

Включение печи производится регулятором температуры РТ посредством подачи команды на катушку выключателя КВ. Температура в пе-

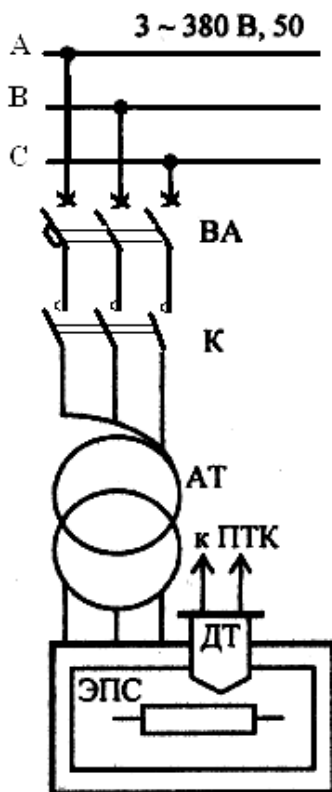


чи растет до значения  $t_{зд} + \Delta t$ , в этот момент терморегулятор отключает печь. За счет поглощения теплоты нагреваемым телом и потерь в окружающее пространство температура снижается до  $t_{зд} - \Delta t$ , после чего РТ вновь дает команду на подключение печи к сети. Глубина пульсаций температуры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



**Рис. 2.9. Функциональная схема включения печи, измерение температуры и мощности при двухпозиционном регулировании:**

- В – выключатель; ЭП – ЭПС; РТ – регулятор температуры;  
 КВ – катушка отключения выключателя;  
 1 – температура печи; 2 – температура нагреваемого тела;  
 3 – средняя потребляемая печью мощность



- ДТ – датчик температуры сети;  
 АД – двигатель реверсивный для подъема и опускания двери;  
 ЭМТ – электромагнитный тормоз

**Рис. 2.10. Схема подключения ЭПС с печным автотрансформатором**

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

### 2.3. Нагрев сопротивлением жидких сред

**Электрические котлы** применяются в различных отраслях народного хозяйства для подогрева воды (электроводонагреватели) и получения насыщенного технологического пара низкого давления (электропарогенераторы). Жидкости: вода, расплавы солей, щелочей, оксидов – могут быть нагреты прямым пропусканием тока через их объем. Установки такого типа служат для кипячения воды, варки стекла, термообработки металлов.

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

Номинальный режим работы котла рассчитан на нагрев воды с удельным электрическим сопротивлением  $3000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Для получения такого сопротивления в воду добавляется раствор соли, либо дистиллированной воды. Возможна работа котла и на воде с иным удельным сопротивлением, однако во избежание чрезмерного увеличения поверхностной плотности тока на электродах и образования гремучего газа удельное сопротивление должно составлять  $1000\text{--}5000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Температура выходящей воды автоматически поддерживается в нужных пределах датчиком.

*Электрический парогенератор* представляет собой комплект оборудования и аппаратов, в который входит сам парогенератор, питательный бак, насос, соединительные трубопроводы, приборы контроля и управления. Парогенератор имеет электроды цилиндрической формы и нулевой электрод. Мощность регулируется за счет изменения уровня воды между электродами и нулевым электродом. Работа парогенераторов осуществляется в автоматическом режиме.

*Электродные котлы* могут иметь трехфазную и однофазную системы электродов, работающие на низком и высоком напряжении. Котлы низкого напряжения (30 В) мощностью 25–400 кВт с КПД 95–98 % имеют малые габаритные размеры, низкую тепловую инерционность. Высоковольтные котлы, рассчитанные на напряжение 3–35 кВ, применяют в бытовых и производственных целях для систем централизованного отопления и горячего водоснабжения.

**Стекловаренные печи** выполняют в виде ванны, выложенной изнутри огнеупорным материалом. Ванна имеет три зоны: варочное отделение, где происходит расплавление шихты и получение жидкой стекломассы, перетекающей по придонному каналу во второе – выработочное отделение, в котором уточняется рецепт стекла, перетекающего на выдачу с заданной температурой. Во всех отделениях в стекломассе находятся электроды из стали, молибдена, графита, обеспечивающие протекание тока через стекломассу и нагрев ее. Стекловаренные печи имеют мощности от нескольких сотен до нескольких тысяч киловатт и питаются от понижающих трансформаторов со вторичным напряжением 50–200 В. Печи работают круглосуточно, обладают большой тепловой инерцией и являются спокойной электрической нагрузкой.

**Жидкостные ЭПС для нагрева металла.** Для быстрого и равномерного нагрева металлических изделий и заготовок применяются электродные ванны, представляющие собой металлический или керамический тигель, наполненный солью или стекломассой, в который опущены металлические или металлокерамические электроды. В холодном состоянии соль почти не электропроводна, но если ее нагреть и расплавить, то между электродами начинает протекать электрический ток и в расплаве, как в активном сопротивлении, выделяется тепловая энергия.

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

ЭПС с жидким нагревателем применяют для нагрева до 1100–1600 К изделий из легированных сталей перед закалкой, ковкой или штамповкой, а также для отжига деталей из стали и чугуна. Электродные ванны подключаются к сети переменного тока через понижающие трансформаторы с вторичным напряжением на электродах 10–35 В. Схема электродной ванны показана на рис. 2.11.

Для снижения температуры плавления и обеспечения необходимого уровня электропроводности в качестве рабочей среды применяют соли (хлористые, фтористые или азотнокислые), а также щелочи либо в чистом виде, либо в различных смесях. Для запуска ванны или расплавления застывшего электролита применяют пусковые нагреватели, представляющие собой блок открытых нагревательных элементов, установленных на каркасе и погружаемых в ванну.

К достоинствам соляных ванн следует отнести:

- высокую скорость нагрева и большую производительность по сравнению с другими нагревательными установками при равных габаритных размерах;
- легкость осуществления различных способов термической и термохимической обработки;
- защиту изделий от окисления в процессе их нагрева.

Недостатки:

- повышенный удельный расход электроэнергии вследствие увеличенных тепловых потерь с зеркала ванны и необходимости непрерывной работы установки;
- высокий расход расплавообразующего материала;
- тяжелые условия труда обслуживающего персонала.

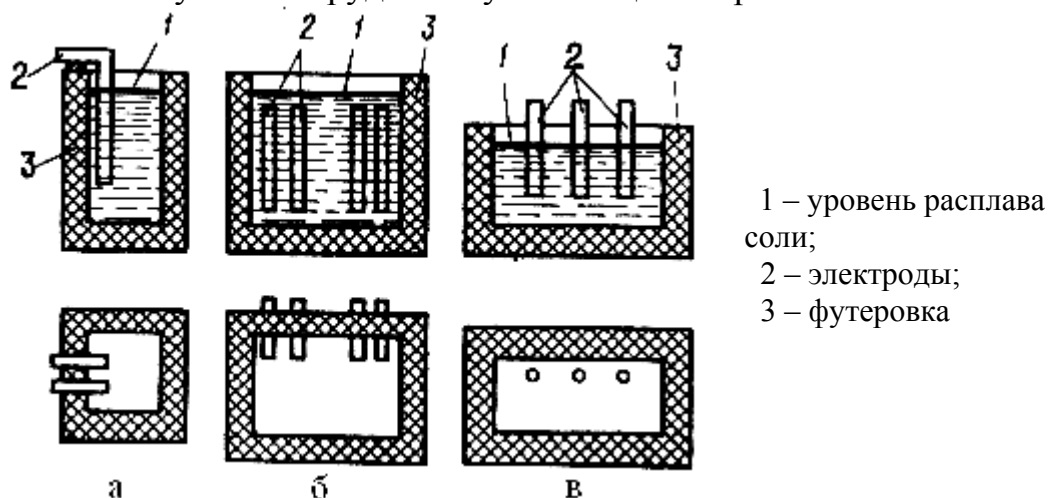


Рис. 2.11. Схемы однофазных электродных ванн с близко расположенными электродами: а, б – однофазные; в – трехфазные

## 2.4. Электрошлаковые установки

Использование явления разогрева расплава соединений шлака до 2000–2300 К проходящим по нему током легло в основу процессов электрошлакового переплава (ЭШП) и электрошлаковой сварки (ЭШС). Эти процессы разработаны в институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР и в значительной мере усилиями этого института распространены во многих странах.

Сущность ЭШП состоит в следующем (рис. 2.12). Расходуемый электрод из переплавляемого металла погружается в слой электропроводного шлака 2, находящегося в водоохлаждаемом кристаллизаторе 3, закрытом водоохлаждаемым поддоном 4. Электрический ток протекает между электродом и поддоном через шлак, который имеет высокое электрическое сопротивление и интенсивно разогревается. Находящийся в расплаве шлака торец электрода расплавляется, и капли металла, стекающие с электрода,

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

Основное назначение установок ЭШП – производство слитков из высококачественных сталей: валковых, шарикоподшипниковых, нержавеющей, жаропрочных. Факторы, улучшающие качество металла при обработке: химическое взаимодействие со шлаком; направленная кристаллизация слитка; формирование слитка в шлаковом гарнисаже с образованием гладкой поверхности. Электрический режим печей характеризуется наличием периодических пульсаций тока, связанных с образованием капель и переменным значением межэлектродного промежутка

От параметров и конструкции печи зависит масса и форма выплавляемого слитка. Различают одно-, двух-, трех- и многоэлектродные печи. Одно- и двухэлектродные печи выполняют по однофазной схеме, а трех- и многофазные – по одно- и трехфазной.

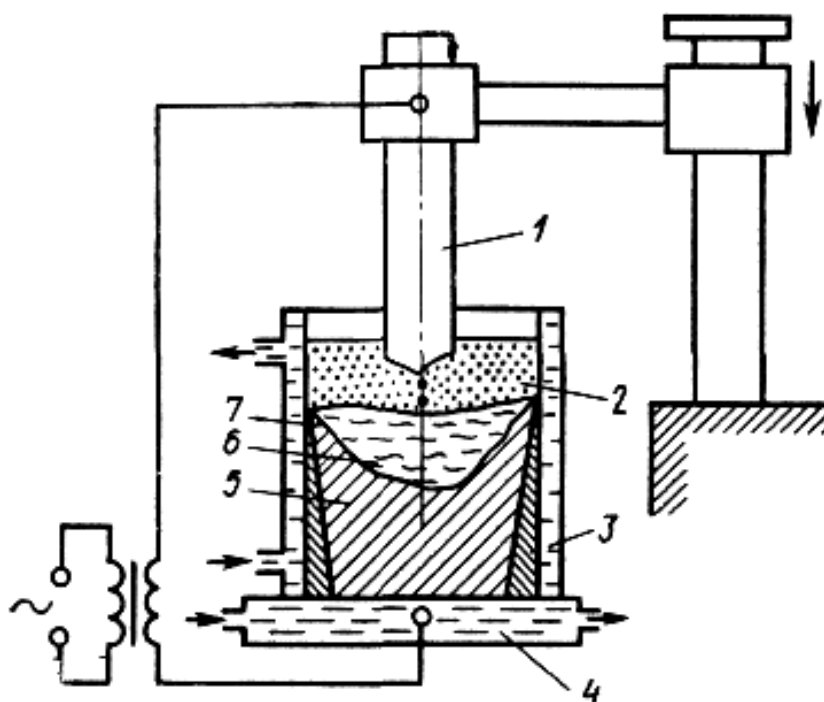


Рис. 2.12. Схема установки электрошлакового переплава

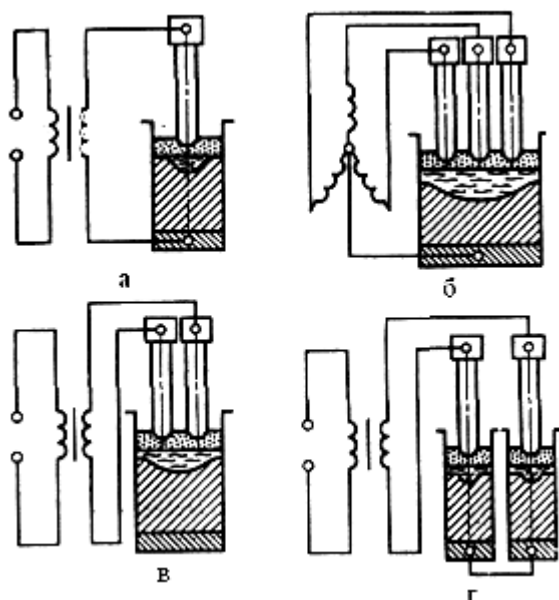
Наиболее широкое распространение имеют одноэлектродные однофазные печи (рис. 2.14 а). Трехфазные печи (рис. 2.14 б) отличаются от однофазных лучшими энергетическими показателями, но характеризуются меньшим коэффициентом заполнения кристаллизатора, что приводит к увеличению длины электрода и высоты печи.

Однофазная бифилярная печь (рис. 2.14 в) предназначена для получения слитков прямоугольного сечения. По сравнению с обычными однофазными печами она имеет более высокий коэффициент мощности (до 0,9) и меньший удельный расход электроэнергии.

Одновременное выплавление двух слитков возможно по схеме с последовательным подключением двух печей к одному трансформатору (рис. 2.14 г). Такая схема обеспечивает высокие технико-экономические показатели вследствие бифилярности электродов и короткой сети, сокращения протяженности токопроводов и уменьшения потребной производственной площади. Некоторые параметры ЭШП приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Параметр	ЭШП-2,5 ВГ	ЭШП-10 Г	ЭШП-20 ВГ
Мощность источника питания, кВ·А	1600	2500	5000
Максимальный ток, А	21000	28000	50000



**Рис. 2.14. Электрические схемы печей ЭШП:**  
 а – однофазная;  
 б – трехфазная;  
 в – двухэлектродная однофазная;  
 г – двухэлектродная однофазная для получения двух слитков

**Электрошлаковая сварка (ЭШС)** широко используется в промышленности для соединения металлов большой толщины: стали, чугуна, меди, алюминия, титана и их сплавов. В качестве тепловыделяющего элемента здесь используются расплавленные шлаки, нагревающиеся до заданной температуры при протекании по ним переменного тока. Принципиальная схема ЭШС показана на рис. 2.15.

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

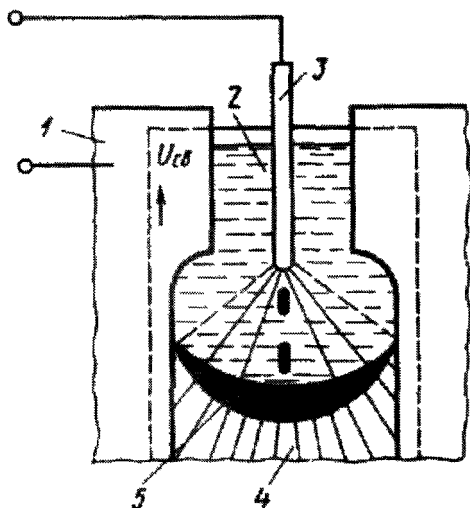


Рис. 2.15. Схема электрошлаковой сварки

ЭШС осуществляется автоматами и полуавтоматами, подающими электродную проволоку и дозирующими флюс, для чего требуется соответствующая аппаратура управления. Источники питания ЭШС имеют разные внешние характеристики: от крутопадающей до жесткой, мощность 60–550 кВ·А, вторичное напряжение 8–63 В.

## 2.5. Установки электроотопления и электрообогрева

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

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

**Электрокалорифер** – электронагревательный аппарат, состоящий из нагревательного элемента и вентилятора. Он предназначен для нагрева воздуха и различных газов в технологических процессах. Такие электрокалориферы с вынужденной конвекцией обеспечивают интенсивный теплообмен и обладают в несколько раз меньшей поверхностью нагрева по сравнению с поверхностями электронагревательных устройств со свободно конвективным способом теплообмена.

**Светлый кварцевый излучатель** представляет собой трубку из кварцевого стекла, внутри которой размещаются вольфрамовые нихром-

вые или хромоалюминиевые спирали. Плотность лучистого потока до  $60 \text{ кВт/м}^2$ .

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

**Электрические сушила.** Установки для сушки изделий могут быть радиационного или смешанного действия, когда передача теплоты излучением сочетается с конвекцией (установки конвективно-радиационного типа). При конструировании сушил следует обеспечить достаточную интенсивность воздухообмена, особенно в тех случаях, когда в результате сушки испаряются взрывоопасные вещества.

#### **Электрические отопительные устройства.**

Электрическое отопление экономически оправдано в тех случаях, когда для использования другого вида энергии требуются значительные капитальные затраты (строительство новой котельной), возникают значительные трудности в обеспечении топливом, когда необходимо учитывать экологический фактор – чистоту окружающей среды.

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

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

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



### 3. ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

#### 3.1. Общие сведения об индукционных ЭТУ

**Индукционный нагрев (ИН)** применяется для:

- плавки металлов и неметаллов;
- поверхностной закалки;
- нагрева изделий для пластической деформации;
- сварки и пайки;
- зонной очистки металлов и полупроводников;
- получения монокристаллов из тугоплавких оксидов;
- получения плазмы.

При индукционном нагреве в нагреваемых телах под действием электромагнитной энергии возникают вихревые токи, которые нагревают тело по закону Джоуля – Ленца. Индукционный нагрев применяется в установках прямого и косвенного действия.

Принципиальная схема ИН показана на рис. 3.1. Индуктор создает переменный магнитный поток и работает как первичная обмотка силового трансформатора. Нагреваемое тело помещается внутри индуктора таким образом, чтобы между индуктором и телом оставался зазор. Нагреваемое тело выполняет роль вторичной обмотки трансформатора с одним к.з. витком. ЭДС, возникающая в нагреваемом теле, пропорциональна магнитному потоку и обеспечивает возникновение тока в теле, который вызывает нагрев.

$$E = 4,44\Phi wf,$$

где  $E$  – ЭДС, возникающая в нагреваемом теле;  
 $\Phi$  – магнитный поток, создаваемый индуктором, Вб;  
 $w$  – число витков индуктора;  
 $f$  – частота питающей сети, Гц.

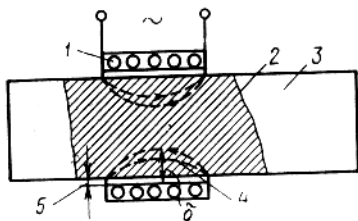
Мощность, выделяемая в нагреваемом теле, пропорциональна квадрату тока и сопротивлению нагреваемого тела:

$$P = I^2 R,$$

где  $I$  – вихревой ток, возникающий в теле, А;  
 $R$  – активное сопротивление нагреваемого тела, Ом.

