



# Тема 2. Конструкции и тепловая работа печей

## Лекция 3

# § 1. Классификация печей по энергетическому признаку

**Металлургическая печь** (металлургический печной агрегат) - это огражденное от окружающего пространства тепловое технологическое оборудование, в котором происходит генерация теплоты из того или иного первичного вида энергии, и передача теплоты материалу, подвергаемому тепловой обработке в технологических целях: плавлению, нагреву, сушке, обжигу и т.д.

Дополнительный признак - ограждение от окружающего пространства имеет целью сузить использование термина «печь»; под это понятие не попадают устройства, использующие теплоту в технологических целях, но не имеющие ограждения, например, сварочные аппараты или газо-кислородные резаки, применяемые в машинах непрерывного литья заготовок.

В целом печь является объединением теплогенератора и теплопреобразователя, но, по преимуществу, печь - технологическое оборудование, т.к. высвобождение и преобразование энергии в ней направлено на протекание конкретного технологического процесса.

**Тепловая работа печи** - это совокупность явлений, сопровождающих получение теплоты, ее преобразование и использование для осуществления технологического процесса. В зависимости от типа печи в понятие «тепловая работа» входят различные процессы: движение жидкостей и газов, процессы теплогенерации, внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи и на поверхности обрабатываемого материала, процессы внутреннего теплообмена в этом материале, различные виды массообмена.

Любую печь представляют состоящей из 2 зон:  
зоны технологического процесса (ЗТП)  
и зоны генерации теплоты (ЗГТ).

Исходя из того, что печь - технологическое оборудование, считают, что ЗТП - основная зона, а ЗГТ - вспомогательная, предназначенная для создания определенных условий в ЗТП.

Определяющими называют процессы, обеспечивающие возникновение теплоты в ЗТП, а определяемыми - процессы, от которых зависит распределение теплоты в ЗТП.

Классификацию печей производят по определяющим процессам. Печи, у которых ЗГТ и ЗТП пространственно совмещены, называют печами-теплогенераторами, если эти зоны пространственно разобщены, то печи называют печами-теплообменниками.

Под **типовым тепловым режимом** работы печи понимают совокупность процессов генерации теплоты, тепло- и массообмена, механики сред, обеспечивающих возникновение и распределение теплоты в ЗТП. Практическое значение имеют 4 типа режимов.

**Массообменный** режим, характерный для печей-теплогенераторов, обеспечивается внесением реагента в ЗТП, следствием чего является протекание в этой зоне химических реакций с соответствующим тепловым эффектом. **Электрический** режим, также характерный для печей-теплогенераторов, обеспечивается возникновением теплоты в ЗТП за счет электроэнергии, введенной непосредственно в эту зону.

Для печей-теплообменников характерны **радиационный** и **конвективный** режимы, которые обеспечиваются теплоотдачей от ЗГТ и границам ЗТП.

В печах, работающих по массообменному режиму, выделение теплоты может осуществляться как в результате сжигания твердого топлива, перемешанного с обрабатываемым материалом, так и в результате окисления примесей, содержащихся в расплавленном металле и проплавляемой шихте. Возможны и смешанные топливно-автогенные режимы. Известны 3 разновидности слоевых печей, в которых сжигается твердое топливо:

- а) в печах *с плотным слоем* шихта с твердым кусковым топливом расположена по всему объему печи и медленно продвигается вниз, а продукты сгорания проходят через слой между его отдельными кусками;
- б) в печах *с кипящим слоем* под действием динамического давления газов слой разуплотнен и энергично перемешивается; выгорает как кусковое топливо, так и горючие компоненты шихты (иногда вместе с воздухом подают газообразное топливо);
- в) в печах *с взвешенным слоем* обрабатывают материалы, доведенные до пылевидного состояния; при этом частицы отделены друг от друга газовой прослойкой и движутся вместе с потоком газа; применяют размолотое твердое и газообразное топливо.

При электрическом режиме работы печей-теплогенераторов ЗТП может находиться в твердом, жидком или газообразном состоянии.

