

# Тема 2. Конструкции и тепловая работа печей

## Лекция 4

## § 5. Шахтные печи

Согласно классификации общей теории печей, данные агрегаты относятся к печам-теплогенераторам, работающим по массообменному режиму с плотным слоем.

Процесс горения топлива и другие реакции окисления происходят в нижней части рабочего пространства, куда через фурмы подается воздух или дутье, обогащенное кислородом.

Фильтруясь через загруженные в печь материалы, газообразные продукты сгорания постепенно охлаждаются, нагревая и расплавляя шихту и участвуя в эндотермических реакциях (образование  $\text{CO}$ , диссоциация содержащихся в шихте флюсов). На выходе из слоя их удаляют через газоходную систему.

Под действием высокой температуры шихта размягчается и постепенно переходит в расплавленное состояние. Объем слоя в зоне плавления уменьшается, и под давлением верхних слоев твердая шихта движется вниз.

При этом образовавшаяся в процессе плавления жидкая фаза опережает твердую и стекает на лещады (так называют под шахтной печи). По мере накопления расплав выводится из агрегата и направляется на дальнейшую переработку.

Шахтная печь черной металлургии называется **доменной печью** и используется для производства чугуна (сплава Fe и C, содержащего более 2 % C, а также постоянные примеси - Si, Mn, P и S) - важнейшего первичного продукта черной металлургии, используемого для передела при производстве стали. В печь непрерывно загружаются железорудные материалы и кокс, подается воздух (дутье), а из печи отводится доменный газ.

Теплота, выделяемая в результате горения топлива, расходуется на нагрев и расплавление материалов шихты и на образование чугуна и шлака.

Чугун и шлак, накапливаясь в печи, выпускаются периодически через 2-2,5 ч. Чугун в доменной печи получается путем восстановления железа из оксидов железорудных материалов.

В доменной плавке применяют подготовленную шихту из спекшихся кусков офлюсованного агломерата или окомкованных и обожженных окатышей. Основным видом топлива служит кокс. В целях экономии дефицитного и дорогостоящего кокса применяют частично природный газ или мазут, а для интенсификации доменного процесса - кислород.