Достоинствами электроустановок индукционного нагрева являются:

- высокая скорость нагрева, пропорциональная вводимой мощности;
- хорошие санитарно-гигиенические условия труда;
- возможность регулирования зоны действия вихревых токов в пространстве (ширина и глубина прогрева);
- простота автоматизации технологического процесса;
- неограниченный уровень достигаемых температур, достаточных для нагрева металлов, плавления металлов и неметаллов, перегрева, расплава, испарения материалов и получения плазмы.



**Рис. 3.1. Принципиальная схема ИН:**

- 1 – индуктор; 2 – магнитный поток в нагреваемом теле;
- 3 – нагреваемое тело;
- 4 – наведенный ток;
- 5 – воздушный зазор

Недостатки:

- требуются более сложные источники питания;
- повышенный удельный расход ЭЭ на технологические операции.

К особенностям индукционного нагрева можно отнести возможность регулирования пространственного расположения зоны протекания вихревых токов.

Эффективность передачи энергии от индуктора к нагреваемому телу зависит от величины зазора между ними и повышается при его уменьшении. Глубина нагрева тела увеличивается с ростом его удельного сопротивления и снижается с увеличением частоты тока. Ток индукторов составляет от сотен до нескольких тысяч А при средней плотности тока 20 А/мм<sup>2</sup>. Потери мощности в индукторах могут достигать 20–30 % от полезной мощности.

Индукционные электротехнологические установки разделяются на плавильные, нагревательные и закалочные. Печи могут работать на промышленной частоте 50 Гц, средней частоте 0,5–10 кГц и высокой частоте: сотни-тысячи кГц.

### **3.2. Индукционные плавильные печи**

Индукционные плавильные печи применяются для плавки черных и цветных металлов: алюминия, чугуна, меди, стали. В настоящее время в чугуно-литейном производстве применяются: 76 % вагранок, 23 % индукционных плавильных печей и 1 % электродуговых печей. Наблюдается устойчивая тенденция к увеличению объемов использования индукционных плавильных печей.

Индукционные плавильные печи применяются для производства фасонного литья из черных и цветных металлов. По конструкции плавильные печи разделяются: на индукционные каналные печи (ИКП) и индукционные тигельные печи (ИТП). Канальные печи имеют сердечник, тигельные выполняются с сердечником или без него.

Для рабочего процесса печей характерно: электродинамическое и тепловое движение жидкого металла в ванне или тигле, что способствует получению однородного по составу металла и равномерному прогреву по

всему объему; малый угар металла (в несколько раз меньше, чем в дуговых печах).

Рабочие температуры печей:

- 750 °С – для выплавки алюминия;
- 1200 °С – для выплавки меди;
- 200–1400 °С – для выплавки чугуна;
- 1600 °С – для выплавки стали.

**Индукционные каналные печи** применяются для плавки цветных металлов, высококачественных сплавов и чугуна. Печи работают только на промышленной частоте.

**Преимущества ИКП:**

1. Высокий КПД печей.
2. Высокая надежность печи при использовании новейших футеровок, высокая наработка на отказ ванны печи – не менее 3-х лет.
3. В печи происходит интенсивное перемешивание металла без разрыва оксидной пленки, что обеспечивает: одинаковый химический состав по всему объему печи; одинаковую температуру по всему объему печи; возможность подшихтовки легирующими элементами.
4. Высокая точность поддержания температуры расплава за счет использования встроенного блока контроля температуры расплава, что обеспечивает уменьшение литейного брака, угара из-за отсутствия перегрева металла, увеличение срока службы футеровки.
5. Низкие энергозатраты на расплавление металла.
6. Низкий расход охлаждающей воды по сравнению с тигельной печью.
7. Снижение выбросов вредных веществ в атмосферу.
8. Не требуется фундамента печи и крепления ее к полу при монтаже; не требуется высокая квалификация обслуживающего персонала.

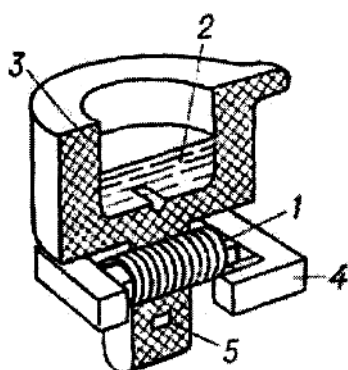
**Классификация печей:**

- по числу фаз: одно-, двух- и трехфазные;
- по конструктивному выполнению канала: с открытым или закрытым каналом. На практике в основном применяют печи с закрытым каналом;
- по числу каналов на фазу: одно-, двух- и трехканальные;
- по расположению каналов: с вертикальным; горизонтальным; наклонным;
- по форме канала: с круглым; прямоугольным; треугольным.

**Конструкция.** К основным узлам ИКП относят плавильную футерованную ванну и индукционную единицу, в которую входят подовый камень с закрытым каналом, магнитный сердечник и индуктор (рис. 3.2).

Ванна печи представляет кожух из железа, внутри которого имеется футеровка. На боковой поверхности кожуха расположено сливное отверстие.

Индукционная единица состоит из индуктора, шихтованного магнитопровода и подового камня с охватывающими индуктор плавильными каналами. *Индуктор* по сути является первичной обмоткой трансформатора, выполняется из меди круглого, прямоугольного сечения или из медной трубки, внутри которой циркулирует вода (водяное охлаждение). *Магнитопровод* представляет собой собранный из листовой трансформаторной стали сердечник бронзового или стержневого типа. *Подовый камень* выполняется из бронзы или немагнитной стали, имеет один или несколько каналов тепловыделения. Канал с расплавленным металлом 1 является короткозамкнутым витком вторичной обмотки трансформатора. Для соединения ванны с подовым камнем в поддоне имеется отверстие. В момент плавки происходит циркуляция расплавленного металла из канала в ванну и наоборот. Замещение более нагретого металла более холодным происходит все время, пока существует разница температур в канале и шахте печи. Из-за недостаточной циркуляции металла его температура в канале может на 100–200 К превосходить температуру в ванне. Это обстоятельство в основном определяет удельную мощность ИКП, их производительность, а также срок службы футеровки канала.



**Рис. 3.2. Индукционная канальная плавильная печь:**

- 1 – индуктор;
- 2 – расплавленный металл;
- 3 – ванна (шахта или тигель);
- 4 – магнитный сердечник;
- 5 – подовый камень с каналом тепловыделения

Канал тепловыделения должен быть постоянно заполнен электропроводящим телом. Для первичного пуска канальных печей в канал заливают расплавленный металл или вставляют шаблон из материала, который будет плавиться в печи. При завершении плавки металл из печи сливают не полностью, оставляя так называемое «болото», которое обеспечивает заполнение канала тепловыделения для последующего пуска. Индукционные единицы бывают одинарные и сдвоенные, с одним или двумя каналами на один индуктор (рис. 3.3). Футеровку канала выполняют из набивных масс различного состава в зависимости от выплавляемого металла или сплава.

Для слива металла (рис. 3.4) через сливной носок (4) печь наклоняется при помощи гидро- или электропривода. Загрузку печи ведут сверху через проем, закрытый во время плавки футерованной крышкой (5). Подъем крышки производится гидро- или электроприводом. Подовый камень (10) охлаждается воздухом при помощи вентилятора (9) через зазор

между индуктором и подовым камнем. Электроэнергия к индуктору подводится по гибким кабелям.

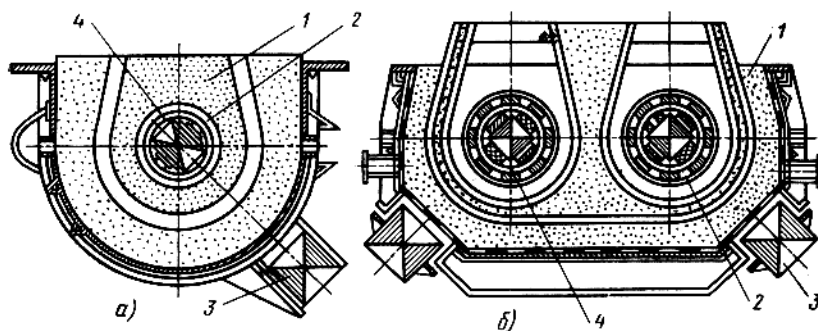
**Принцип работы печи.** Индукционная печь представляет собой своеобразный трансформатор, у которого первичной обмоткой является индуктор, а вторичная обмотка и нагрузка – замкнутый канал с расплавленным металлом. Работает такой трансформатор в режиме КЗ, при котором вся подводимая энергия тратится на нагрев металла. При включении индуктора в сеть переменный ток, возникающий в индукторе, создает вокруг него переменное магнитное поле, которое замыкается через сталь сердечника. В свою очередь переменный магнитный поток индуктирует в металле канала ЭДС, вследствие чего в металле канала появляется ток. Наведенный в замкнутой цепи канала ток будет выделять в канале тепло.

**Основные разновидности канальных печей** представлены на рис. 3.5.

В *ИКП шахтного типа* плавильная камера имеет форму вертикального цилиндра, к донной части которого присоединена плавильная единица (рис. 3.5 а). При разливе металла печь наклоняется с помощью гидравлического устройства.

В *ИКП барабанного типа* плавильная камера выполнена в виде горизонтально расположенного цилиндра. Она установлена на цапфах или катках с различными приводами механизма наклона. Печь имеет несколько индукционных единиц, которые установлены в ее нижней части (рис. 3.5 б).

**Двухкамерные канальные печи** выполнены с наклонными или горизонтально расположенными каналами, соединяющими между собой две ванны. При этом одна из них используется как плавильная, а другая как раздаточная (3.5 в).



**Рис. 3.3. Конструкция индукционных единиц канальных печей:**

**а – одинарная; б – сдвоенная;**

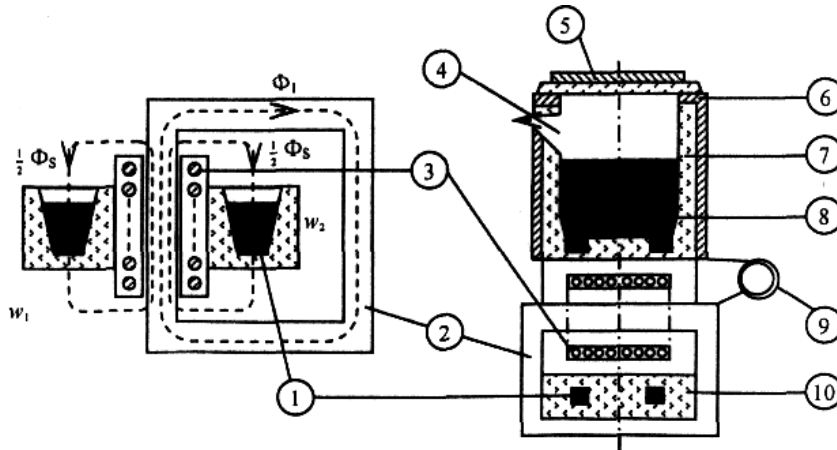
1 – футеровка; 2 – водоохлаждаемый кожух; 3 - магнитопровод; 4 – индуктор

**Технические характеристики индукционных печей.** При плавлении вторичных ресурсов (данные по латунным сплавам) безвозвратные потери составляют 6–8 %, производительность в месяц – 70–90 т.

Коэффициент мощности индукционных печей  $\cos\varphi = 0,2...0,8$ . Меньшие значения коэффициента мощности соответствуют ИКП для плавки

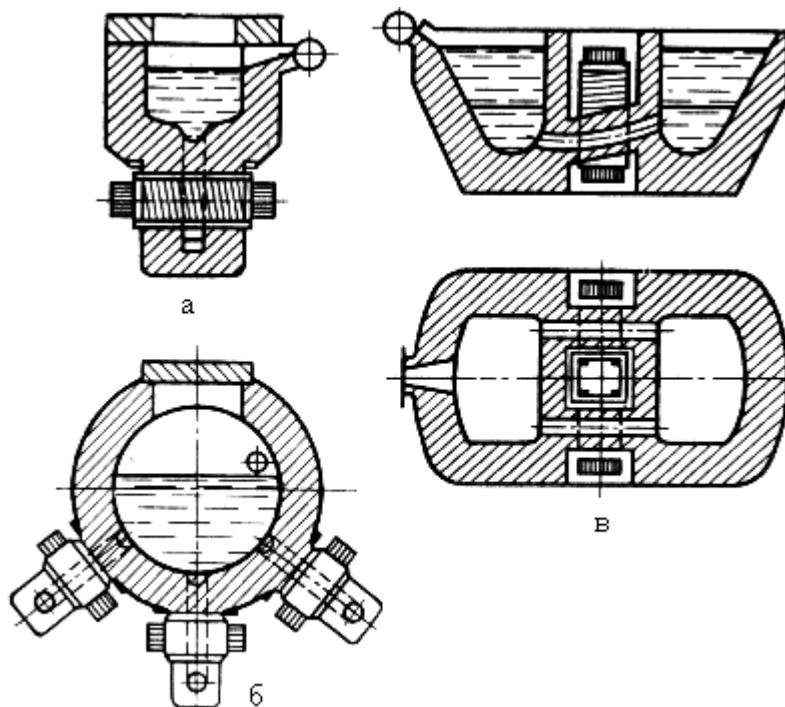
металлов с низким удельным сопротивлением (медь, алюминий), а большие значения – с высоким (сталь, чугун).

Питание печей осуществляется от сетей напряжением 380 В и выше в зависимости от мощности. Печи с сердечником выпускаются одно-, двух- и трехфазными мощностью до 2000 кВт. На рис. 3.6 представлена схема питания ИПК промышленной частоты от печного трансформатора напряжением 10/0,4 кВ. Параллельно индуктору подключена батарея конденсаторов, состоящая из постоянно включенной секции С и N управляемых секций  $C_1-C_N$ .



**Рис. 3.4. Схема и конструкция ИПК:**

1 – канал с расплавленным металлом; 2 – шихтованный магнитопровод;  
7 – футерованная ванна; 8 – металл; 9 – вентилятор; 10 – подовый камень



**Рис. 3.5. Основные типы конструкций ИПК:**

а – шахтная;  
б – барабанная;  
в – двухкамерная

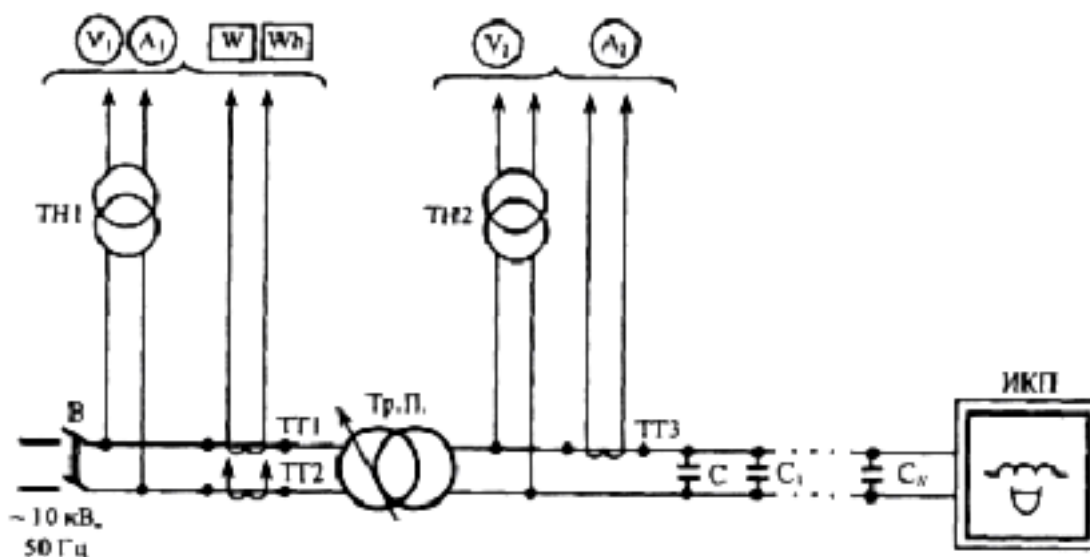


Рис. 3.6. Принципиальная электрическая схема питания ИКП промышленной частоты

Таблица 3.1

Технические характеристики некоторых современных ИКП

Параметр	Марка печи					
	ИПЛ1К-0,25	ИПБ1К-0,25	ИПЛ1К-0,7	ИПБ1К-0,7	ИПЛ1К-1,2	ИПБ1К-1,2
Номинальная мощность, кВт	60	60	130	130	130	130
Макс. температура, °С	1100	1300	1300	1300	1300	1300
Напряжение, В	380/220			380		
Число фаз	1	1	3	3	3	3
Емкость печи, кг	250	250	700	700	1200	1200
Масса печи, т	3	3	4	4	4	4

**Индукционные тигельные печи (ИТП)** применяются для скоростных плавки черных и цветных металлов, для плавки черных металлов. Печи работают на разных частотах: промышленной (50 Гц); средней (0,5–10 кГц) и высокой (сотни-тысячи кГц).

В основе работы печей без сердечника также лежит трансформаторный принцип передачи энергии индукцией от первичной цепи ко вторичной. Подводимая к печи электрическая энергия переменного тока превра-

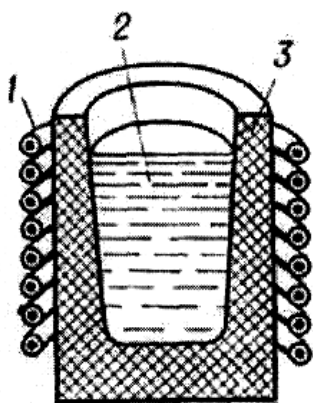
щается в электромагнитную, которая во вторичной цепи превращается в электрическую, а затем в тепловую. Первичной обмоткой служит индуктор, вторичной обмоткой и нагрузкой – расплавляемый металл, загруженный в тигель и помещенный внутри индуктора. Магнитный поток проходит по самой шихте, поэтому большое значение имеют магнитные свойства, а также размеры и форма загружаемой шихты. Магнитная проницаемость для ферромагнитных материалов достаточно высока и до температуры 740–770 °С постоянна по величине. В этом случае шихта одновременно играет роль незамкнутого сердечника. После того как температура расплавляемого материала превысит указанные значения, работа печи становится аналогичной работе трансформатора без сердечника. Величина ЭДС в каждом витке пропорциональна частоте и величине магнитного потока. При отсутствии сердечника проводимость для магнитных силовых линий снижается, поэтому увеличивают частоту переменного тока.