При *твердом состоянии ЗТП* электроэнергия подводится прямо к обрабатываемому материалу: это контактный или индукционный нагрев.

В *жидком состоянии ЗТП* находится в индукционных плавильных печах.

*Газообразное состояние ЗТП* является основой работы плазмохимических установок (электронно-ионных технологических процессов с коронным электрическим разрядом).



Индукционная плавильная печь ИСТ-0,4



Индукционная печь ИТПЭ



Электронно-ионный плазменно-пучковый инжектор НИЯУ МИФИ

В зависимости от соотношения тепловых потоков, падающих от источника излучения тепловой энергии на кладку и нагреваемый материал, возможны 3 случая радиационных режимов. Если:

- $Q_{\Pi}^K = Q_{\Pi}^M$  , то это *равномерно-распределенный режим*;
- $Q_{\Pi}^K > Q_{\Pi}^M$  - *косвенный направленный*;
- $Q_{\Pi}^K < Q_{\Pi}^M$  - *прямой направленный*.

В процессе теплоотдачи конвекцией в печах могут принимать участие газообразные (продукты сгорания топлива, специально подогреваемые среды) и жидкие теплоносители (соли щелочных металлов, металлы).

При *проточном* конвективном режиме теплоноситель постепенно остывает и отдает тепло, полученное в ЗТП.

При *циркуляционном* режиме непрерывное перемешивание поступающих в печь объемов теплоносителя обеспечивает поддержание температуры теплоносителя на необходимом уровне.

## § 2. Теплотехнические показатели работы печей

**Температура** - один из параметров состояния, характеризующий (наряду с абсолютным давлением и удельным объемом) состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

Применительно к условиям теплообмена в пламенной печи вводят понятие **эффективной температуры**, которая представляет собой приведенную температуру пламени, обеспечивающую такую же теплоотдачу излучением на поверхность нагрева, какая имеется в реальной системе кладки, тепловоспринимающей поверхности металла и находящегося между ними факела. Аналогичное понятие может быть распространено и на любую другую систему, а сама температура может быть отнесена к любой излучающей части этой системы.

**Температурный режим печи** - характер изменения температуры источника теплоты (технологических газов или кладки печи) в течение цикла или по длине рабочего пространства печи. Печи, температура которых не изменяется со временем, называются *печами постоянного действия*, а печи с переменной во времени температурой - *печами периодического действия*. Различают *камерный температурный режим*, при котором температура в рабочем пространстве практически неизменна, и *методический*, когда температура изменяется по длине печи.

**Тепловая нагрузка** - количество теплоты, выделяемое в печи в единицу времени. **Тепловой режим печи** - изменение тепловой нагрузки за время нагрева или по длине печи.

Температурными и тепловыми *зонами печи* называют части ее рабочего пространства с существенно выраженными отличиями температурного и теплового режима.

Коэффициенты полезного тепло- и топливоиспользования характеризуют качество работы печи, совершенство ее конструкции.

Коэффициент полезного теплоиспользования

$$\begin{aligned} \text{К.П.Т.} &= \frac{Q_M + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{ЭНД}} - Q_{\text{ЭКЗ}}}{Q_{\text{Х.Т.}} + Q_{\Phi} \cdot V} = \frac{Q_{\text{Х.Т.}} + Q_{\Phi} \cdot V - Q_{\text{Д}} \cdot V - Q_{\text{ПОТ}}}{Q_{\text{Х.Т.}} + Q_{\Phi} \cdot V} = \\ &= \frac{Q_{\text{Н}}^{\text{Р}} + Q_{\Phi} - Q_{\text{Д}} - \frac{Q_{\text{ПОТ}}}{V}}{Q_{\text{Н}}^{\text{Р}} + Q_{\Phi}} \end{aligned}$$

где  $Q_M$  и  $Q_{\text{шл}}$  - теплота на нагрев металла и шлака, кДж/ч;  
 $Q_{\text{ЭНД}}$  и  $Q_{\text{ЭКЗ}}$  - теплота эндотермических и экзотермических реакций (кроме горения топлива);

$Q_{\text{Х.Т.}}$  - химическая теплота топлива;

$Q_{\Phi}$  - физическая теплота топлива и воздуха, отнесенная к единице количества топлива, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);

$V$  - расход топлива, м<sup>3</sup>/ч (кг/ч);

$Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}$  - теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг);

$Q_{\text{Д}}$  - теплота дыма, отнесенная к единице количества топлива;

$Q_{\text{ПОТ}}$  - тепловые потери.

Коэффициент использования топлива характеризует топливо и условия его сжигания:

$$\text{К.И.Т.} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}} + Q_{\text{Ф}} - Q_{\text{Д}}}{Q_{\text{H}}^{\text{P}} + Q_{\text{Ф}}}$$



*Горение кокса*

Производительность печи - количество готовой продукции, получаемой в единицу времени. Общая производительность, т/ч, характеризует размеры агрегата. Удельная производительность, кг/(м<sup>2</sup>·ч) (напряженность пода) или кг/(м<sup>3</sup>·ч), характеризует интенсивность работы печи.

Удельный расход условного топлива или электроэнергии на единицу продукции, кг у.т./т и Вт·ч/кг, служит для сравнительной оценки работы печей.

**Тепловой баланс** - сопоставление прихода и расхода полезно использованной и потерянной теплоты в процессе тепловой работы печи. Составляется для отдельных элементов печи и печного оборудования, ЗТП, рабочего пространства печи, печного агрегата в целом. При составлении баланса надо следить, чтобы все входные и выходные величины брались для границ одного и того же объекта.

Для печей постоянного действия баланс составляется на 1 час, а для печей периодического действия - на 1 цикл работы. Мгновенным называется тепловой баланс на малые промежутки времени, который позволяет выяснить динамику расхода энергии нестационарного технологического процесса.

## Приходные статьи теплового баланса

1. Теплота от горения топлива

$$Q_{\text{х.т.}} = V \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \text{ кДж/ч,}$$

где  $V$  - расход топлива,  $\text{м}^3/\text{ч}$  ( $\text{кг}/\text{ч}$ );

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  - теплота сгорания топлива,  $\text{кДж}/\text{м}^3$  ( $\text{кДж}/\text{кг}$ ).

2. В электропечах приход теплоты определяется потребляемой из сети активной мощностью  $P_{\text{А}}$ , Вт.

3. Теплота экзотермических реакций (кроме реакций горения). Например, в нагревательных печах черной металлургии учитывают теплоту, выделяющуюся при окислении металла:

$$Q_{\text{экз}} = 5652 \cdot P \cdot a, \text{ кДж/ч,}$$

где  $P$  - производительность печи,  $\text{кг}/\text{ч}$ ,

$a$  - величина угара металла,  $\text{кг}$  окалина/ $\text{кг}$  металла.

4. Физическая теплота топлива

$$Q_{\text{ф.т.}} = V \cdot c_{\text{т}} \cdot t_{\text{т}},$$

где  $c_{\text{т}}$  - средняя удельная теплоемкость топлива в интервале температуры от нуля до  $t_{\text{т}}$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;

$t_{\text{т}}$  - температура подогрева топлива,  $^{\circ}\text{C}$ .

5. Физическая теплота воздуха

$$Q_{\text{Ф.В.}} = V \cdot c_{\text{В}} \cdot t_{\text{В}} \cdot n \cdot v_{\text{В}},$$

где  $n$  - коэффициент расхода воздуха,

$v_{\text{В}}$  - количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания единицы топлива,  $\text{м}^3$  воздуха/ $\text{м}^3$  топлива ( $\text{м}^3$  воздуха/кг топлива).

6. Теплота, вносимая паром. Учитывается при распылении паром мазута в форсунках:

$$Q_{\text{п}} = V \cdot i_{\text{п}} \cdot v_{\text{п}},$$

где  $i_{\text{п}}$  - энтальпия пара, кДж/кг.

$v_{\text{п}}$  - расход пара на единицу топлива, кг пара/кг топлива.