На рис. 3.7 показана ИТП без сердечника, которая состоит из индуктора (1), подключаемого к источнику питания переменного тока, расплавленного металла (2), находящегося внутри огнеупорного тигля (3). В тигельных печах большой емкости предусматривается внешний магнитопровод (рис. 3.8). В тигель можно загружать любую шихту: отходы литейного производства, чушки, мелкую стружку и т.п.

*Индукторы* изготавливают из медной трубки (круглого или квадратного сечения), охлаждаемой водой, накладываемой в один слой. Обмотка состоит из нескольких катушек, имеющих раздельное водяное охлаждение. Печи могут работать с оставлением сплава (25–30 % емкости тигля) или без него.

В ИТП большой емкости применяются источники питания промышленной частоты, средней и малой емкости – повышенной и высокой частоты.

Неэлектропроводные тигли изготавливают из кварцитовых, магниевых, циркониевых материалов. Они размещаются внутри индуктора, не поглощают энергию магнитного поля и одновременно являются теплоизоляторами между расплавляемым металлом и охлаждаемыми стенками индуктора.

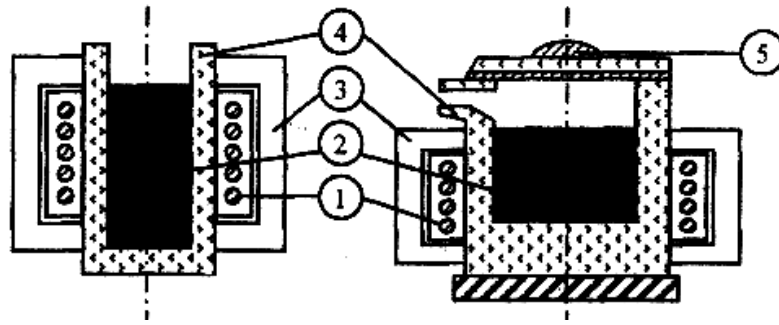


**Рис. 3.7. Индукционная тигельная печь:**

- 1 – индуктор;
- 2 – расплавленный металл;
- 3 – тигель

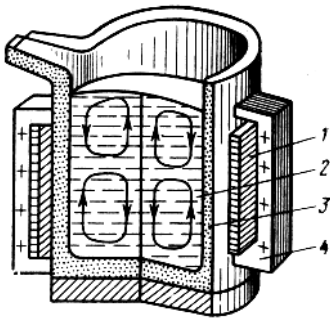


Конструкции тигельных печей показаны на рис. 3.8–3.10.

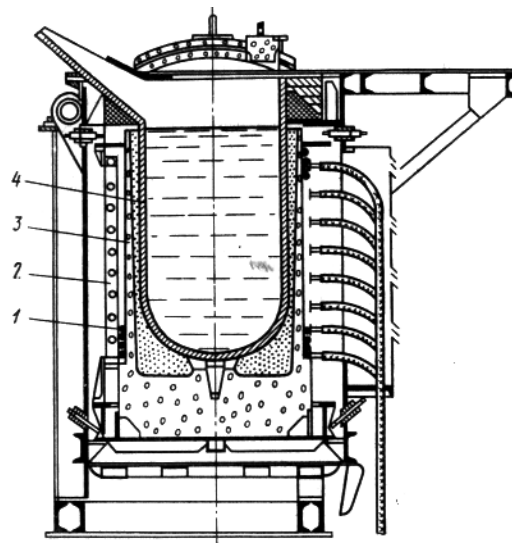


**Рис. 3.8. Схема и конструкция индукционной тигельной печи:**

1 – индуктор; 2 – расплавленный металл; 3 – магнитопровод;  
4 – огнеупорный тигель; 5 – крышка подъема



**Рис. 3.9. Направление токов в расплавляемом металле**



**Рис. 3.10. Индукционная тигельная печь со стальным тиглем для плавки магния:**

1 – индуктор; 2 – магнитопровод;  
3 – набивная футеровка;  
4 – стальной тигель

*Электропроводящие* тигли изготавливают из жароупорных сталей, легированных чугунов и графитов. Они поглощают наибольшую часть энергии переменного электромагнитного поля. Нагрев до расплавления косвенный: излучением (для шихты раздробленной с малым коэффициентом заполнения), а после – контактный. Наружные стенки таких тиглей должны быть изолированы от внутренних стенок индуктора.

#### **Технические характеристики печи.**

Общий КПД тигельной печи 0,48–0,68. Коэффициент мощности ИТП  $\cos\varphi = 0,05–0,3$ . Для компенсации реактивной мощности требуется установка конденсаторов. Мощность ИТП может достигать 4500 кВт·А.

Все плавильные печи относятся к электроприемникам II категории по степени надежности электроснабжения.

Питание установок повышенной и высокой частоты осуществляется от тиристорных или машинных преобразователей индукторного типа.

**Индукционные тигельные печи средней частоты нового поколения.** Российской электротехнологической компанией разработан ряд индукционных тигельных печей средней частоты (ИПСЧ) для скоростных плавки черных и цветных металлов, отвечающих современным требованиям металлургического и литейного производства. Наилучшие показатели эффективности ИПСЧ во многом определяются оптимальным выбором геометрических параметров индуктора, частоты тока возбуждения и удельной активной мощности для плавки определенного металла, а также физическими характеристиками и толщиной футеровки.

Для плавки черных металлов заводом производятся тигельные печи серии ИПП емкостью от 60 до 400 кг, работающие на частоте 2400 Гц. Технические характеристики этих печей приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Тип оборудования	Емкость тигля, т	Частота, Гц	Номинальная мощность, кВт	Время плавки чугуна, мин	Удельный расход эл. энергии, кВт·ч/т
ИПП-0,06-2,4	0,06	2400	100	45	540
ИПП-0,16-2,4	0,16	2400	160	55	550
ИПП-0,25-2,4	0,25	2400	250	55	550
ИПП-0,40-2,4	0,40	2400	320	75	560

При высоких удельных мощностях 800–1000 кВт/т обеспечивается высокая скорость подъема температуры металла (оптимальные ее значения 30–35 °С/мин), что позволяет сократить циклы плавки чугуна до 45 минут при удельном расходе электроэнергии примерно 560 кВт·ч/т. Печи данной серии имеют прочную конструкцию, каркас которой выполнен из нержавеющей стали. Индуктор изготавливается из прямоугольной медной трубки. Толщина стенки трубки выбрана исходя из условий прочности и минимизации электротехнических потерь. Витки индуктора фиксируются на вертикальных изоляционных стойках. Изоляция индуктора выполнена так, чтобы обеспечивался выход влаги наружу при просушивании «мокрых» футеровок. Подиумная часть печи выполняется из литого армированного жаропрочного бетона. Расположение индуктора относительно тигля выбрано так, чтобы максимально уменьшить износ футеровки в верхней зоне при сохранении гарантированного перемешивания металла.

Для данных объемов и рабочей частоты в конструкции печей не предусмотрена установка магнитопроводов, поэтому для уменьшения нагрева полями рассеяния корпусные элементы выполнены из немагнитных металлов.

Индукционные печи серии ИППМ рассчитаны на объемы плавки черных металлов от 1 до 10 тонн. Печи этой серии работают на частотах 200–1000 Гц, их технические характеристики приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Тип оборудования	Емкость тигля, т	Частота, Гц	Номин. мощность, кВт	Время плавки чугуна, мин	Удельный расход эл. энергии, кВт·ч/т
ИППМ-1,0-1,0	1,0	1000	750	60	540
ИППМ -2,5-0,5	2,5	500	1100	80	560
ИППМ -6,0-0,25	6,0	250	7000	60	530

По внешней стороне индуктора устанавливаются магнитопроводы, позволяющие повысить напряженность магнитного поля в зоне расплава металла и увеличить КПД печи и, как следствие, снизить расход электроэнергии до 500–520 кВт·ч/т. Для снижения теплотерь в печах этой серии над тиглем установлена крышка с гидравлическим механизмом поворота.

**Индукционные печи с загрузочным колпаком и устройством взвешивания** применяются для плавки стружки цветных металлов. Печь ИНДУГА характеризуется огнеупорным колпаком с центральной трубкой подачи стружки непосредственно в расплав. Ее размеры обеспечивают адекватное сжигание любых эмульсий, содержащих углеводороды без каких-либо дополнительных потерь металла. Геометрические и электрические характеристики печи обеспечивают эффективное смешивание стружки с расплавом в центре ванны, свободном от шлака. Печь оснащена устройством взвешивания, автоматически контролирующим загрузку и выход. Дополнительные контрольные устройства, требуемые специальными процессами, могут поставляться, если печь интегрируется в существующую линию производства.

Технические данные низкочастотной тигельной печи:

- тип печи: гидравлически наклоняемая;
- мощность 200–3600 кВт;
- емкость 0,8–15 т.

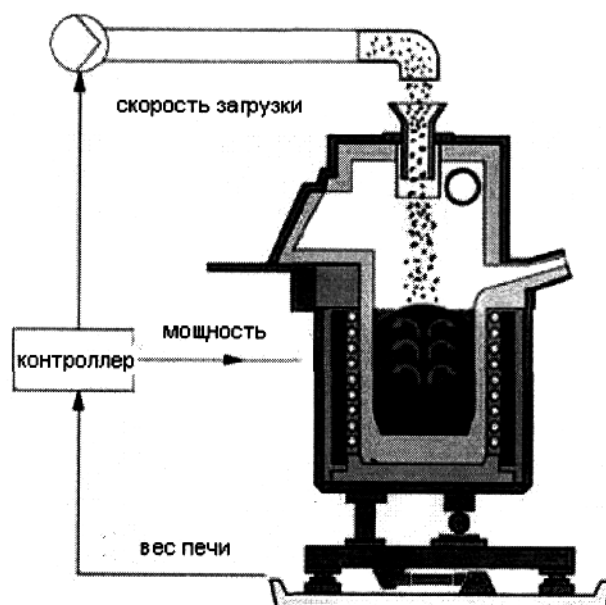


Рис. 3.11. Индукционная печь ИНДУГА

### 3.3. Индукционные нагревательные установки

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

Установки для закалки и сквозного нагрева в зависимости от назначения питаются от сетей переменного тока на частоте от 50 Гц до сотен кГц. Питание установок повышенной и высоких частот производится от тиристорных или машинных преобразователей. Установки относятся к электроприемникам II категории по степени надежности электроснабжения.

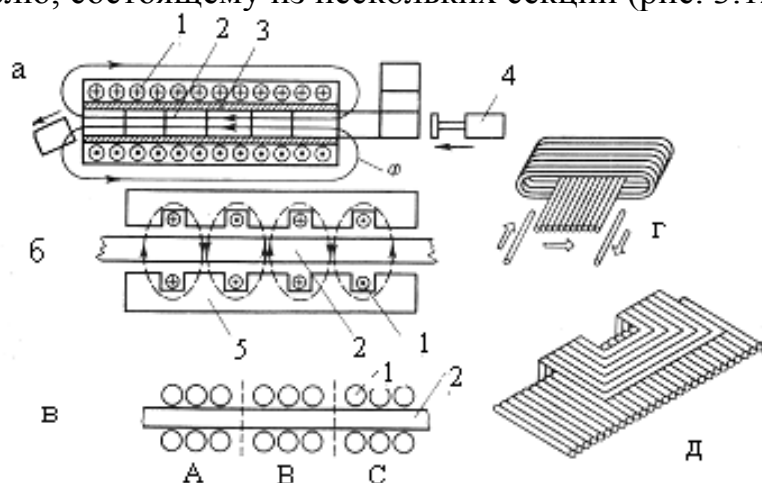
По сравнению с другими видами нагрева (в пламенных печах и печах резисторного нагрева) индукционный нагрев имеет малый угар металла и меньший брак из-за попадания окалины в обрабатываемое изделие. Индукционные установки сквозного нагрева применяются для нагрева заготовок под последующую пластическую деформацию: ковку, штамповку, прессовку, прокатку и т. д. В зависимости от геометрических параметров нагреваемых деталей и их материала источники питания индукционных установок выполняются на частоту 50–10000 Гц. Для установок сквозного нагрева выбор рабочей частоты производят так, чтобы выделение теплоты происходило в слое достаточной толщины по сечению детали при отсутствии большого градиента температуры между поверхностью и слоем определенной толщины. При этом будет меньше перегрев поверхности заготовки и выше КПД установки.

По режиму работу установки сквозного нагрева подразделяют на установки **периодического и непрерывного действия.**

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

В установках **непрерывного** действия одновременно находится несколько заготовок, расположенных в продольном или поперечном магнитном поле (рис. 3.12). В процессе нагрева они перемещаются по длине индуктора, нагреваясь до заданной температуры. В нагревателях непрерывного действия полнее используется мощность источника питания, поскольку средняя мощность, потребляемая ими от источника питания, выше, чем средняя мощность, потребляемая нагревателем периодического действия.

Индукционные нагреватели непрерывного действия имеют более высокий КПД источника питания. Производительность выше, чем у установок периодического действия. Возможно питание нескольких нагревателей от одного источника, а также подключение нескольких генераторов к одному нагревателю, состоящему из нескольких секций (рис. 3.12 в)



**Рис. 3.12. Схемы индукционных нагревательных установок непрерывного действия в поперечном (а, б, в) и продольном магнитном поле:**

1 – индуктор; 2 – нагреваемое тело; 3 – теплоизоляция; 4 – толкатель;  
5 – магнитопровод

Конструкция индуктора для сквозного нагрева зависит от формы и размеров деталей. Индукторы выполняют круглого, овального, квадратного или прямоугольного сечения. Для нагрева концов заготовок индукторы выполняют щелевыми или петлевыми (рис. 3.12 г, д).

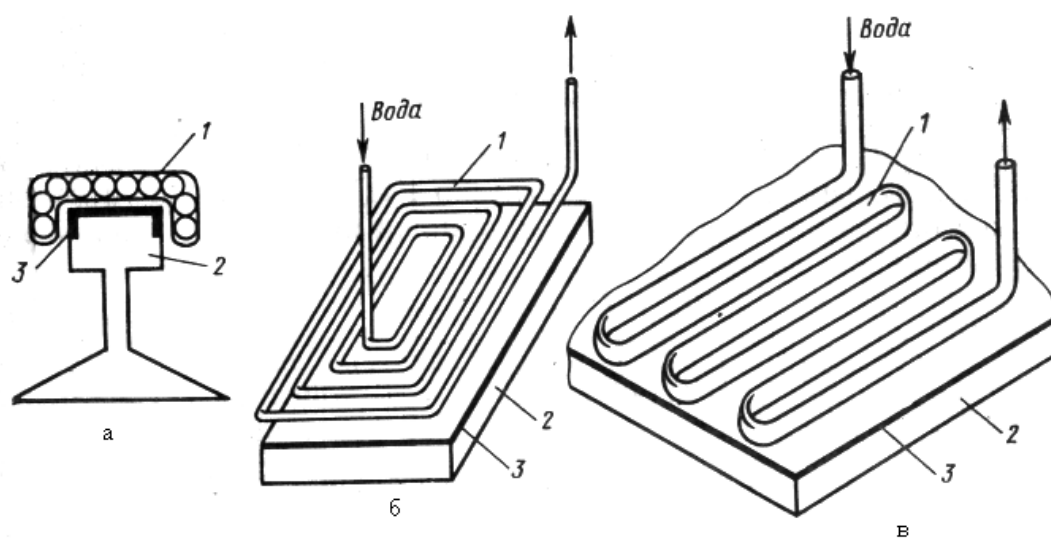
**Индукционный поверхностный нагрев сопровождается** проявлением поверхностного эффекта и эффекта близости. Вследствие поверхностного эффекта ток в нагреваемом изделии распределяется неравномерно. Наибольшая плотность тока имеет место в поверхностных слоях изделия.

При использовании высокой частоты в поверхностных слоях можно получить большие плотности тока, обеспечивающие быстрый нагрев металла.

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

**Индукционная закалка** заключается в быстром нагреве поверхности изделия с последующим быстрым охлаждением на воздухе, в воде или масле. При этом поверхность приобретает высокую твердость и способность хорошо работать на трение, а «сырая» (мягкая) сердцевина обеспечивает высокую сопротивляемость ударным нагрузкам. При таком нагреве удастся во много раз уменьшить объем нагреваемого металла (по сравнению со сквозным нагревом) и значительно сократить расход электроэнергии. Необходимость поддержания высокого электрического и теплового КПД системы индуктор – нагреваемое тело определяет исключительно большое количество форм и размеров индукторов. Схемы некоторых индукторов для поверхностного нагрева показаны на рис. 3.14 а–в. Между индуктором и огнеупорным цилиндром проложен слой теплоизолирующего материала, что снижает тепловые потери и защищает электрическую изоляцию индуктора.

Индукционные установки имеют, как правило, низкий коэффициент мощности, причем значения его изменяются в довольно широких пределах в зависимости от частоты тока, зазора между индуктором и изделием, магнитной проницаемости, удельного сопротивления и размеров нагреваемых изделий. Зависимость коэффициента мощности от частоты тока и диаметра нагреваемых изделий позволяет правильно выбрать реактивную мощность компенсирующей конденсаторной батареи, руководствуясь не только минимальным расходом электроэнергии, но и снижением стоимости установки и сокращением необходимых производственных площадей.



**3.14. Технологические схемы поверхностного индукционного нагрева:**  
1 – индуктор; 2 – нагреваемое изделие; 3 – нагретый слой изделия

### 3.4. Установки диэлектрического нагрева

В установках для нагрева диэлектриков нагреваемый материал помещается в электрическое поле конденсатора и нагрев происходит за счет токов смещения. Эта группа установок широко применяется для клейки и сушки древесины, нагрева пресс-порошков, пайки и сварки пластиков, стерилизации продуктов и т.п. Питание осуществляется переменным током с частотой 20–40 МГц и выше. Установки относятся к электроприемникам II категории по степени надежности электроснабжения.

Использование электрического тока, проходящего через диэлектрики и полупроводники в переменном электрическом поле, является основой диэлектрического нагрева, который имеет преимущества перед другими способами нагрева. Это быстрота, равномерность и высокая производительность. С энергетической точки зрения такой нагрев является наиболее эффективным, поскольку при его осуществлении вся энергия вносится в массу нагреваемого материала.

По технологическим признакам установки высокочастотного нагрева подразделяются на три вида.