7. Теплота, вносимая твердыми и жидкими шихтовыми материалами

$$Q_{\text{ш}} = G_{\text{ш}} \cdot c_{\text{ш}} \cdot t_{\text{ш}}.$$

где  $G_{\text{ш}}$  - количество шихтовых материалов, кг/ч.



## Расходные статьи теплового баланса

1. Полезная теплота, необходимая для нагрева и плавления материалов. Если производится нагрев предварительно подогретых материалов, то

$$Q_1 = G \cdot (c_M \cdot t_{МК} - c'_M \cdot t_{МН}),$$

где  $G$  - количество материала, кг/ч;

$t_{МК}$  и  $t_{МН}$  - конечная и начальная температура металла, °С;

$c_M$  и  $c'_M$  - соответственно средняя удельная теплоемкость материала в интервале температуры от нуля до  $t_{МК}$  и от нуля до  $t_{МН}$ , кДж/(кг·К).

2. Теплота, уносимая шлаком

$$Q_2 = G_{шл} \cdot c_{шл} \cdot t_{шл}.$$

3. Теплота эндотермических реакций. Эта статья характерна для плавильных печей, например, учитывают теплоту, идущую на разложение известняка.

4. Теплота, уносимая дымом

$$Q_4 = V \cdot v_d \cdot c_d \cdot t_d,$$

где  $v_d$  - количество дыма, образующегося при сжигании единицы объема или единицы массы топлива, м<sup>3</sup> дыма/м<sup>3</sup> топлива (м<sup>3</sup> дыма/кг топлива).

5. Теплота от химической неполноты сгорания топлива. Можно принять, что на 1 % CO в дыме содержится 0,5 % H<sub>2</sub>. Теплота сгорания смеси, состоящей из 66,7 % CO и 33,3 % H<sub>2</sub> будет 12100 кДж/м<sup>3</sup>. Если процент несгоревшего CO в дыме составляет p, то

$$Q_5 = 121 \cdot V \cdot v_d \cdot p.$$

6. Теплота от механической неполноты сгорания топлива, т.е. из-за потерь топлива из трубопроводов при транспортировке его к печи. В случае жидкого топлива теряется около 1 %, т.е.

$$Q_6 = 0,01 \cdot V \cdot Q_H^P.$$

Для газообразного топлива утечки газа составляют 2-3 %, а при сжигании твердого топлива потери составляют 3-5 %.

7. Потери теплоты теплопроводностью через кладку. При наличии n-слойной плоской стенки

$$Q_7 = \frac{t_{\text{КЛ}} - t_{\text{В}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{НАР}}}} \cdot F,$$

где  $t_{\text{КЛ}}$  - температура внутренней поверхности кладки, °С;

$t_{\text{В}}$  - температура окружающего воздуха, °С;

$s_i$  - толщины слоев, м;

$\lambda_i$  - коэффициенты теплопроводности слоев, Вт/(м·К);

$\alpha_{\text{НАР}}$  - коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  - площадь поверхности, м<sup>2</sup>.

8. Потери теплоты излучением через открытые окна печи

$$Q_8 = \sigma_0 \cdot T^4 \cdot F \cdot \Phi \cdot \phi,$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) - константа Стефана-Больцмана;

T - средняя температура в печи, К;

F - площадь поверхности открытого окна, м<sup>2</sup>;

Φ - коэффициент диафрагмирования;

φ - доля времени (часа), когда окно открыто.

9. Тепло, затраченное на нагрев тары (аналогично Q<sub>2</sub>).

10. Теплота, уносимая водой, охлаждающей отдельные части печи, составляет 10-15 % от всего прихода теплоты.

11. Затраты теплоты на аккумуляцию его кладкой

$$Q_{11} = V_{\text{кл}} \cdot \rho_{\text{кл}} \cdot c_{\text{кл.ср.}} \cdot t_{\text{кл.ср.}}$$

где V<sub>кл</sub> - объем кладки, м<sup>3</sup>;

ρ<sub>кл</sub> - плотность кладки, кг/м<sup>3</sup>;

c<sub>кл.ср.</sub> - средняя теплоемкость кладки, кДж/(кг·К);

t<sub>кл.ср.</sub> - средняя температура кладки, °С.