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

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

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

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

## **4. ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ ПЕЧИ**

### **4.1. Свойства дугового разряда**

В ряде электротермических процессов, идущих с поглощением большого количества электроэнергии, применяется электродуговой разряд или электрическая дуга, которая позволяет нагревать различные среды до высоких температур, недостижимых при сжигании топлива.

Электрическая дуга является одним из явлений, возникающих при прохождении электрического тока через газ, пары или вакуум. В обычных условиях газы не проводят электрический ток. Проводимость возникает только тогда, когда в газовой или иной среде помимо молекул и атомов появляются свободные заряженные частицы – электроны, положительные и отрицательные ионы – и газ превращается в плазму. Плазмой принято называть вещество, находящееся в состоянии, когда в веществе кроме нейтральных молекул и атомов имеются заряженные частицы – электроны и ионы, проводящие электрический ток. Основные этапы перехода газа в плазму: диссоциация (образование атомов) и ионизация (возникновение заряженных частиц). Заряженные частицы в разрядном промежутке образуются за счет энергии внешнего источника (самостоятельный разряд).

Дуговой разряд характеризуется высокой плотностью тока в канале разряда (порядка  $10^2$ – $10^6$  А/см<sup>2</sup>), низким катодным падением напряжения (менее 20 В), высокой температурой газовой среды в межэлектродном пространстве  $(3$ – $5)10^3$  К и выше.

### **4.2. Общие сведения о дуговых электрических печах**

Электрическая дуговая печь – печь, в которой используется тепловой эффект электрической дуги для плавки металлов и др. материалов. Первые промышленные дуговые печи построены в 1898–1901 гг. П. Эру во Франции и Э. Стассано в Италии. В России первая дуговая печь была установлена в 1910 г. на Обуховском заводе в Петербурге.

В литейном производстве дуговые печи используют для выплавки стали и чугуна из металлического лома и для перегрева жидкого чугуна, получаемого в вагранках или других первичных плавильных печах, для выплавки ферросплавов и чугуна из руд, а также в химической промышленности – для производства карбида кальция, фосфора и др. продуктов. В дуговых печах можно получать высококачественный металл с низким содержанием фосфора, серы, кислорода и других вредных и нежелательных примесей, получать легированные стали с высоким содержанием легирующих добавок. Дуговые печи лучше других приспособлены для переработки металлического лома. Металлизированные окатыши, заменяющие лом, можно загружать в электропечь непрерывно при помощи автоматических дозирующих устройств.



### **Классификация дуговых электрических печей.**

По роду тока: печи, работающие на переменном токе; печи, работающие на постоянном токе.

По способу нагрева:

- печи прямого действия, в которых электрическая дуга горит между концами электродов и расплавляемым материалом;
- печи косвенного действия, где электродуговой разряд горит между электродами, расположенными над нагреваемым материалом, и теплообмен между электрической дугой и материалом осуществляется в основном за счет излучения;
- печи с закрытой дугой, в которых дуги горят под слоем твёрдой шихты, окружающей электроды. Шихта нагревается теплом, выделяющимся в дуге, а также джоулевым теплом, образующимся при прохождении тока через шихту.

**Шихтовые материалы.** Основной составляющей шихты является стальной лом. Лом не должен содержать цветных металлов и должен иметь минимальное количество никеля и меди; желательно, чтобы содержание фосфора в ломе не превышало 0,05 %, при более высоком содержании фосфора продолжительность плавки возрастает. Лом не должен быть сильно окисленным (ржавым), так как с ржавчиной (гидратом окиси железа) вносится в металл много водорода. Лом должен быть тяжеловесным, чтобы обеспечивалась загрузка шихты в один прием (одной бадьей). При легковесном ломе после частичного расплавления первой порции шихты приходится вновь открывать печь и подсаживать шихту, что увеличивает продолжительность плавки.

В последнее время расширяется применение металлизированных окатышей и губчатого железа – продуктов прямого восстановления обогащенных железных руд. Они содержат 85–93 % Fe, основными примесями являются окислы железа,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Отличительная особенность этого сырья – наличие углерода от 0,2–0,5 до 2 % и очень низкое содержание серы, фосфора, никеля, меди и других примесей. Это позволяет выплавлять сталь, отличающуюся повышенной чистотой от примесей.

Переплав отходов легированных сталей позволяет экономить дорогие ферросплавы. Эти отходы сортируют по химическому составу и используют при выплавке сталей, содержащих те же легирующие элементы, что и отходы.

Для повышения содержания углерода в шихте используют чугуны, кокс и электродный бой. В качестве шлакообразующих в основных печах применяют известь, известняк, плавиковый шпат, боксит, шамотный бой; в кислых печах – кварцевый песок, шамотный бой, известь. В качестве окислителей используют железную руду, прокатную окалину, агломерат, железные окатыши, газообразный кислород. В электросталеплавильном про-

изводстве для легирования и раскисления применяются практически все известные ферросплавы и легирующие.

### 4.3. Дуговые печи переменного тока

#### 4.3.1. Конструкция дуговых сталеплавильных печей прямого действия

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) прямого действия предназначены для выплавки стали в слитки для последующего передела в прокатных цехах, а также для получения фасонного литья, металлургического сырья, химических продуктов. Промышленностью освоен выпуск дуговых печей вместимостью 0,5; 1,5; 3; 6; 12; 25; 50; 100 и 200 т.

Печи состоят из следующих основных частей:

- каркаса;
- механизма наклона;
- футеровки;
- свода, механизма перемещения свода;
- электродов;
- электрододержателей и механизма перемещения электрододержателей;
- установки электромагнитного перемешивания металла в ванне;
- системы водяного охлаждения, гидравлического привода механизмов, электрооборудования.

**Каркас.** Все нагрузки от футеровки и жидкого металла, а в некоторых конструкциях и от механизмов наклона печи и подъема свода воспринимаются каркасом печи. Каркас может быть цилиндрической или конической формы, слегка расширяющийся кверху. Каркас сваривают из листовой низкоуглеродистой стали и усиливают ребрами жесткости. Толщина стенки каркаса зависит от вместимости печи. Днище каркаса может быть плоским, коническим или сферическим. В каркасе вырезают отверстия для загрузочного окна и металлической летки. На больших печах боковые стены каркаса имеют водяное охлаждение. В ряде случаев каркас печи выше уровня жидкого металла представляет собой отдельные водоохлаждаемые панели, соединенные между собой болтами.

На поверхности панели, обращенной в рабочее пространство печи, имеются ребра и иглы, на которые нанесен тонкий слой огнеупорной массы. В подобных печах потери энергии через стены выше, чем у печей без охлаждения стен, но удельный расход энергии на тонну выплавленного металла меньше, так как время плавки значительно сокращается. Кроме того, сокращаются простои печи, связанные с ремонтом футеровки стен.

**Механизм наклона.** Для слива металла печь наклоняют на 40–45° в сторону сливного носка, а для скачивания шлака – на 10–15° в сторону ра-

бочего окна. Печь наклоняют с определенной скоростью механизмом с электромеханическим или гидравлическим приводом, находящимся сбоку от нее или под ней. Механизм наклона печи вместимостью 0,5; 1,5 и 3 т состоит из двух гидравлических цилиндров, размещенных под печью (рис. 4.1).

К каркасу печи на болтах присоединены два литых сегмента, установленные на литые плиты. На плитах и сегментах выполнены зубцы, надежно фиксирующие печь в определенном положении. Печь наклоняют при перемещении штока цилиндров, которые шарнирно соединены с фундаментом и каркасом.

**Футеровка.** Подина состоит из нескольких слоев. Первый слой, соприкасающийся с жидким металлом и шлаком, – набивной из огнеупорного порошка. При кислом процессе используют набивку из кварцевого песка, при основном – набивку из магнезитового порошка. Второй слой подины при кислом процессе выполняют из динаса, а при основном – из магнезита. Последующие слои состоят из шамота, диатомита и асбеста.

Стены печей – многослойные. Первый слой в зависимости от процесса выкладывают из динасового или магнезитового кирпича, второй – из шамотного кирпича, третий – из диатомитового порошка, который, выполняя роль теплоизоляции, одновременно компенсирует расширение огнеупоров при их нагреве и тем самым предохраняет каркас от разрушения. Вместо огнеупорных кирпичей иногда применяют набивные блоки, изготовленные из кварцевого песка или магнезитового порошка. У сверхмощных сталеплавильных печей стены из огнеупоров заменяют водоохлаждаемыми панелями.

**Свод.** Известны печи с водоохлаждаемым сводом, в котором футеровка отсутствует полностью или сохраняется только в центральной части свода, где расположены электроды. Своды изготавливают с помощью специального шаблона из высокоглиноземистого или электродинасового нормального и фасонного кирпича.

**Механизм перемещения свода.** При загрузке печей применяют специальные механизмы для подъема и поворота свода. Наиболее широко используют метод загрузки сверху. При загрузке шихты свод вместе с электродами поднимают и поворачивают на 80–100°. Открытую печь загружают с помощью специальных загрузочных корзин. По окончании загрузки свод возвращают в исходное положение. После этого может быть начат рабочий цикл. У некоторых печей свод после подъема остается в приподнятом положении, а печь выкатывают из-под свода на позицию загрузки. По окончании загрузки печь устанавливают в первоначальное положение, а свод опускают. Механизированная загрузка шихты позволяет повысить производительность печи и сэкономить электроэнергию.

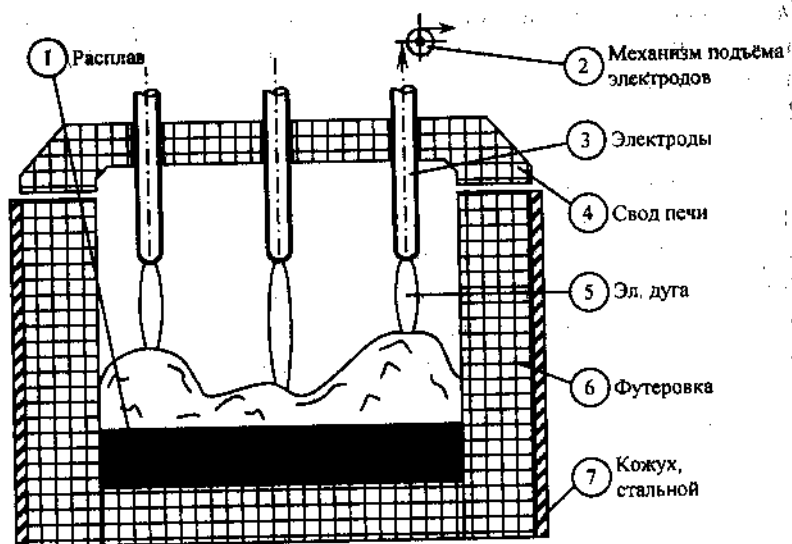


Рис. 4.1. Конструкция дуговой сталеплавильной печи

**Электроды.** *Электроды* в дуговых печах служат для ввода электроэнергии внутрь рабочего пространства печи, для расплавления шихты и получения необходимых материалов. Применяются угольные или графитированные электроды. Угольные электроды изготовляют из антрацита и кокса, а графитированные – из искусственного графита в специальных электрических печах. В современных печах в подавляющем большинстве применяются графитированные электроды. Иногда применяемые графитоугольные электроды диаметром 100–1200 мм изготовляют из антрацита, термоантрацита (прокаленного антрацита), нефтяного кокса, каменноугольного пека и смолы в специальных печах путем обжига заготовок без доступа кислорода при температуре до 1600 К. Угольные электроды по сравнению с графитированными имеют меньшую механическую прочность и большее удельное сопротивление. Поэтому угольные электроды обычно применяют лишь на малых печах вместимостью до 3 т.

Таблица 4.1

Параметр	Электроды								
	графитированные						угольные		другие
Диаметр, мм <sup>2</sup>	150	300	400	500	600	700	150	300	600
Плотность тока, не более, А/см <sup>2</sup>	26	19	16	15	10-15	10-13	12	10	30

В дуговых печах применяются непрерывно наращиваемые электроды. Они имеют круглое сечение и обработанные торцы, в которых по оси имеются отверстия с резьбой. В отверстия ввинчены до половины своей длины ниппели, выполненные из материала электрода. На выступающую из торца электрода половину ниппеля навинчен следующий электрод и т.д. Таким способом изготавливается электродная свеча, состоящая из нескольких электродов. Электроды имеют длину 1000–1800 мм. Управление перемещени-

ем электродов в процессе плавки производится в автоматическом режиме с помощью электрогидравлического регулятора.

**Электродержатели (ЭД).** Электроды крепятся в специальных ЭД, которые предназначены для удержания электродов и подвода к ним тока. Каждый ЭД закреплен на стойке, которая может перемещаться в вертикальном направлении. ЭД связаны с механизмом перемещения электродов. Ток подводится к ЭД с помощью пакета медных шин или водоохлаждаемых труб.

**Установки электромагнитного перемешивания металла** позволяют ускорить выведение вредных газов и компонентов из расплава, выровнять химический состав расплава. Жидкий металл в ванне приводится в движение с помощью электромагнитных устройств переменного тока с перемежающимся магнитным полем при частотах 0,4–1,0 Гц. Промышленные установки электромагнитного перемешивания состоят из трех компонентов: индуктора, источника питания и системы охлаждения.

Индукторы электромагнитного перемешивания выполняют в виде цилиндрических или плоских конструкций. В первом случае индукторы располагаются на боковой поверхности корпуса, во втором – под донной поверхностью. Мощность индукторов составляет 0,5–0,6 кВт, напряжение фазы – 115–180 В, коэффициент мощности – 0,5–0,6. В качестве источников питания индукторов используют электромагнитные преобразовательные агрегаты и тиристорные преобразователи частоты. Охлаждение статора производится водой, если он изготовлен из медной трубки, или воздухом, по специальным каналам внутри обмотки. Стоимость установки электромагнитного перемешивания металла составляет 30–100% стоимости печи, а расход энергии в ней на 1 т выплавленной стали – 3–5% от полного расхода энергии.

**Электрооборудование** состоит из печного трансформатора, дросселей, коммутационно-защитной аппаратуры. На рис. 4.2 показана конструкция дуговых печей вместимостью 0,5; 1,5 и 3 т.

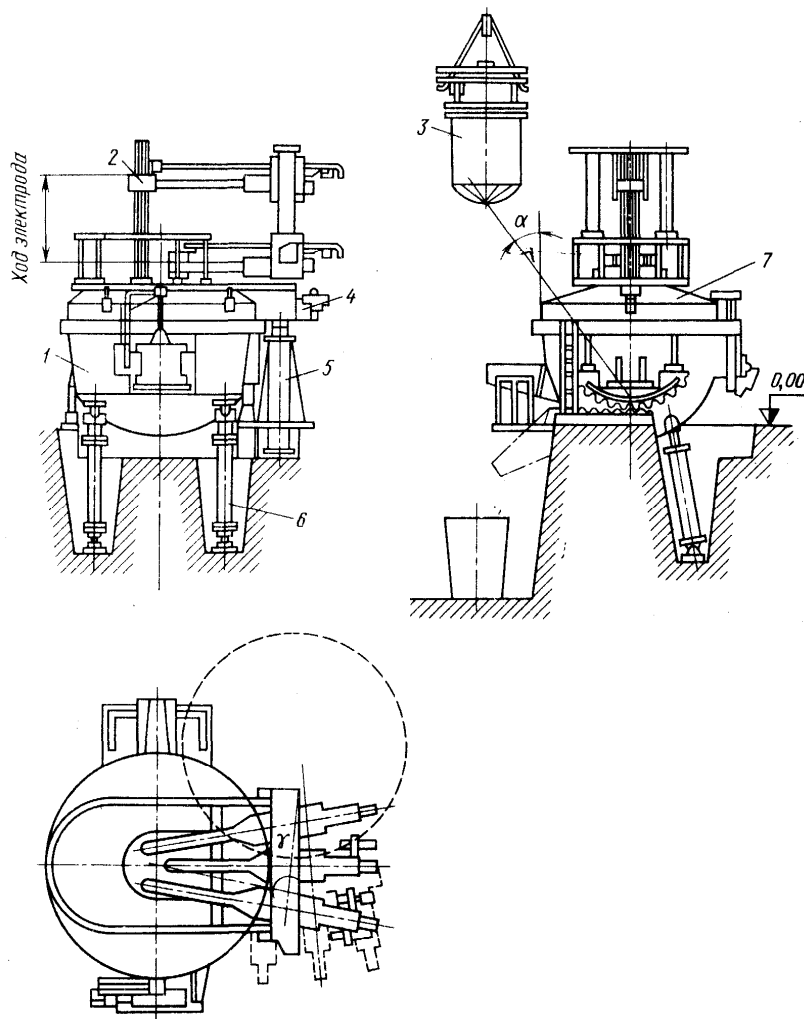
#### 4.3.2. Технологии плавки стали в ДСП

Технология плавки стали в ДСП зависит от используемых шихтовых материалов, емкости печи, необходимого качества стали. Ниже рассмотрены некоторые технологии.

**1. Плавка в основной печи на углеродистой шихте.** Данная технология применяется на печах малой и средней ( $\leq 40$  т) емкости при выплавке качественных легированных сталей. Плавка состоит из следующих периодов: заправка печи; загрузка шихты; плавление; окислительный период; восстановительный период; выпуск стали.

**Заправка печи.** Заправка – это исправление изношенных и поврежденных участков футеровки пода. После выпуска очередной плавки с

подины удаляют остатки металла и шлака. На поврежденные подины и откосы забрасывают магнезитовый порошок. Длительность заправки 10–15 мин.



**Рис. 4.2. Дуговая печь типа ДСП вместимостью 0,5; 1,5; 3 т:**  
 1 – каркас; 2 – электрододержатель; 3 – корзина; 4 – траверса;  
 5 – механизм подъема и поворота свода;  
 6 – гидравлический цилиндр; 7 – свод

### **Загрузка шихты.**

При выплавке стали в печах малой и средней емкости шихта на 90–100 % состоит из стального лома. Для повышения содержания углерода в шихту вводят чугун (<10 %), а также электродный бой или кокс. Чтобы совместить удаление части фосфора при плавлении шихты, в завалку рекомендуется давать 2–3 % извести. Загрузку ведут бадьями или корзинами. Необходима плотная укладка шихты, это улучшает ее проводимость, обеспечивает устойчивое горение дуги, ускоряет плавление. Для уменьшения угара кокс и электродный бой кладут под слой крупного лома.