12. Электрические потери

$$Q_{12} = I^2 \cdot R_A,$$

где I - сила тока, питающего печь, А;

R<sub>A</sub> - общее активное сопротивление цепи питания электропечи, Ом.

13. Неучтенные потери.

## § 3. Классификация огнеупорных материалов. Физические и рабочие свойства огнеупоров

Огнеупорными называют материалы, предназначенные для сооружения тепловых устройств и способные противостоять воздействию высокой температуры и физико-химических процессов.

Классификацию огнеупоров обычно проводят по химико-минералогическому составу, огнеупорности и пористости (см. далее).

**Огнеупорностью** называется способность материалов противостоять воздействию высокой температуры, не деформируясь под действием собственной массы.

Виды **пористости**:

- 1) общая - суммарный объем всех пор, содержащихся в изделии, в % от общего объема образца;
- 2) открытая - отношение объем пор, сообщающихся между собой и с окружающей средой, к общему объему образца, %.

# Классификация огнеупорных материалов - по химико-минералогическому составу

*Огнеупоры с кислотными свойствами:*

## I. Кремнезёмистые

- динасовые  $\text{SiO}_2 \geq 93 \%$
- кварцевые  $\text{SiO}_2 \geq 85 \%$

## II. Алюмосиликатные (на основе $\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{SiO}_2$ )

- полукислые  $\text{SiO}_2 < 85 \%$

*Огнеупоры с нейтральными свойствами:*

- шамотные  $28 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 45 \%$
- высокоглинозёмистые  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 45 \%$

*Огнеупоры с основными свойствами:*

## III. Магнезиальные ( $\text{MgO}$ с различными связующими добавками)

- магнезитовые  $\text{MgO} > 85 \%$
- доломитовые с  $\text{CaO}$
- форстеритовые с  $\text{SiO}_2$
- шпинельные с  $\text{Al}_2\text{O}_3$



*Динас*



*Шамот*

#### IV. Хромомагнезиальные (на основе $\text{Cr}_2\text{O}_3$ и $\text{MgO}$ )

- хромитовые 30-40 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$
- хромомагнетитовые 15-30 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$
- магнезитохромитовые 8-15 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$

*Огнеупоры, практически не подвергающиеся воздействию расплавленных металлов и шлаков:*

#### V. Углеродистые

- графитированные C > 98 %
- угольные C > 85 %
- карбофраксовые, содержащие карборунд  $\text{SiC}$  с глинистой связкой

#### VI. Цирконовые на основе $\text{ZrO}_2$

#### VII. Оксидные

- корундовые на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- титановые на основе  $\text{TiO}_2$
- берилловые на основе  $\text{BeO}$
- гафниевые на основе  $\text{HfO}_2$

**- по огнеупорности:**

огнеупорные - с огнеупорностью 1580 - 1770 °С  
высокоогнеупорные - с огнеупорностью 1770 - 2000 °С  
высшей огнеупорности - с огнеупорностью > 2000 °С

**- по пористости:**

особоплотные - с открытой пористостью < 3 %  
высокоплотные - с открытой пористостью 3 - 10 %  
плотные - с открытой пористостью 10 - 16 %  
уплотненные - с открытой пористостью 16 - 20 %  
среднепористые - с открытой пористостью 20 - 30 %  
повышеннопористые - с открытой пористостью 30 - 45 %  
легковесные - с общей пористостью 45 - 85 %  
ультралегковесные - с общей пористостью > 85 %

## Физические свойства огнеупоров

1. Пористость.
2. Газопроницаемость, зависящая от пористости, однородности структуры изделия и природы огнеупора.

Наименьшая газопроницаемость - у диноса, а наибольшая - у гетерогенного шамота. Газопроницаемость учитывают при использовании огнеупоров для футеровки вакуумных печей, при работе с защитной атмосферой.