**Плавление.** После окончания завалки электроды опускают почти до касания с шихтой и включают ток. Под действием высокой температуры дуги шихта под электродами плавится, жидкий металл стекает вниз, накапливаясь в центральной части подины. Электроды постепенно опускаются, проплавляя в шихте «колодцы» и достигая крайнего нижнего положения. По мере увеличения количества жидкого металла электроды поднимаются. Это достигается при помощи автоматических регуляторов для поддержания определенной длины дуги. Плавление ведут при максимальной мощности трансформатора.

Во время плавления происходит окисление составляющих шихты, формируется шлак, происходит частичное удаление в шлак фосфора и серы. Окисление примесей осуществляется за счет кислорода воздуха, окалины и ржавчины, внесенных металлической шихтой.

Для ускорения плавления иногда применяют газокислородные горелки, вводимые в рабочее пространство через под или стенки печи, позволяющие вводить в жидкий металл кислород. При расходе кислорода 4–6 м<sup>2</sup>/т длительность плавления сокращается на 10–20 мин.

Продолжительность периода плавки определяется мощностью трансформатора и составляет от 1,1 до 3,0 ч. Расход электроэнергии за время плавления составляет 400–480 кВт·ч/т.

**Окислительный период.** Задачи окислительного периода: уменьшить содержание в металле фосфора до 0,01–0,015 %; водорода и азота; нагреть металл до температуры, близкой к температуре выпуска.

Кроме того, за время периода окисляют углерод до нижнего предела его содержания в выплавляемой стали. За счет кипения (выделения пузырьков СО при окислении углерода) происходит дегазация металла и его перемешивание, что ускоряет процессы дефосфорации и нагрева. Окисление примесей ведут, используя либо железную руду (окалину, агломерат), либо газообразный кислород. За все время плавления и окислительного периода в шлак удаляется до 30–40% серы, содержащейся в шихте. При кипении вместе с пузырьками СО из металла удаляются водород и азот. Этот процесс имеет большое значение для повышения качества стали, поскольку в электропечи в зоне электрических дуг идет интенсивное насыщение металла азотом и водородом. В связи с этим сталь обычно содержит азота больше, чем мартеновская и кислородно-конвертерная сталь.

Окислительный период заканчивается тогда, когда углерод окисляется до нижнего предела его содержания в выплавляемой марке стали, а содержание фосфора снижено до 0,01–0,015 %. Период заканчивают сливом окислительного шлака. Полное скачивание окислительного шлака необходимо, чтобы содержащийся в нем фосфор не перешел обратно в металл во время восстановительного периода.

**Восстановительный период.** Задачи восстановительного периода: раскисление металла и удаление серы; доведение химического со-

става стали до заданного; корректировка температуры; введение в металл нужных легирующих компонентов.

Раскисление металла проводится с целью получения необходимых свойств стали, уменьшения содержания окислов железа в шлаке, получения стали с пониженным содержанием неметаллических включений. В восстановительный период в печь вводят в определенной последовательности ферромарганец, ферросилиций, известь, плавиковый шпат и шамотный бой и др.

Для улучшения перемешивания шлака и металла и интенсификации медленно идущих процессов перехода в шлак серы, кислорода и неметаллических включений в восстановительный период рекомендуется применять электромагнитное перемешивание, особенно на большегрузных печах, где удельная поверхность контакта металла со шлаком значительно меньше, чем в печах малой емкости.

Длительность восстановительного периода составляет 40–100 мин. За 10–20 мин до выпуска проводят корректировку содержания кремния в металле, вводя в печь кусковой ферросилиций. Для конечного раскисления за 2–3 мин до выпуска в металл присаживают 0,4–1,0 кг алюминия на 1 т стали. Выпуск стали из печи в ковш производят совместно со шлаком. Интенсивное перемешивание металла со шлаком в ковше обеспечивает дополнительное **рафинирование** – из металла в белый шлак переходит сера и неметаллические включения.

При выплавке **легированных сталей** в дуговых печах в конце периода расплавления в сталь вводят легирующие добавки. Хром и марганец вводят в металл после слива окислительного шлака в начале восстановительного периода, никель в завалку, а молибден в конце плавления или в начале окислительного периода. Вольфрам обычного вводят в начале восстановительного периода, не позднее чем за 30 минут до выпуска. Легирование стали феррованадием производят за 15–35 мин до выпуска, ферросилицием – за 10–20 мин до выпуска. Ферротитан вводят в печь за 5–15 мин до выпуска, либо в ковш. Алюминий вводят за 2–3 мин до выпуска в ковш. После легирования металл выливается в ковш для разливки стали.

**Длительность плавки.** Плавка в крупных печах длится 4–6 ч: из них 1,5–2,5 ч длится расплавление и 2–4 ч – окисление и рафинирование металла. Режимы работы печи и стадии технологического процесса могут быть различными в зависимости от вида скрапа, шихты, состава футеровки, применения легирующих компонентов.

**2. Выплавка стали методом переплава.** На металлургическом заводе отходы легированной стали, разливаемой в изложницы, достигают 25–40 %. По мере накопления отходов выплавляют сталь методом переплава. Плавку ведут без окисления или с непродолжительной продувкой кислородом, что позволяет сохранить значительную часть содержащихся в отходах ценных легирующих элементов.



При плавке без окисления углерод и фосфор не окисляются, поэтому содержание фосфора в шихте не должно быть выше его допустимых пределов в готовой стали, а содержание углерода на 0,05–0,1% ниже, чем в готовой стали. В шихту помимо легированных отходов вводят мягкое железо – шихтовую заготовку с низким содержанием углерода и фосфора и, при необходимости, феррохром и ферровольфрам.

Загрузку и плавление шихты производят как при обычной плавке; в период плавления загружают 1–1,5 % извести или известняка. После расплавления шлак, как правило, не скачивают, сразу приступая к проведению восстановительного периода. При этом раскисление, десульфурацию и легирование металла производят обычным способом. При диффузионном раскислении из шлака восстанавливается хром, вольфрам и ванадий. Если после расплавления шлак получился густым из-за высокого содержания окиси магния, его скачивают и наводят новый.

При выплавке стали методом переплава сокращается расход ферроплавов, на 10–30 % возрастает производительность печи, на 10–20 % сокращается расход электроэнергии и электродов.

**3. Выплавка высококачественных сталей по упрощенной технологии с последующим внепечным рафинированием стали.** Используются следующие технологии:

- плавка с рафинированием металла в ковше печным шлаком;
- плавка с рафинированием в ковше синтетическим шлаком;
- технология с продувкой в ковше порошкообразными реагентами;
- плавка с рафинированием и доводкой металла вне печи.

Общим для всех разновидностей второго направления технологии является стремление использовать крупные печи в основном для расплавления шихты, нагрева металла и проведения окислительных процессов – дефосфорации и обезуглероживания; иногда в печи проводят также легирование и формирование требуемого перед выпуском состава шлака.

**4. Плавка с использованием металлизированных окатышей.** Основу окатышей (губки) составляет железо с содержанием углерода от 0,2–0,5 до 2 %, они содержат также некоторое количество невосстановленных окислов железа и пустую породу (в основном  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), количество которой должно быть не более 3–7 % от массы окатышей. Отличительная особенность этого сырья – малое содержание серы, фосфора, меди, никеля, хрома и других примесей, обычно содержащихся в стальном ломе. Это облегчает и упрощает процесс выплавки и получение стали высокого качества и степени чистоты (суммарное содержание примесей в стали получается в несколько раз меньше, чем при выплавке из стального лома).

Если содержание металлизированных окатышей в шихте не превышает 25–30 % от её массы, то технология электроплавки существенно не отличается от обычной. Переработка шихты, основу которой составляют ме-

таллизованные окатыши, требует применения специфической технологии. Особенности этой технологии являются:

- непрерывная загрузка окатышей со скоростью, пропорциональной подводимой в печь электрической мощности, причем загрузка должна начинаться после формирования в печи ванны жидкого металла;
- совмещение периода плавления с окислительным (обезуглероживанием);
- упрощение технологии плавки в связи с малым содержанием в шихте вредных примесей – серы и фосфора.

Степень металлизации окатышей должна находиться в определенных пределах, обеспечивающих кипение ванны в процессе их загрузки и плавления. Оптимальное содержание окатышей в шихте составляет 60–70% от её массы, при большем их содержании возрастает длительность расплавления и плавки в целом.

Плавку начинают с загрузки стального лома, который в количестве 30–40% от массы металлической шихты заваливают в печь одной порцией. Далее подают напряжение и после расплавления лома в сформировавшуюся жидкую ванну начинают непрерывную загрузку окатышей; обычно их загружают в зону электрических дуг с помощью автоматизированной системы через отверстие в своде печи. Скорость подачи окатышей согласуют с подводимой в печь электрической мощностью так, чтобы температура ванны была на 30–40 °С выше температуры плавления металла.

Период загрузки и расплавления совмещают с окислительным, т.е. проводят его так, чтобы обеспечить непрерывное окисление углерода (кипение ванны). При этом благодаря перемешиванию ускоряется плавление окатышей, обеспечиваются дегазация ванны и получение в конце периода заданного содержания углерода в металле.

По ходу плавления в печь загружают известь для ошлакования кислой пустой породы окатышей. Основность шлака в связи с низким содержанием в окатышах серы и фосфора может быть меньшей, чем при плавке на шихте из стального лома, и составлять 1,5–2,0. В конце периода плавления необходимо получить требуемое в выплавляемой стали содержание углерода; при недостатке углерода прибегают к вдуванию в ванну карбюраторов, избыточный углерод окисляют путем кратковременной продувки кислородом.

После окончания плавления применяют различные варианты ведения заключительной части плавки. Один из них – нагрев металла до требуемой температуры и выпуск в ковш, где производят внепечную доводку стали и рафинирование; другой – проведение в печи кратковременной доводки, в течение которой проводят нагрев, раскисление и легирование.

**5. Выплавка стали в кислых дуговых печах.** Электрические печи с кислой футеровкой обычно используют в литейных цехах при выплавке стали для фасонного литья. Преимуществом кислых печей по сравнению с

основными является более высокая стойкость футеровки, наряду с этим стоимость кислых огнеупоров примерно в 2,5 раза ниже стоимости основных. При плавке стали для фасонного литья восстановительный период обычно отсутствует, длительность плавки меньше, чем в основной той же емкости. По этой причине, а также в связи с меньшей теплопроводностью кислой футеровки, более низким является и расход электроэнергии. Основным недостатком кислых печей является то, что во время плавки из металла не удаляется сера и фосфор.

**Удаление газов.** Во время плавки из электропечи выделяется большое количество запыленных газов. Температура газов составляет 900–1400 °С, содержание пыли в период продувки ванны кислородом доходит до 100 г/м<sup>3</sup> газа. Количество газов, выделяющихся, например, из печи емкостью 100 т в период продувки кислородом, достигает 9–10 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Для создания нормальных условий работы в сталеплавильном цехе необходимы улавливание и очистка отходящих газов.

В старых цехах с печами малой емкости применяются отсасывающие зонты, установленные над сводом. Однако они громоздки, не обеспечивают полное сгорание газов. В настоящее время газы отводят через отверстие в своде с последующей очисткой от пыли. Наибольшее распространение получила мокрая газоочистка с использованием труб Вентури.

Технические характеристики ДСП переменного тока прямого действия приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Тип печи	Номин. мощность транс-ра, кВ·А	Напряжение первичной обмотки, кВ	Пределы изменения U <sub>2</sub>	Ток вторичной обмотки, кА	Уд. расход ЭЭ, кВт·ч/т
ДС-0,5	400	6; 10	213–110	1,085	650
ДСП-0,5ИЗ	630	6; 10	216–98	нд	560
ДСП-1,5	1000	6; 10	225–118	2,57	550
ДСП-1,5ИЗ	1250	6; 10	225–103	нд	480
ДСП-3	1800	6; 10	242–122,5	2,25	525
ДСП-6ИЗ	2000	6; 10	243–116	нд	465
ДСП-6	2800	6; 10	257–197,5	6,3	нд
ДСП-12	5000	6; 10	278–202	10,4	500
ДСП-12НЗ	8000	6; 10	318–120	нд	435
ЖДСП-20	9000	6; 10	318–116	16,35	470
ДСП-25	16000	6; 10	384–148	24–10	нд
ДСП-25Н2	15000	35	370–128	нд	430
ДСП-40	15000	35	386–126	23,5	нд
ДСП-50Н2	20000	35	407–144	нд	415
ДСП-50	20000–29150	35	486–152	27,7–34,6	460–440
ДСП-80	32000	35	478–161	38,8	420
ДСП-100	45000	35	591,5–164,1	43,9	нд
ДСП-200	45000	35	нд	нд	400

### 4.3.3. Дуговые печи косвенного действия

**Дуговая печь косвенного действия** предназначена для переплава цветных металлов и их сплавов, а также для выплавки некоторых сортов чугуна и никеля. Ее основное преимущество – небольшой угар металла, так как электродуговой разряд не соприкасается непосредственно с переплавляемым материалом. Однофазная дуговая печь косвенного действия (рис. 4.3) представляет собой горизонтально расположенную ванну, футерованную изнутри огнеупором. В противоположных боковых стенках установлены графитированные электроды, перемещаемые по мере обгорания механизмами подачи. Переплавляемый материал загружают на дно ванны через отверстие в боковой поверхности корпуса. На электроды подается напряжение, затем они сводятся до соприкосновения и возникновения тока в цепи и затем разводятся, что приводит к возникновению электрической дуги. Вследствие поглощения выделяемой дугой энергии происходит нагрев и расплавление металла. После расплавления металла печь наклоняется механизмом наклона и из нее сливается расплав. Регулирование мощности печи производится путем изменения тока и длины дуги.

К электрооборудованию дуговых печей относятся: печной трансформатор, регулировочный реактор и электропривод механизма подачи электродов. Ток к электродам подводится гибкими кабелями от печного трансформатора. Регулирование расстояния между электродами осуществляют с помощью электропривода, управляемого персоналом дистанционно, или автоматическим регулятором режима. Дуговые печи косвенного действия производят емкостью 0,25 и 0,5 т. Они снабжены трансформаторами мощностью 175–250 и 250–400 кВ·А.

Режим работы дуговой печи зависит от режима процесса плавки. При расплавлении металлического лома печь работает на максимальной мощности. При доводке жидкого металла до требуемого химического состава мощность печи сравнительно невелика.

Режим печи регулируется либо изменением напряжения на электродах, либо изменением длины дуги, т.е. силы тока. Для изменения подводимого к печи напряжения трансформатор снабжается устройством регулирования напряжения, для чего на первичной обмотке предусматриваются одно основное и несколько дополнительных ответвлений (для малых печей предусматривают 2–4 ступени регулирования напряжения; для крупных печей – до 25 ступеней). Изменение длины дуги осуществляют опусканием или поднятием электродов с помощью автоматической системы. Печь подключают к трехфазной сети промышленной частоты напряжением 6–35 кВ. С целью уменьшения потерь электроэнергии печные трансформаторы устанавливают на минимальном расстоянии от печи.

В цепь высокого напряжения включают реактор (дроссель), который ограничивает силу тока при коротком замыкании электродов на металл.

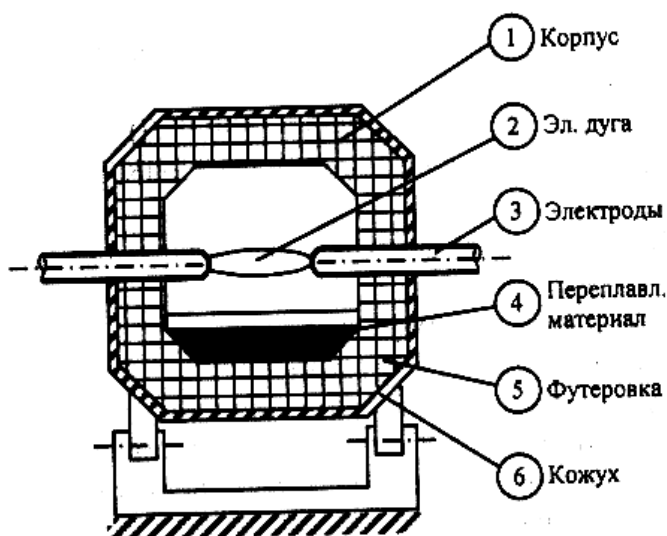


Рис. 4.3. Схема дуговой печи косвенного действия

#### 4.3.4. Электрооборудование ДСП

К основному электрооборудованию ДСП относят:

- печь с электродами и ванной;
- понизительный трансформатор;
- дроссели;
- короткую сеть;
- коммутационную, измерительную и защитную аппаратуру.

Принципиальная электрическая схема показана на рис. 4.4. Первичная цепь печи состоит из последовательно соединенных проводов и аппаратов высокого напряжения, дросселя и первичной обмотки трансформатора. Вторичная цепь состоит из последовательно соединенных вторичной обмотки трансформатора, токопроводов короткой сети, соединяющих вторичные выводы трансформатора с электродами печи; электродов и электрических дуг.

Электроснабжение трансформаторов печной подстанции производится от сети 6(10)–35 кВ, а для мощных подстанций – 110 кВ. Цепи измерения и защиты подключены к трансформаторам тока и напряжения.

Для поддержания оптимального режима печи устанавливаются автоматические регуляторы мощности печи. Такие регуляторы воздействуют на механизм передвижения электродов, изменяют длину дуги и поддерживают заданное значение мощности дуговой печи. Для повышения точности регулирования созданы автоматизированные системы управления ДСП.

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

- высокое значение номинального тока на стороне низкого напряжения (до десятков и сотен килоампер);
- большой коэффициент трансформации;
- число ступеней и диапазон регулирования напряжения гораздо больше, чем у силовых трансформаторов (напряжение регулируется примерно на 500 %);
- трансформаторы обладают высокой стойкостью против эксплуатационных коротких замыканий с кратностью тока  $(2,5-3)I_N$ , имеют высокую механическую прочность.

Мощные печные трансформаторы имеют принудительное охлаждение с искусственной циркуляцией масла через теплообменник, снабжены устройствами РПН, производящими до 160 переключений в сутки.

Обмотки трехфазных трансформаторов соединяются по схеме «треугольник – треугольник» с возможностью переключения по схеме «треугольник – звезда», что позволяет переводить печь с линейного напряжения на фазное.

Регулирование напряжения на электродах печи и ее электрических характеристик осуществляется с помощью устройства ПБВ или РПН. Переключение без возбуждения применяется на печных трансформаторах малой и средней мощности. В трансформаторах большой мощности переключение осуществляется под нагрузкой, для чего трансформатор снабжается автоматическим регулятором напряжения.