3. Теплоемкость, изменяющаяся в пределах 840-960 Дж/(кг · К).

Величина теплоемкости определяет теплоту, аккумулированную кладкой.

4. Теплопроводность, величина которой изменяется в широких пределах  $0,1 \div 100 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Кладка печей должна иметь низкую теплопроводность для уменьшения тепловых потерь в окружающее пространство. Материалы тиглей и муфелей должны иметь высокую теплопроводность, уменьшающие перепад температуры в их стенках.

5. Электропроводность.

При нормальной температуре только углеродсодержащие огнеупоры проводят ток, но при увеличении температуры электропроводность быстро возрастает.

6. Термический коэффициент линейного расширения - увеличение линейных размеров изделия при нагреве на  $1 \text{ К} \sim 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ .

Знание этой величины необходимо для расчета количества и размеров температурных швов (5-15 мм на 1 м), исключающих возможность разрушения кладки.

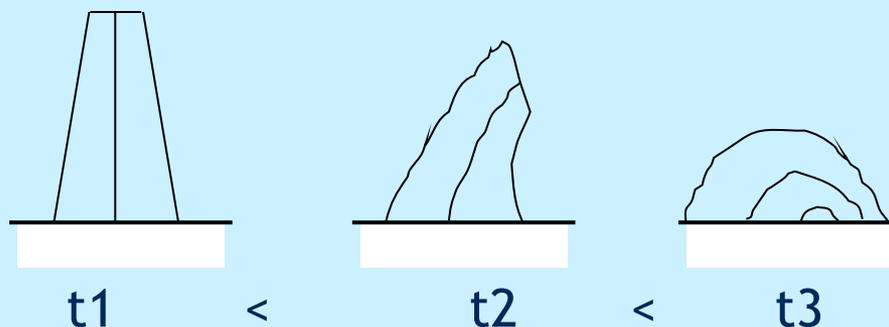
Наиболее важными рабочими свойствами огнеупоров являются:

- 1) огнеупорность;
- 2) термостойкость - способность выдерживать резкие колебания температуры, не разрушаясь;
- 3) сопротивление деформации под нагрузкой при высокой температуре.

Огнеупорность определяют с помощью конусов Зегера - керамических пироскопов в виде трехгранных пирамид. Испытуемый образец вместе с несколькими эталонными, имеющими различную огнеупорность, устанавливают на горизонтальной подставке и помещают в лабораторную печь. Скорость повышения температуры в печи должна быть строго определенной.

Особенностью огнеупорных изделий является наличие температурного интервала размягчения. Огнеупорность характеризуется той температурой, при которой образец, деформируясь при нагревании, верхним основанием коснется плиты, на которой он установлен.

Температуру определяют по стандартному пироскопу, который коснется своей вершиной плиты одновременно с испытуемым:



Динас и шамот относятся к 1-ой группе по огнеупорности (1580-1770 °С).

Для определения термостойкости испытуемые образцы клиновидной формы меньшими торцевыми концами помещают в печь и подвергают одностороннему нагреву до определенной температуры. Затем извлекают из печи и немедленно помещают в бак с проточной водой. Далее их просушивают на воздухе и взвешивают. Такой цикл из 3 операций называют *водяной теплосменой*. Определяют число теплосмен до потери образцом 20 % от первоначальной массы. Термостойкость динаса 1-3 вод. т., а шамота - 10-25 вод. т.

*Легковесные  
огнеупоры  
марки ШЛ-1.0*



Для определения деформации под нагрузкой при высокой температуре цилиндрический образец из огнеупорного материала, приложив к нему определенную нагрузку, нагревают с фиксированной скоростью повышения температуры. При испытаниях устанавливают температуру начала деформации, когда высота образца уменьшается на 4 %, и температуру, при которой сжатие достигает 40 % первоначальной высоты образца.

У динасовых изделий температура начала деформации близка к температуре огнеупорности, а у шамотных она примерно на 350 °С ниже огнеупорности. Чем ближе температура начала деформации к температуре огнеупорности изделия, тем выше качество огнеупора, так как температура деформации под нагрузкой определяет температурный предел применения огнеупорных изделий.