**Дроссель, или реактор**, служит для ограничения бросков тока при эксплуатационных коротких замыканиях и стабилизации горения дуг за счет создания падающей характеристики цепи питания. У работающих непрерывно дуговых печей режим работы дросселя прерывистый, условия его работы тяжелые, поэтому он должен удовлетворять повышенным требованиям термической и механической прочности. Дроссель включается между сетью и линейными зажимами обмотки высокого напряжения трансформатора или в «фазу» – последовательно с данной обмоткой. Чаще всего дроссель располагают в общем кожухе с печным трансформатором.

**Короткой сетью** называют токопровод от выводов вторичной стороны трансформаторов до электродов дуговой печи. Короткая сеть состоит из участков жестко закрепленных шинопроводов и гибких проводов, соединяющих концы шинопроводов с электродами. Токопроводы короткой сети пропускают очень большие токи (до 100 кА и выше), имеют большое

сечение и выполнены в виде пакетов медных лент, медных шин или водоохлаждаемых труб.

Несмотря на небольшую длину короткой сети, ее активное и особенно индуктивное сопротивление являются определяющей составляющей общего сопротивления участков печной установки. Они оказывают существенное влияние на энергетические показатели работы печи: мощность, коэффициент мощности, КПД и т.д.

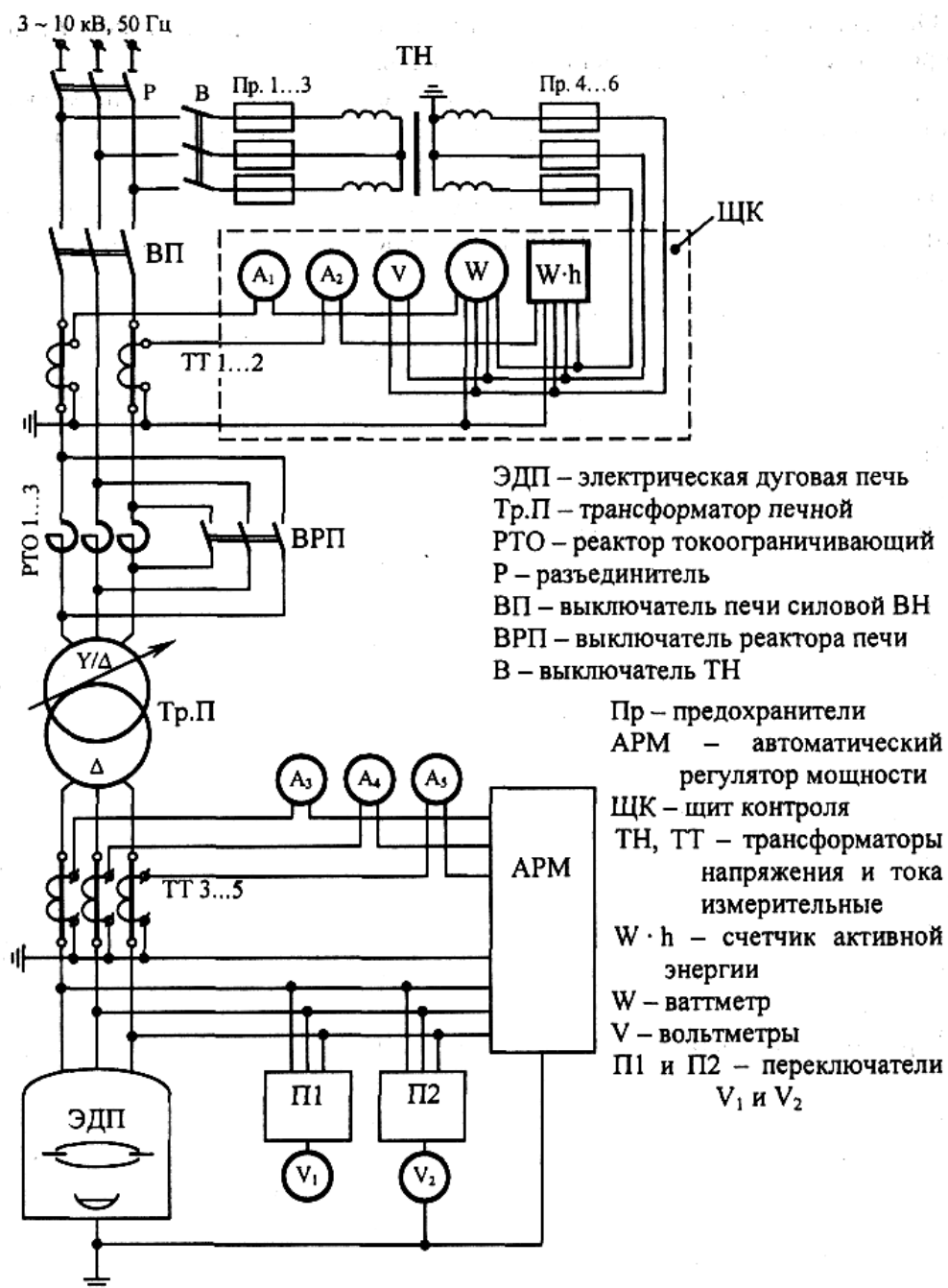


Рис. 4.4. Принципиальная электрическая схема электроснабжения и контроля ДСП

#### 4.3.5. Режимы работы дуговых сталеплавильных печей

ДСП относятся ко второй категории по надежности электроснабжения. Печи условно разделяются на три группы:

- печи малой емкости (0,5–6 т) с трансформаторами мощностью 1–3 МВ·А, подключаемыми к шинам 6–10 кВ заводских подстанций;
- печи средней емкости (10–50 т) с трансформаторами мощностью 3–15 МВ·А и напряжением первичной обмотки 6–10 кВ;
- печи большой емкости (80, 100 и 200 т) с трансформаторами мощностью 25–125 МВ·А на напряжения 35, 110, 220 кВ.

В мировой практике наблюдается тенденция увеличения емкости печей до 300–400 т с увеличением мощности печных трансформаторов до 150 МВ·А. Печи малой емкости применяются в основном в машиностроении, например в литейных цехах, и служат для производства фасонного литья.

В ДСП металлургических заводов выплавляются стали широкого сортамента: от углеродистых до высоколегированных и специальных сплавов. Углеродистые и низколегированные стали выплавляются, в основном, в печах большой емкости, высоколегированные стали – в печах средней и малой емкости.

Печи работают непрерывно. Длительные отключения печи происходят только при ее ремонтах. Число же кратковременных отключений в процессе одной плавки достигает нескольких десятков.

Нагрузка ДСП непрерывно-циклическая. Цикличность работы характеризуется чередованием плавки с остановками печи для слива металла, заправки печи и завалки шихты. Для плавки стали характерны три последовательно проходящих периода: расплавление, окисление, восстановление (рафинирование). Наибольшую мощность ДСП потребляет в период плавления шихты, который по времени длится от 1/3 до 2/3 времени плавки.

На рис. 4.5 показан график изменения средней мощности ДСП-100 с трансформаторами мощностью 25 МВ·А за один технологический цикл плавки продолжительностью 4,5 ч. На графике видно несколько отключений агрегата на 10–20 мин и указаны причины отключений. Технологические отключения на время от 1 до 10 мин не показаны (их число значительно больше, и они увеличивают переменный характер нагрузки). На графике показаны усредненные нагрузки. В действительности нагрузка имеет неустойчивый резкопеременный характер, неравномерный по фазам.

ДСП являются причиной возникновения колебаний напряжения, несимметрии токов и напряжений и несинусоидальности напряжения.

**Колебания напряжения** вызываются колебаниями нагрузки, которые очень значительны, особенно в период расплавления шихты. На рис 4.6 представлены осциллограммы активной и реактивной мощности в фазах



питающей сети при работе ДСП с трансформатором мощностью 63 МВ·А в период расплавления. Как видно из осциллограмм, изменение нагрузки печи происходит с частотой 1–12 Гц и носит характер нерегулярных колебаний, связанных с неустойчивым горением дуг. В соответствии с особенностями характеристик ДСП колебания реактивной мощности значительно превышают колебания активной мощности. Особенно значительны колебания нагрузки при эксплуатационных КЗ, например при погружении электродов в расплавленный металл. Значения колебаний могут достигать  $(1,5-2)I_H$  – для печей большой емкости и  $(2,5-3,5)I_H$  – для печей малой и средней емкости.

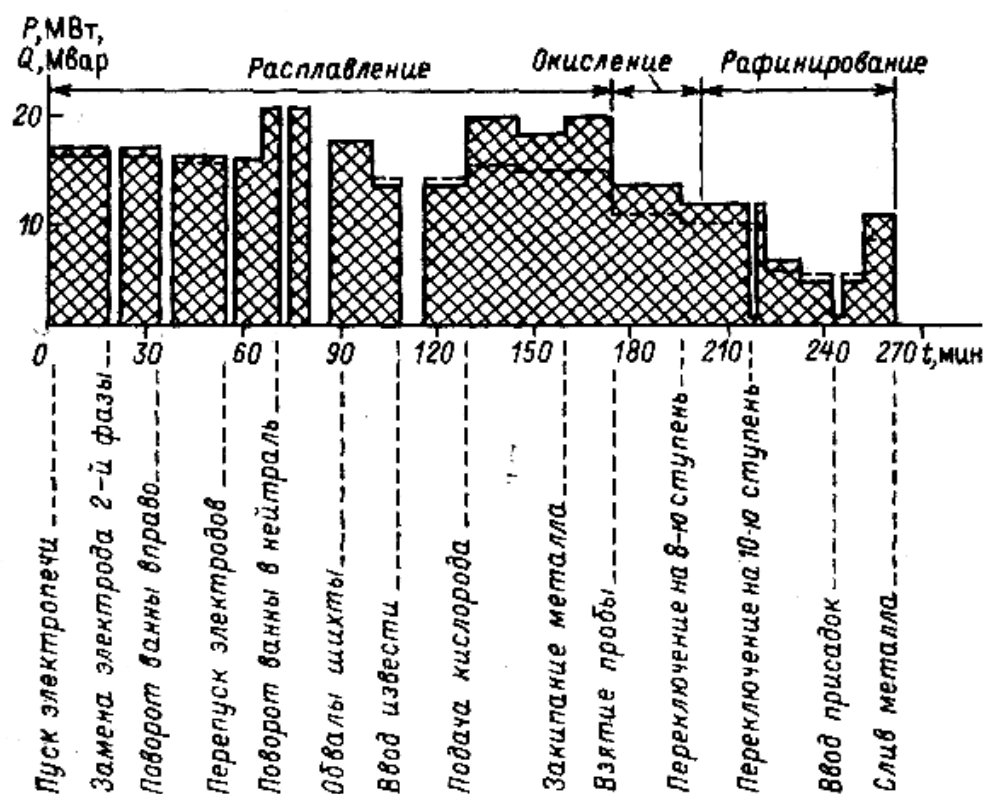


Рис. 4.5. График изменения средней мощности печи ДСП-100 за один технологический цикл плавки: \_\_\_\_\_ P; --- Q

Колебания нагрузки ДСП, особенно колебания реактивной мощности, вызывают значительные колебания напряжения в питающей сети, которые тем больше, чем больше мощность печного трансформатора и меньше мощность короткого замыкания в точке присоединения дуговой печи.

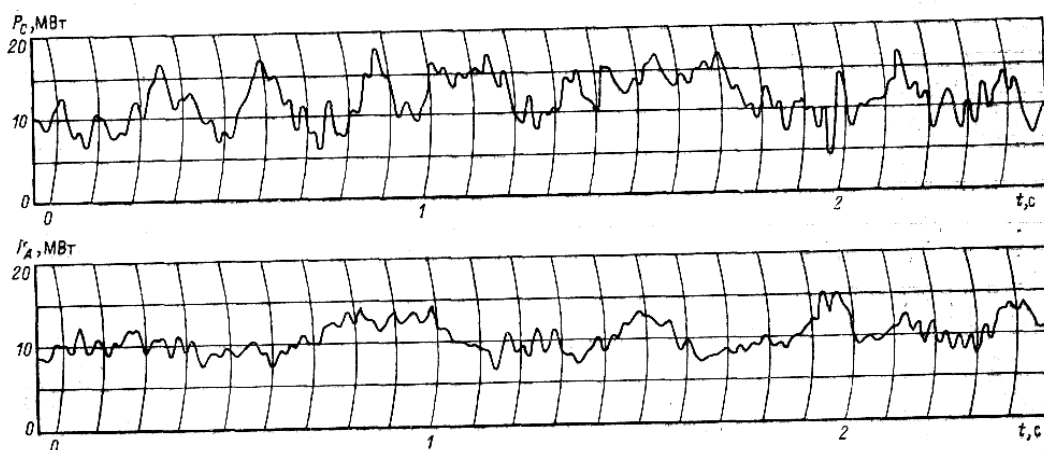
**Несимметрия токов и напряжений.** По осциллограммам видно, что нагрузка по фазам сети неравномерна. Максимальное различие по фазам А и С составляет: по активной мощности – 9 МВт, по реактивной мощности – 8 Мвар (табл. 4.3).

**Несинусоидальность токов и напряжений.** Дуга и печной трансформатор имеют нелинейные вольтамперные характеристики. По отноше-

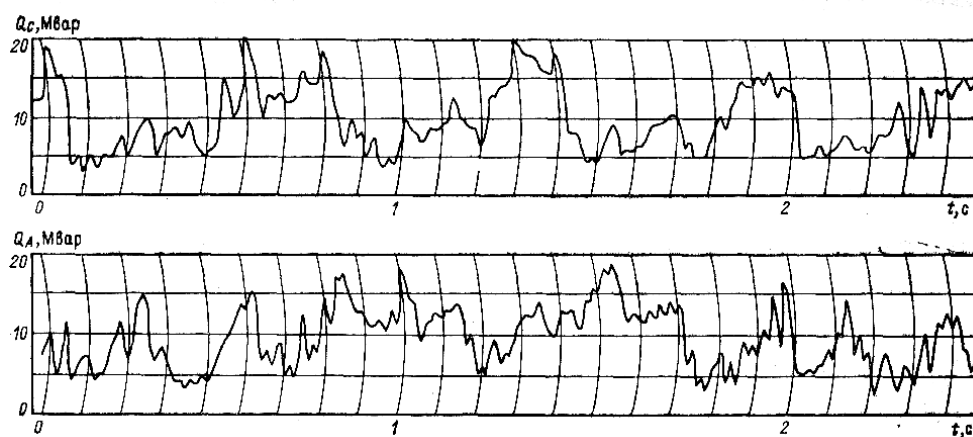
нию к внешней сети ДСП является источником высших гармонических составляющих и генерирует в сеть 3, 5, 7, 11-ю и т.д. гармоники. На рис. 4.7 приведены кривые изменения токов гармоник для ДСП емкостью от 25 до 100 т.

Таблица 4.3

Период времени, с	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,6	1,7
Фаза С: Р, МВт	12	10,5	10	10	9,8	17	8	10	15	16	16,5	9
Фаза А: Р, МВт	10	9,8	9,8	9,8	9	8	10	13	12	11	8	10
Фаза С: Q, Мвар	18	3	5	8	5	19	12	18	5	10	10	10
Фаза А: Q, Мвар	10	7	8	6	4,7	14	5	15	12	18	14	7,5

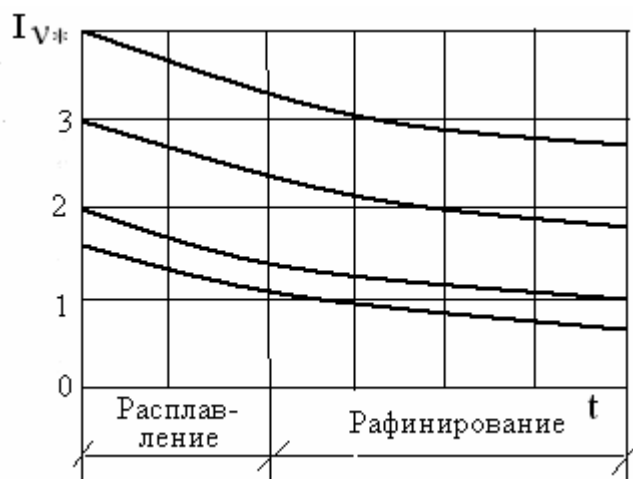


а



б

**Рис. 4.6. Графики мгновенных значений активной (а) и реактивной (б) мощностей фаз А и С печи ДСП-100 в период расплавления**



**Рис. 4.7. Кривые изменения токов гармоник для ДСП мощностью от 25 до 100 т**

**Автоматизация управления электрическим режимом ДСП.** К основным задачам автоматизированного управления процессом плавки в ДСП можно отнести следующие:

- централизованный контроль за ходом технологического процесса с сигнализацией и регистрацией отклонений от заданных параметров;
- контроль за работой оборудования с сигнализацией и регистрацией неисправностей и непредвиденных остановок;
- управление металлургическим процессом;
- управление энергетическим режимом;
- сбор и обработка информации с выдачей необходимой документации.

Задачи управления металлургическим процессом:

- расчет оптимального состава шихты;
- управление загрузкой печи; расчет кислорода, легирующих и шлакообразующих добавок;
- прогнозирование момента окончания технологических периодов.

Задачи управления энергетическим режимом:

- максимальное использование мощности печи;
- минимальные удельные расходы энергоносителей;
- нормальная эксплуатация электрического и другого печного оборудования.

В автоматическом режиме решаются задачи:

- поддержание мощности печи на уровне, определяемом программой;
- регулирование напряжения трансформатора;
- быстрое устранение всех отклонений от нормального режима.

Поставленные задачи решаются с помощью автоматических регуляторов мощности, автоматических регуляторов напряжения трансформаторов.

### **Недостатки ДСП переменного тока:**

1. Высокий угар металла, большой расход графитированных электродов (10–16 кг на 1 т жидкой стали), сложность выплавки низкоуглеродистых сталей из-за науглероживания стали от электродов.

1. Уровень шума при расплавлении достигает 90 дБ.

3. Обильное пылевыделение, требующее мощных вентиляционных установок и систем пылегазоочистки.

4. При поломках углеродов происходит быстрое науглеоживание металла, что приводит к браку сталей по химическому составу.

5. Резкопеременный, несимметричный характер электрической нагрузки, что приводит к появлениям больших колебаний и несимметрии напряжения в электрической сети.

6. Печи являются источниками высших гармонических составляющих.

7. Высокий расход электроэнергии.

### **4.4. Дуговые печи постоянного тока (ДППТ)**

**Достоинства ДППТ** по сравнению с печами переменного напряжения:

1. Возможность проведения всех без исключения металлургических процессов.

2. Резкое снижение угара металла.

3. Улучшение механических свойств стали.

4. Не требуются дополнительные устройства перемешивания металла.

5. Уменьшение расхода электроэнергии на 15–20 %.

6. Уменьшение расхода электродов в 2–5 раз.

7. Уменьшение выбросов пыли и газа в 8–10 раз.

8. Снижение на 20–30 % расхода огнеупорных материалов.

9. Более равномерный график электрической нагрузки.

**Конструкция.** Дуговая печь постоянного тока имеет один графитированный электрод (катод), расположенный по центру свода, и один охлаждаемый металлический электрод (анод), устанавливаемый в подине печи. Верхняя часть этого электрода соприкасается с расплавленным металлом, а к противоположной части присоединяется токоподвод (рис. 4.8).

Сводный электрод 3 может вводиться в печь на водоохлаждаемом держателе 4 через экономайзер 5, расположенный в центре свода. Подовый электрод 1 представляет собой систему металлических стержней, расположенных в набивной магнезитовой подине. Верхним концом стержни контактируют с расплавленным металлом в печи, а противоположные концы стержней заделаны в общую охлаждаемую водой или воздухом плиту, к которой присоединен токоподвод. Для нормальной эксплуатации электрода 1 в печи при выпуске оставляют немного жидкого металла, закрывающего электрод при последующей загрузке шихты. Электрическая дуга 2 между

электродом 3 и металлом в печи имеет форму спирали, радиус витков которой увеличивается по направлению от электрода 3 к расплавляемому металлу. Взаимодействие тока дуги с собственным магнитным полем приводит к интенсивному вращению столба дуги вокруг центральной оси спирали, так что дуга визуально воспринимается в виде усеченного конуса.

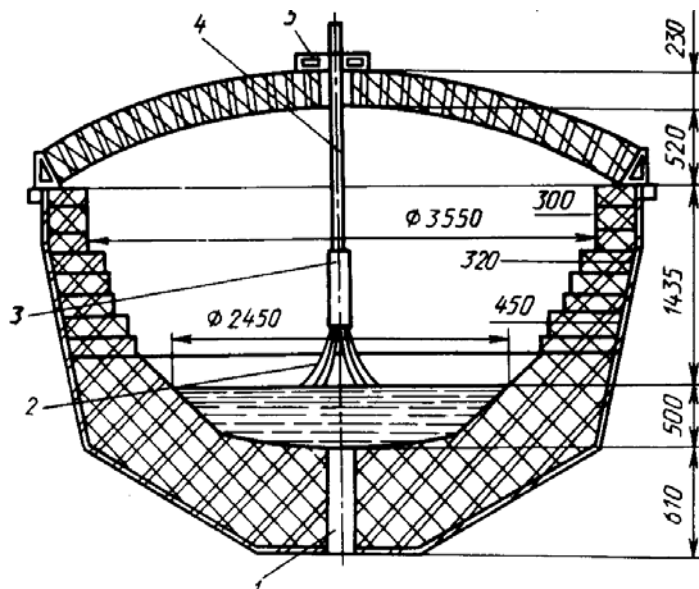


Рис. 4.8. Футеровка дуговой печи постоянного тока

ДППТ работает практически бесшумно, и только в начале расплавления металла возникает шум, генерируемый электрической дугой в процессе ее возникновения и погасания (подобно разряду молнии при грозе). В печи переменного тока такой разряд происходит дважды в течение каждого периода, когда напряжение переменного тока проходит через ноль, т. е. при частоте тока 50 Гц – 100 раз в секунду. В ДППТ электрическая дуга теоретически горит устойчиво. Дуга гаснет и снова зажигается лишь в моменты начала плавки и слива металла. Узел ввода электрода 3 и дверца рабочего окна хорошо уплотнены, что позволяет полностью ликвидировать подсос воздуха в рабочее пространство печи и неорганизованный выброс продуктов плавки в атмосферу цеха. Конструкция печи допускает работу с контролируемой нейтральной атмосферой. Дополнительные затраты на поддержание в печи нейтральной атмосферы (аргона) целиком компенсируются за счет снижения расхода графитированных электродов, а снижение угара железа и легирующих элементов дает экономию, величина которой зависит от выплавляемых марок стали. Применение контролируемой атмосферы повышает выход годного металла на 3–4 % и на 15–20 % сокращает расход ферросплавов. Футеровка печи вместимостью 12 т – основная, свод стены и подина выполнены из магнезитохромитового или магнезитового кирпича. Стойкость свода и верхней части стен 180–200 плавов, нижней части стен и подины печи вместе с подовым электродом –

около 2500 плавов, т. е. от одного капитального ремонта печи до другого. Печь имеет следующие эксплуатационные показатели: масса металлозавалки до 14,3 т; время расплавления 1,5 ч; удельный расход электроэнергии на расплавление 490–520 кВт·ч/т; удельный расход электродов – до 1,5 кг на 1 т жидкой стали при работе с обычной и до 0,35 кг при работе с защитной атмосферой. Питание печи осуществляется от тиристорного выпрямителя тока.

Основные элементы печи: каркас, механизм наклона печи, футеровка, механизмы загрузки шихты – для печи постоянного тока практически аналогичны узлам печи переменного тока. Принципиальным отличием является электрическое оборудование, и в первую очередь – выпрямитель тока. Основные технические данные отечественных дуговых печей постоянного тока приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

**Основные технические данные ДППТ**

Наименование параметра	ДСПТ-1,5/2,5	ДСПТ-6/6,3	ДСПТ-12/13,2
Установленная мощность, кВ·А	2500	6300	17200
Потребляемая мощность, кВт	2400	4000±500	8000
Вместимость печи, т	1,5	6	12
Рабочий ток, А	8000	12500	14000
Время расплавления, мин	45	60	60
Удельный расход ЭЭ на расплавку твердой завалки, кВт·ч/т	600	550	600
Выпрямленное напряжение, В	300	450	660
Диаметр каркаса, мм	1400	3500	3785
Ширина рабочего окна, мм	520	750	980
Высота рабочего окна, мм	400	500	690
Диаметр сводового электрода, мм	150	200	250
Диаметр подового электрода, мм	150	300	250

Примечание. Для всех печей: напряжение питающей сети 6/10 кВ, частота тока 50 Гц, атмосфера печи – аргон или воздух.

#### **4.5. Вакуумные дуговые печи постоянного тока**

**Области применения и устройство вакуумных дуговых печей.** Для повышения качества металла, полученного в других установках (например, в ДСП), его переплавляют при низком давлении в вакуумных дуговых печах (ВДП), в результате чего в металле уменьшается содержание вредных примесей и растворенных газов. ВДП применяют в основном для выплавки слитков высокорекреационных металлов (титана, ниобия, вольфрама, циркония, тантала, молибдена), а также для переплава специальных высококачественных сталей, в результате чего они не только очищаются, но и приобретают более плотную структуру. Рабочее давление в камере печи может составлять 1,0–0,001 Па в зависимости от требований к получаемому ме-

таллу. В современных ВДП получают слитки массой от нескольких сотен килограммов до 50–60 т.

В качестве материалов электродов в ВДП используются различные продукты металлургического передела. Так, при плавке титана круглые электроды изготавливают прессованием титановой губки. При переплавке вольфрама, молибдена и ниобия электроды изготавливают из штабиков путем стыковой сварки и сборки электродов-пакетов. При переплавке сталей в качестве электродов применяют прокат или специальные штанги, полученные методом непрерывной разливки иликовки. В некоторых установках применяют нерасходуемые электроды, а переплавляемый металл кусками подается в кристаллизатор. Каждый из этих способов, в свою очередь, может быть осуществлен по двум схемам: плавка в глухой кристаллизатор (рис. 4.9 а) и плавка с вытягиванием слитка (рис. 4.9 б).

Основной частью печи является рабочая камера, к которой присоединена вакуумная система. Электрод 1 подвешен к подвижному штоку, проходящему через вакуумное уплотнение, расположенное в верхней части камеры. К нижней части рабочей камеры присоединяется водоохлаждаемый кристаллизатор 7 с рубашкой водяного охлаждения. К электроду подается отрицательный, а к кристаллизатору положительный полюс источника питания. В печи, работающей по схеме с вытягиваемым слитком (рис. 4.9 б), имеется проходящий через вакуумное уплотнение 3 шток 4 для вытягивания слитка. Металл наплавляется на поддон 5 и по мере роста слитка 6 опускается вниз. Процесс плавки начинается с создания вакуума в камере печи и опускания электрода до крайнего нижнего положения. После короткого замыкания или пробоя межэлектродного промежутка возникает дуга. Под действием выделяющейся теплоты электрод расплавляется, и металл небольшими каплями перетекает на слиток.

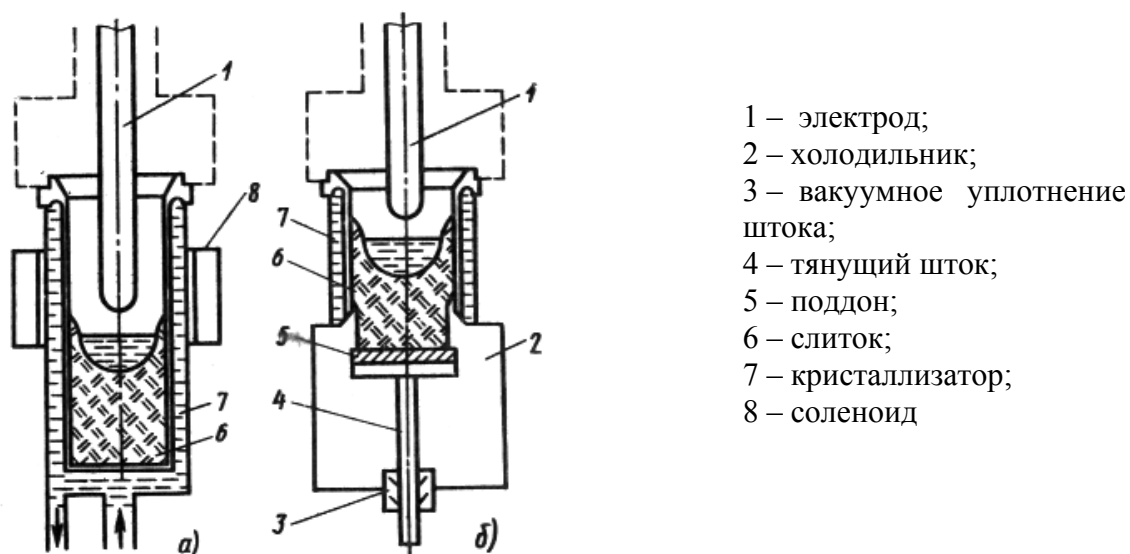


Рис. 4.9. Схема ВДП с глухим кристаллизатором (а) и с вытягиванием слитка (б)

Объем кристаллизатора и размеры электрода согласованы. В конце плавки весь электрод переходит в расплав, а испаряющиеся примеси и газы откачиваются вакуумной системой. Такая печь называется печью с расходуемым электродом, широко применяется в промышленности. В печах с нерасходуемыми электродами есть опасность загрязнения переплавляемого металла материалом электрода.

**Основные элементы печи:** рабочая камера; шток-электрододержатель; расходуемые электроды; кристаллизатор; поддон; соленоид.

*Рабочая камера* представляет собой водоохлаждаемую сварную конструкцию цилиндрической формы. В верхней части рабочей камеры установлены подсветы и смотровые окна, позволяющие наблюдать за горением дуги и наплавлением слитка. Для дистанционного наблюдения за ходом процесса к гляделкам пристраиваются специальные перископы, проектирующие изображение рабочей зоны на экран. К нижнему фланцу камеры прикреплен кристаллизатор.

*Шток-электрододержатель* служит для закрепления и перемещения расходуемого электрода и подвода к нему тока. Он состоит из нескольких коаксиально расположенных труб, наружная медная труба является токоведущей. Внутренние стальные трубы обеспечивают механическую прочность конструкции штока. Между трубами имеются полости для прохода охлаждающей воды. Перемещение штока и расходуемого электрода обеспечивается электрическим или гидравлическим приводом.

*Кристаллизатор* состоит из внутренней гильзы и наружного стального немагнитного кожуха. Между ними имеется полость для охлаждающей воды. Гильзу изготавливают из материала с хорошей теплопроводностью, не смачивающегося жидким металлом.

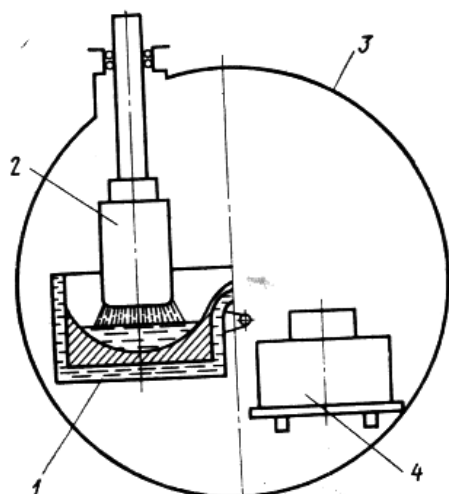
*Поддон* закрывает низ кристаллизатора, входит внутрь или примыкает к торцу его гильзы. Основа поддона – массивный медный диск, снабженный стальной рубашкой водяного охлаждения. Для предотвращения возможного прожога медного диска электрической дугой в начале плавки на него укладывают темплет из переплавляемого металла толщиной 50 мм.

*Соленоид* устанавливают на боковой поверхности кристаллизатора. Он создает аксиальное с ним магнитное поле. Взаимодействие поля соленоида с током дуги и током, растекающимся в ванне расплавленного металла, приводит к повышению напряжения на дуге, предотвращает переброски дуги на стенку кристаллизатора, стабилизирует дугу. При этом возникает вращение жидкого металла в ванне, что улучшает структуру переплавляемого металла. Питание соленоида производится от полупроводниковых выпрямителей, позволяющих при необходимости производить резкое увеличение и реверсирование тока намагничивания.

Для литья в вакууме существуют специальные ВДП, которые подразделяют на две группы: печи с разливкой при горячей дуге и печи с разливкой после отключения дуги. Конструкция печи показана на рис. 4.10.



Печь состоит из тигеля 1, электрода 2, камеры 3, формы 4 для слива расплавленного металла.



- 1 – тигель;
- 2 – электрод;
- 3 – камера;
- 4 – форма

**Рис. 4.10. Схема вакуумной дуговой печи для фасонного литья**

Таблица 4.5

**Сравнительные характеристики вагранок, ДСП и индукционных печей**

Тип плавильного агрегата	Относительная стоимость 1 т чугуна	Расход электроэнергии, кВт·ч/т
Газовая вагранка	1,0	50–70
Дуговая сталеплавильная печь переменного тока	2,0	600–800
Дуговая сталеплавильная печь постоянного тока	1,8	475–550
Индукционная печь повышенной частоты	2,0	1200–1300
Индукционная печь средней частоты	1,4	500–600

#### 4.6. Руднотермические печи

Руднотермические печи (РТП) применяются в металлургии черных металлов и других отраслях для получения ферросплавов – сплавов железа с кремнием, марганцем, хромом, вольфрамом и др. РТП являются дуговыми печами сопротивления, имеют высокую единичную мощность и относятся ко второй категории по надежности электроснабжения. Нагрев перерабатываемых материалов производится за счет теплоты, возникающей при протекании тока по электродам, шихте, электрической дуге и расплавленному материалу. Дуга горит под слоем электропроводной шихты, теплота выделяется в дуговом разряде и преимущественно при прохождении тока через шихту в расплавленных материалах.

Номенклатура продуктов, получаемых в РТП, весьма широка: они могут выпускаться из печи в виде пара, газа, жидкости-расплава или твердого

тела, извлекаемого целым слитком. Сырьем для получения ферросплавов служат руды или концентраты. При производстве основных сплавов: ферросилиция, ферромарганца и феррохрома пользуются рудами с большим содержанием металла. Первоначально руду вследствие малого содержания в ней полезного компонента обогащают, получая концентрат с высоким содержанием оксидов основного элемента.

Ферросплавы получают восстановлением оксидов соответствующих металлов, используя восстановители: углерод, кремний и алюминий. Реакции восстановления углеродом требуют подвода большой теплоты.

Значительное место в сфере использования РТП занимает получение электроплавляемых огнеупоров, идущих на футеровку. Сырьем здесь являются глинозем, циркон и кварцевый песок. Получаемые методом плавки открытой дугой огнеупоры: корунд и бакор разных марок в печах ОКБ-2130, ДС-0,5 имеют высокую чистоту и плотность. Удельный расход электроэнергии при их получении находится в пределах 1800–2300 кВт·ч на тонну. Здесь перечислены только основные наиболее массовые и энергоемкие производства, тогда как перечень других процессов, осуществляемых в РТП, значительно шире и включает производство графита, сероуглерода и многих других веществ. Общими признаками РТП являются следующие:

1. Удельное электрическое сопротивление шихты сильно меняется при повышении температуры, в холодном состоянии шихта не электропроводна.

2. В расплавленном состоянии шихта представляет собой ионный раствор, проводимость которого также зависит от температуры и вещественного состава. Объем расплава и шихты, участвующих в проведении тока, меняется при изменении температуры. Это определяет возможность параллельного существования проводников разного рода – нелинейного активного сопротивления шихты и расплава и электрической дуги.

3. Температура преобразования шихты составляет 1200–2200 К, что определяет высокие удельные расходы электроэнергии на выпуск единицы продукции и наличие мощного энергетического хозяйства.

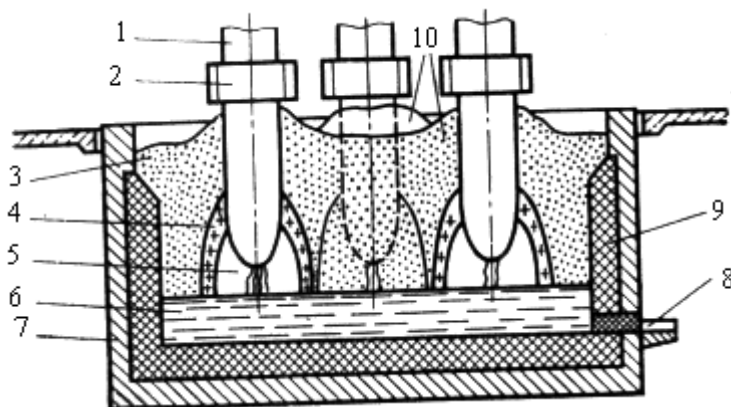
4. Непрерывный режим работы в течение 1–2 лет.