По форме различают следующие огнеупорные изделия:

- а) простые (прямые и клиновидные),
- б) фасонные изделия различной сложности,
- в) специальные изделия (тигли, трубки, наконечники и т.д.).

Неформованные огнеупоры изготавливают в виде порошков и пластичных масс.



*Изделия  
из силлиманитовых  
и муллитовых  
огнеупоров*



*Огнеупорные листы  
из керамических  
алюминиево-кремнистых  
волокон*



*Муллитокремнеземистая  
вата*



*Агровермикулит*

*Огнеупорные бетоны*, как и обычные строительные бетоны, состоят из вяжущего вещества и заполнителя, от которого зависит огнеупорность. Широко применяют бетон из портландцемента (силикат кальция) с заполнителем из шамота.

Огнеупорными материалами типа бетонов являются *торкрет-массы*. В качестве связки в них используют огнеупорные глины, а зерновой заполнитель подбирают исходя из применяемой торкрет-машины - устройства, с помощью сжатого воздуха наносящего подготовленную смесь на бетонируемую поверхность. Различают полусухое, пульповое (водяной суспензией) и пламенное торкретирование.

Для заполнения швов между отдельными изделиями при выполнении кладки используют *огнеупорные растворы*, которые должны иметь огнеупорность и химическую стойкость, близкие к этим свойствам у материала кладки.



*Торкрет-  
масса марки  
ТМ-55*



*Торкрет-  
машина  
LOHE*



*Торкретирование*



*Торкрет-  
установка УБР-4*

*Теплоизоляционные материалы* используют для снижения тепловых потерь. По форме они бывают в виде изделий (листов, кирпичей) и в виде неформованных теплоизоляционных материалов (засыпки, ваты). К естественным теплоизоляционным материалам относят: *диатомит* - продукт разложения водорослей, *инфузорную землю* - продукт разложения животных организмов, *вермикулит* - разновидность слюды (алюмосиликат слоистой структуры), значительно увеличивающей свой объем при нагреве; *асбест* - неогнеупорный (до 500 °С) теплоизоляционный материал, являющийся водным силикатом магния и состоящий из тонких и гибких волокон.

Искусственные теплоизоляционные материалы - это *легковесные огнеупоры*, изготавливаемые способом выгорания добавок, пеноспособом либо химическим способом, и *волокнистая изоляция*, применяемая в виде ваты, плит. Минеральные волокна изготавливают продувкой отвальных шлаков рудоплавильных печей; примером керамического волокна является каолиновая вата.

Кроме огнеупорных и теплоизоляционных материалов при сооружении печей применяют строительный кирпич, бутовый камень (крупные куски неправильной формы из известняков, доломитов, песчаников, реже - гранитов), щебень, гравий и песок, а также сталь и чугун.

Применяемые при строительстве печей металлы должны быть жаропрочными или жаростойкими.

*Жаропрочными* называют металлы, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение длительного времени и обладающие при этом достаточной окалиностойкостью.

*Жаростойкими* называют металлы, обладающие стойкостью против химического воздействия газовых сред при температуре выше 550 °С и работающие в ненагруженном состоянии.

## § 4. Строительные элементы печей

**Фундамент** металлургической печи предназначен для равномерного распределения на грунт давления, возникающего из-за статических (масса печи и перерабатываемых материалов) и динамических (вращение корпуса печи, перемещение материала) нагрузок.

- По конструкции фундаменты бывают:
- сплошные, расположенные под всем сооружением;
- ленточные, расположенные под сооружением со сплошными несущими стенами;
- одиночные, в виде отдельных столбов.

**Кладка (футеровка)** печи состоит из пода, стен и свода и является наиболее ответственной частью печи. При выполнении кладки кирпичи кладут на плашку, ребро или торец с использованием перевязки (со смещением швов).

Под выполняют многослойным. Нижние ряды делают из теплоизоляционного кирпича, верхние - из огнеупорных материалов, выбираемых в соответствии с условиями службы.