5. Электрический режим работы относительно спокоен (в отличие от ДСП): толчки тока и эксплуатационные короткие замыкания отсутствуют.

Разнообразие конструкций РТП вызвано многообразием и сложностью химического состава перерабатываемого сырья, а также большим ассортиментом производимой продукции. Представляется целесообразным выделить пять основных типов процессов и схем печей.

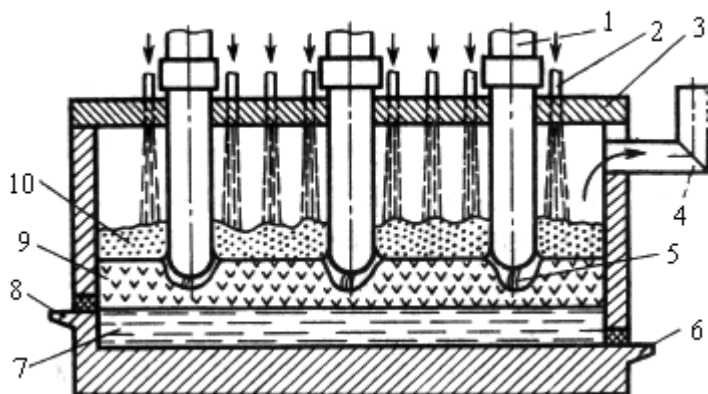
1. *Бесшлаковые или малошлаковые* (рис. 4.11) предназначены для получения ферросплавов, карбида кальция. В рабочем пространстве трехфазной неподвижной печи находятся электроды 1, удерживаемые электрододержателями 2, погруженными в шихту 3. Дуги горят с торцов электродов на расплав в газовой полости 5, в так называемом «тигле». По мере опла-

ления стенок «тигля» увеличивается глубина ванны 6 и происходит оседание шихты. Загрузка шихты производится вокруг электродов, где образуются конические уплотнения 10, предотвращающие прорыв газов. Стенки шахты печи 9 и ее подину 7 изготовляют из угольных блоков. Слив металла производят через летку 8, пробиваемую по мере накопления расплава.



**Рис. 4.11.** Схема печи для бесшлакового и малошлакового процесса

2. *Многошлаковые процессы* (рис. 4.12) используются для получения фосфора. РТП для этих процессов неподвижные с тремя или шестью электродами круглой или прямоугольной формы с выпуском через отдельные летки металла 6 и шлака 8. На поверхности расплава находится слой шлака. Ток проходит по электродам 1 через дуги 5, шлак 9 и расплав 7. Загрузку шихты 10 производят через устройства 2 в своде 3, герметизирующем рабочее пространство. Образующиеся газы удаляются через вытяжку 4.



**Рис. 4.12.** Схема печи для многошлакового процесса

3. *Рафинировочные печи* имеют подобную структуру рабочего пространства и отличаются периодичностью работы: загрузка – слив при наклоне печи.

4. *Блок-процессы* применяются для получения электрокорунда, ферровольфрама. Ввиду высокой температуры расплава вылить его из печи не представляется возможным, он застывает на небольшой глубине, и по мере подсыпки шихты и ее расплавления дугой происходит наращивание слитка. После заполнения ванну откатывают, остужают и блок извлекают для последующей разделки, дробления, резки алмазными пилами.

5. *Выплавка огнеупоров* ведется открытой дугой с постепенной подсыпкой шихты. С целью уменьшения науглероживания расплава необходимо выдерживать определенную длину дуги, покрывать боковую поверхность электродов обмазками, предотвращающими их осыпание в расплав и обгорание. Слив расплава производится периодически по мере наполнения печи.

В РТП применяются электроды трех видов: угольные диаметром до 1200–1400 мм, графитированные диаметром до 800 мм и самоспекающиеся диаметром до 2000 мм или прямоугольные размером 3200x850 мм. Самоспекающиеся электроды представляют собой круглый или прямоугольный кожух из стали толщиной 1,5–5 мм, заполняемый сверху пастообразной электродной массой. При входе в печь под действием тока и теплоты печи электродная масса спекается и допускает плотность тока до  $7,6 \text{ А/см}^2$ . По мере сгорания кожух электрода наращивается и заполняется массой, что обеспечивает непрерывную работу печи.

Сопротивление нагрузки руднотермических печей значительно ниже, чем у ДСП, поэтому вторичное напряжение печных трансформаторов ниже, а токи при тех же мощностях в 1,5–2 раза больше. Это приводит к тому, что короткая сеть руднотермических печей более мощная и сложная. В ней применяются меры по обеспечению симметричности загрузки фаз, снижению активного и индуктивного сопротивлений.

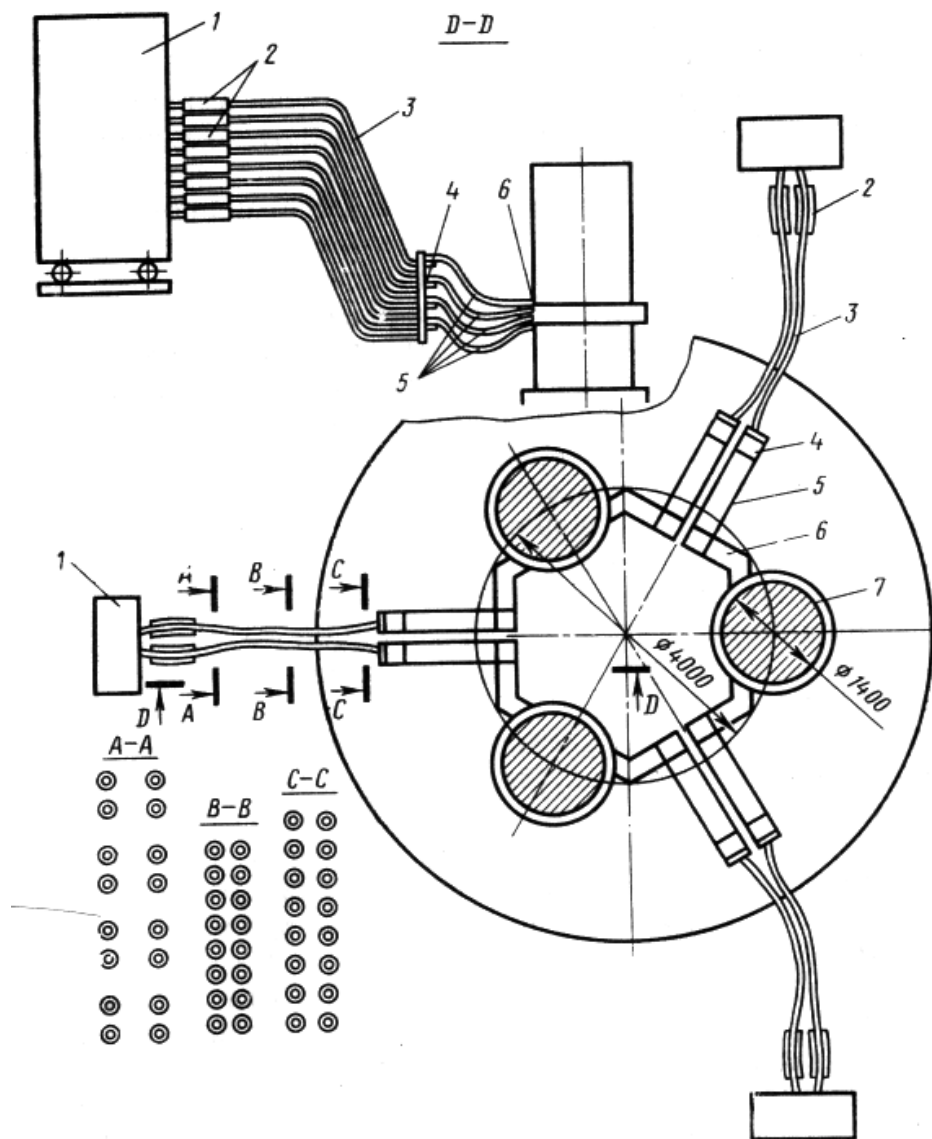
На рис. 4.14 показана короткая сеть РДП РКЗ-48Ф. Охлаждение трубчатого пакета шин производится водой, протекающей внутри токоведущих труб. Конфигурация короткой сети выполнена так, чтобы проводники с противоположным направлением тока были расположены как можно ближе друг к другу. Это снижает величины реактивных сопротивлений и падений напряжений в короткой сети.

Наиболее мощные РТП с прямоугольной ванной имеют шесть электродов, расположенных в линию, и питаются либо двумя трехфазными, либо тремя однофазными трансформаторами. В этом случае каждый трансформатор питает два соседних электрода.

Первичное напряжение печных трансформаторов составляет 6, 10 или 35 кВ. Энергетические характеристики некоторых печей приведены в табл. 4.6.

Для повышения коэффициента мощности РТП снабжаются автоматически управляемыми компенсирующими устройствами. Мощные РТП отечественного производства оснащены установками продольно-емкостной компенсации реактивной мощности. Печи зарубежного производства имеют установки поперечной компенсации реактивной мощности.

При выборе мощности компенсирующих устройств учитывают возможность использования РТП в качестве регуляторов нагрузки энергосистем при одновременном снижении в «час пик» активной и реактивной мощности.



**Рис. 4.14. Схема короткой сети рудно-термической печи:**  
 1 – трансформатор; 2 – гибкие компенсаторы; 3 – пакет трубчатых шин;  
 4 – неподвижный башмак; 5 – гибкие ленты; 6 – подвижный башмак;  
 7 – электроды

Таблица 4.6

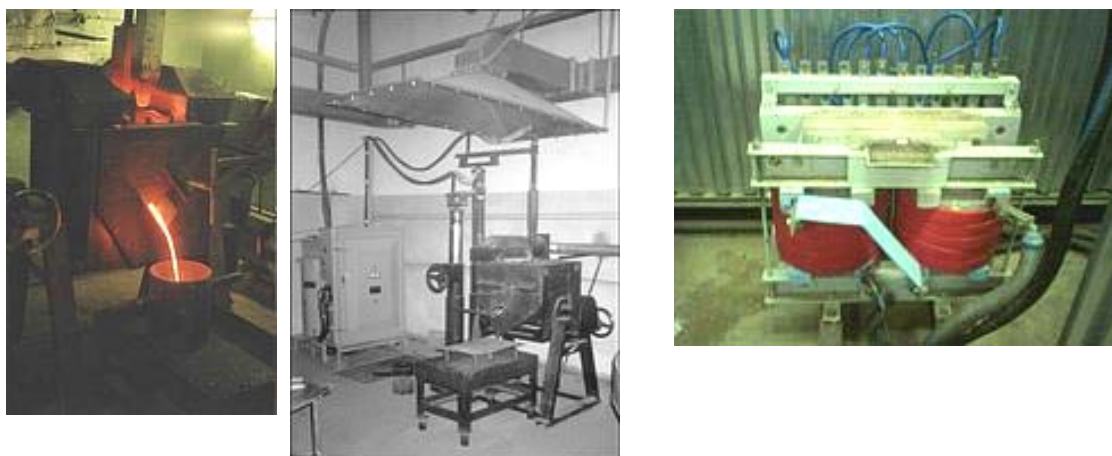
### Характеристики руднотермических печей

Тип печи	Номин. мощность трансформатора, кВ·А	Макс. ток электрода, кА	Вторичное напряжение, В
РКО-2,5Н2	2,5	13	178–89
6РКЗ-2,5Фс	2,5	8,1	308–154
РКО-3,5 НОЗ	3,5	7,1	371–260
СКБ-6002А	3,6	18	421–193
РКЗ-16, 4Н08	16,5 (3x5,5)	60	204–130
РПЗ-33Ш-Н02	33 (3x11)	25,8	800–475

Тип печи	Номин. мощность трансформатора, кВ·А	Максимал. ток электрода, кА	Вторичное напряжение, В
РПЗ-482	63 (3x21)	112	238–137
РПО-60	60	103	257
РКЗ-72Ф-М1	72 (3x24)	92,5	649–149

**Современная рудотермическая печь 3-10М** предназначена для выделения благородных металлов из богатых продуктов в виде компактного слитка методом бесколлекторной плавки. Рекомендуемая массовая доля благородных металлов в направляемом на рудотермическую плавку продукте должна составлять более 15 % (плавка в накопительном режиме). Оптимальна массовая доля благородных металлов для ведения плавки без промежуточного слива шлака 30–50 %. При суммарном содержании благородных металлов в сплаве менее 15 % требуется проведение специальных исследований по подбору технологических и реагентных режимов плавки. Важным компонентом шихты является оборотный шлак, загрузка которого на плавку производится после расплавления пусковой шихты. Количество оборотного шлака может составлять до 50–90 % от общего количества шлака, в зависимости от массовой доли и химического состава неблагородной части проплавляемого золотосодержащего продукта. Чем более чистым от примесей является продукт, тем в большей степени шлаковая ванна может быть химически инертной средой, обеспечивающей ионную проводимость между погруженными рабочими электродами и создающей условия для нормального разделения фаз расплава с отстаиванием металла в донной части печи.

Издробленный шлак может быть использован при наборе ванны следующей плавки или перерабатывается на концентрационном столе типа СКО-0,5, СКО-2 и др.



**Рис. 4.15. Печь серии РТП 3-10М**

Для осуществления питания печи необходим однофазный понижающий печной трансформатор мощностью до  $100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  с входным напряжением 380 В, с возможностью получения на выходе плавно регулируемого напряжения от 10 до 100 В (РОТМ 100/0,5 УХЛ 4), или ступенчатого переключения напряжения от 10 до 100 В (трансформаторы типа РОТМ), или ступенчатого переключения напряжения (печные трансформаторы типа ТПО, ОСУ, ОСЗ, ТСЗИ).

Таблица 4.7

**Основные технические характеристики рудотермической печи  
3-10М конструкции ОАО «Иргиредмет»**

Параметр	Значения параметра
Общий объем ванны, $\text{дм}^3$	30
Рекомендуемая массовая доля суммы благородных металлов в исходном материале, поступающем на плавку (не менее), %	15
Производительность по загружаемой шихте (продукт + флюсы), кг/ч	10–30
Удельный расход электроэнергии, $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$ слитка	2–5
Оптимальная масса слитка, кг	4–12
Масса печи, кг	350
Габаритные размеры печи, мм:	длина
	ширина
	высота
Мощность источника питания, кВт	80–100
Входное напряжение источника питания, В	220–380
Рабочее напряжение печи, В	30–80
Максимальный ток при прогреве ванны, А	500–600
Рабочий ток при плавке, А	200–400
Рабочая мощность печи, кВт	25–35
Количество плавков, проводимых без замены футеровки	10–20

Линия трансформатор – печь должна выдерживать пиковый ток до 1000 А. На практике достаточно соединить клемму каждого электрододержателя с соответствующим выходом питающего трансформатора тремя жилами медного сварочного кабеля сечением  $3 \times 70 \text{ мм}^2$ . Линия трансформатор – печь должна быть как можно короче во избежание непроизводительного перерасхода электроэнергии и перегрузки трансформатора.

Корпус печи должен быть подсоединен к общему контуру заземления (или зануления).

Помещение площадью 20–30  $\text{м}^2$  должно соответствовать требованиям, предъявляемым к помещениям для проведения плавки (стены и пол из негорючего материала, пол неэлектропроводный), и требованиям к сохранности металла. Помещение должно быть оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией, освещением, средствами пожаротушения (порошковый огнетушитель, асбестовое одеяло, песок).

### Библиографический список

1. ГОСТ 17677-82\*. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1996.
2. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М. : Изд-во НИЦ ЭНАС, 1999.
3. *Болотов А.В., Шепель Г.А.* Электротехнологические установки. [Текст] : учеб. для вузов / А.В. Болотов. – М. : Высшая школа, 1988.
4. *Шеховцов В.П.* Электрическое и электромеханическое оборудование [Текст] / В.П. Шеховцов. – М. : Форум-ИнфраМ, 2004.
5. *Свенчанский А.Д.* Электрические промышленные печи [Текст] / А.Д. Свенчанский. – М. : Metallurgizdat, 1975.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Общие сведения об электротехнологических установках . . . .	3
2. Электротермические установки нагрева сопротивлением . . . .	5
2.1. Общие сведения . . . . .	5
2.2. Электрические печи сопротивления . . . . .	5
2.2.1. Нагревательные печи . . . . .	6
2.2.2. Вакуумные печи сопротивления и сушильные шкафы . . . . .	13
2.2.3. Плавильные электропечи сопротивления . . . . .	14
2.2.4. Электрооборудование и регулирование параметров печей сопротивления . . . . .	16
2.3. Нагрев сопротивлением жидких сред . . . . .	18
2.4. Электрошлаковые установки . . . . .	20
2.5. Установки электроотопления и электрообогрева . . . . .	23
3. Электроустановки индукционного нагрева . . . . .	25
3.1. Общие сведения об индукционных ЭТУ . . . . .	25
3.2. Индукционные плавильные печи . . . . .	26
3.3. Индукционные нагревательные установки . . . . .	36
3.4. Установки диэлектрического нагрева . . . . .	39
4. Электродуговые печи . . . . .	40
4.1. Свойства дугового разряда . . . . .	40
4.2. Общие сведения о дуговых электрических печах . . . . .	40
4.3. Дуговые печи переменного тока . . . . .	42
4.3.1. Дуговые сталеплавильные печи прямого действия . . . . .	42
4.3.2. Технология плавки стали в ДСП . . . . .	45
4.3.3. Дуговые сталеплавильные печи косвенного действия . . . . .	52
4.3.4. Электрооборудование дуговых сталеплавильных печей . . . . .	53
4.3.5. Режимы работы дуговых сталеплавильных печей . . . . .	56
4.4. Дуговые печи постоянного тока . . . . .	60
4.5. Вакуумные дуговые печи постоянного тока . . . . .	62
4.6. Руднотермические печи . . . . .	65
Библиографический список . . . . .	72

Учебное издание

# **Электротехнологические установки**

**Конспект лекций**

Редактор *Ф.А. Ильина*  
Компьютерная версия *Г.Н. Ополевой*

Подписано в печать 12.05.2010.  
Формат 60x80/16. Печать плоская.  
Усл. печ. л. 4,6. Уч.-изд. л. 4,9.  
План 2010 г.

Типография ИрГУПС,  
г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15