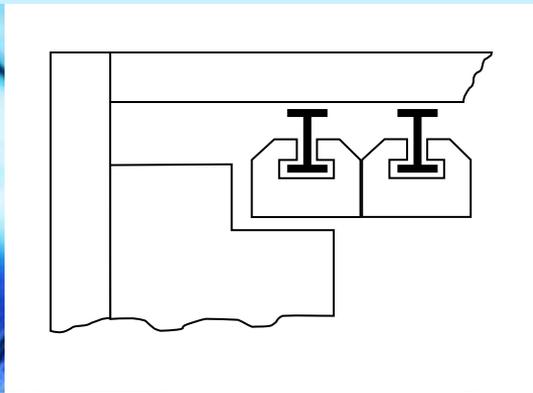
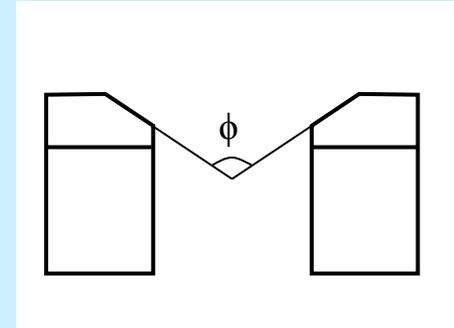
В плавильных печах рабочий слой обычно выполняют бесшовным - набивным или наварным.

Стены печей чаще всего делают двухслойными: из внутреннего огнеупорного и наружного теплоизоляционного слоя.

Кладку стен нагревательных печей ведут вертикально, а стены плавильных печей делают наклонными, с большей толщиной в нижней части.

В печах периодического действия стены выполняют из легковесных огнеупоров для уменьшения потерь на аккумуляцию теплоты кладкой.

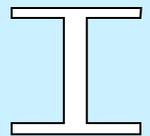
Своды печей бывают купольными, арочными и подвесными. Купольными называют своды круглых печей, их выполняют целиком из фасонного кирпича. Арочные своды кладут из клиновых и прямых кирпичей; опорные части свода опираются либо непосредственно на продольные стены печи, либо на металлические балки, положенные на стены. Выполняют своды с центральным углом  $\phi = 60, 90, 120$  и  $180^\circ$ .



При ширине пролета свыше 3 м своды делают подвесными: фасонные кирпичи или набранные из них секции с помощью специальных держателей подвешивают к поперечным балкам каркаса печи.

**Каркас** - часть печи, которая скрепляет кладку, увеличивает прочность стен и воспринимает усилия, возникающие при нагреве футеровки, а также усилия распора свода. Кроме того, каркас служит основой, на которой крепятся рамы рабочих окон, загрузочные устройства, горелки и другое печное оборудование.

Обычно каркас состоит из вертикальных стоек, горизонтальных связей и балок. Стойки и балки выполняют из стального проката: швеллера, т.е. проката, имеющего в сечении форму широкой буквы "П", и двутавра, имеющего в поперечном разрезе профиль в виде буквы "Н".



Каркасы могут быть трех типов: подвижные, жесткие и комбинированные. У подвижных каркасов стойки соединены связями из арматурного прутка, выполненными в виде болтовых соединений и позволяющими снимать термические напряжения за счет отпуска гаек. В дополнение к металлическому каркасу кладка снаружи может быть обшита сплошным цельносварным металлическим листом, образующим **кожух** печи.

После окончания футеровочных и монтажных работ печь ставят на сушку, режим и длительность которой зависит от материала кладки, конструкции и размеров печи. Сушка производится сжиганием газа в специально установленных горелках или сжиганием дров непосредственно на поду печи. После окончания сушки, не охлаждая печь, производят ее постепенный разогрев до рабочей температуры.

Выбор огнеупорных материалов для футеровки производят на основании требований к ним в данной промышленной печи. В процессе службы огнеупоры разрушаются под воздействием высокой температуры и возникающих из-за этого внутренних напряжений; химического воздействия атмосферы печи, шлака и металла; различных видов механических усилий.