*Железорудные окатыши*



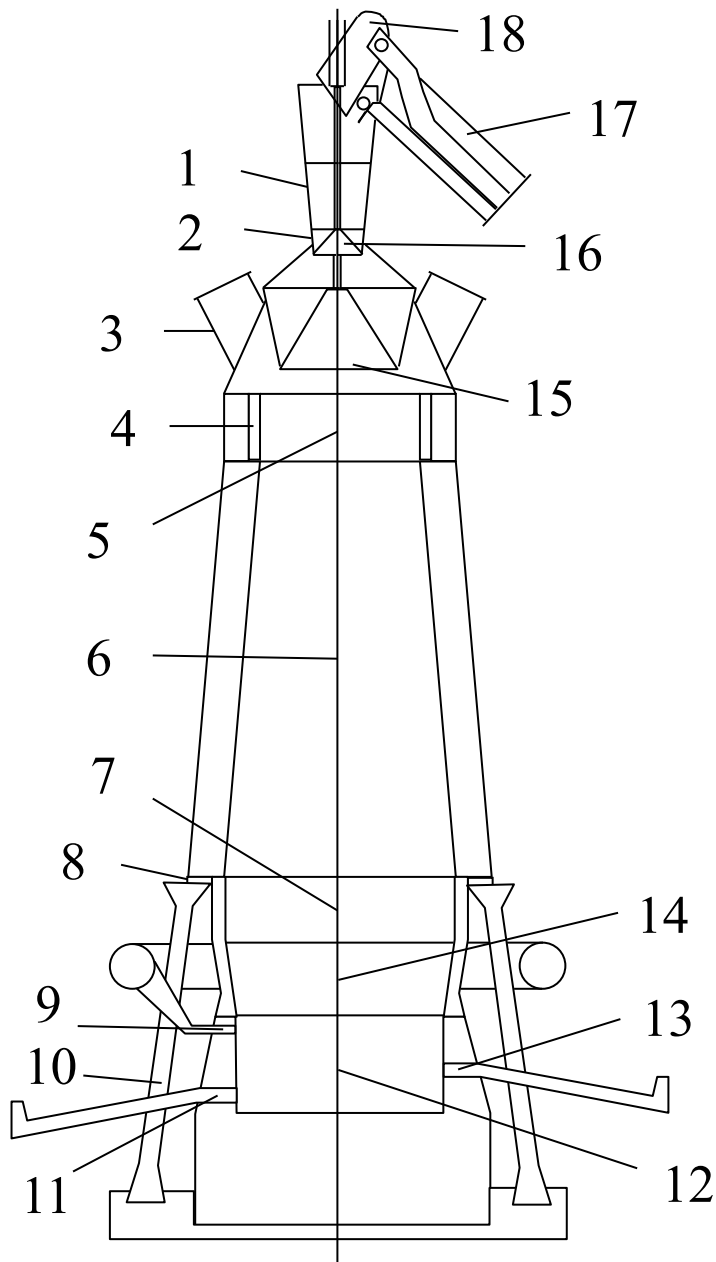
*Железорудный агломерат*



*Раскалённая руда*



*Ковкий чугун*



## Доменная печь:

- 1 - приёмная воронка;
- 2 - распределитель шихты;
- 3 - газоотводы;
- 4 - защитные сегменты колошника;
- 5 - колошник;
- 6 - шахта;
- 7 - распар;
- 8 - опорное кольцо;
- 9 - отверстия для воздушных фурм;
- 10 - основные колонны;
- 11 - чугунные лётки;
- 12 - горн;
- 13 - шлаковые лётки;
- 14 - заплечики;
- 15 - большой конус;
- 16 - малый конус;
- 17 - наклонный мост;
- 18 - скип

Рабочий объем печи (2000-5000 м<sup>3</sup>) представляет собой высокую шахту круглого сечения, внутренняя часть которой выложена огнеупорными материалами.

Верхняя часть печи называется колошником 5, далее следует шахта 6, которая постепенно расширяется книзу и переходит в самую широкую часть печи - распар 7. Нижняя часть печи - горн 12 соединяется с распаром через заплечики 14.

На нижнем уровне горна на высоте 0,5-2 м от лещади расположены отверстия для выпуска чугуна - чугунные летки 11 (одна, две, три или четыре в зависимости от объема печи). Расстояние между чугунной леткой и лещадью оставляется для предохранения лещади от размывания чугуном. В средней части горна расположены отверстия для выпуска шлака - шлаковые летки 13 (одна или две). В верхней части горна имеются отверстия для воздушных фурм 9.

Шахту и распар печи выкладывают из шамотного кирпича высокого качества, а горн и нижнюю часть лещади - углеродистыми блоками.

В верхней центральной части лещади применяют высокоглиноземистые большемерные блоки. Это уменьшает число швов кладки и увеличивает стойкость лещади. Для увеличения срока службы лещади применяют воздушное охлаждение снизу.

Давление газов в доменной печи достигает 0,3-0,5 МПа, поэтому огнеупорная кладка печи заключена в стальную броню (кожух) толщиной 25-40 мм. Толщина кладки в верхней части шахты 900-1000 мм, в нижней - 1300-1500 мм.



Чтобы предотвратить перегрев и разрушение огнеупорной кладки, ее охлаждают. Для этого между металлическим кожухом и огнеупорной кладкой установлены водо- и парохлаждаемые холодильники.

Водой охлаждают также арматуру фурменных приборов и шлаковых леток.

Футеровка колошника с внутренней стороны защищена от ударного и истирающего воздействия кусков шихты металлическими плитами.

В верхней части доменной печи расположен засыпной аппарат, в который шихта подается скипами или транспортерами. Из приемной воронки 1 шихта поступает сначала на малый 16, а затем на большой 15 конусы. Большой конус опускается при закрытом малом, что предотвращает прорыв доменного газа из печи в атмосферу. Для равномерной загрузки шихты по окружности колошника применяют вращающиеся распределители шихты 2.



*Выпуск чугуна  
на Нижне-Тагильском  
металлургическом  
комбинате*

Доменная печь стоит на массивном фундаменте из огнеупорного бетона. На него опираются основные колонны печи 10, на которых лежит опорное кольцо 8, воспринимающее всю массу кладки, и стальные конструкции верхней части печи.

Нагретый воздух из воздухонагревателей поступает к печи по футерованным воздухопроводам, а затем через фурменные устройства - в печь. Природный газ, мазут и кислород под давлением 1-1,2 МПа подают через те же фурменные устройства.

За счет кислорода воздуха в горне доменной печи происходит горение кокса и природного газа или мазута.

Продукты сгорания по мере прохождения вверх нагревают шихтовые материалы и восстанавливают железо, марганец и другие элементы. Из печи газы выходят по газоотводам 3 и удаляются в систему газоочистки, так как вместе с газом из печи выносятся много пыли ( $10-20 \text{ г/м}^3$ ).

Чугун и шлак стекают в нижнюю часть печи и по мере накопления их выпускают через отверстия (летки) по желобам в ковши.

После выпуска чугуна канал чугунной летки закупоривается огнеупорной массой при помощи поршневой электрической пушки. Шлаковая летка закупоривается специальным стопором.



*Крупнейшее в Казахстане металлургическое предприятие - «АрселорМиттал Темиртау». Доменная печь высотой в 25 этажей. Здесь шихта (смесь из агломерированного железа, кокса, извести и доломита) превращается в жидкий чугун. Температура внутри печи достигает 1700-2000 градусов, а в летке, по которой течет расплавленный чугун при его выпуске - 1400 градусов*



*Горновые*

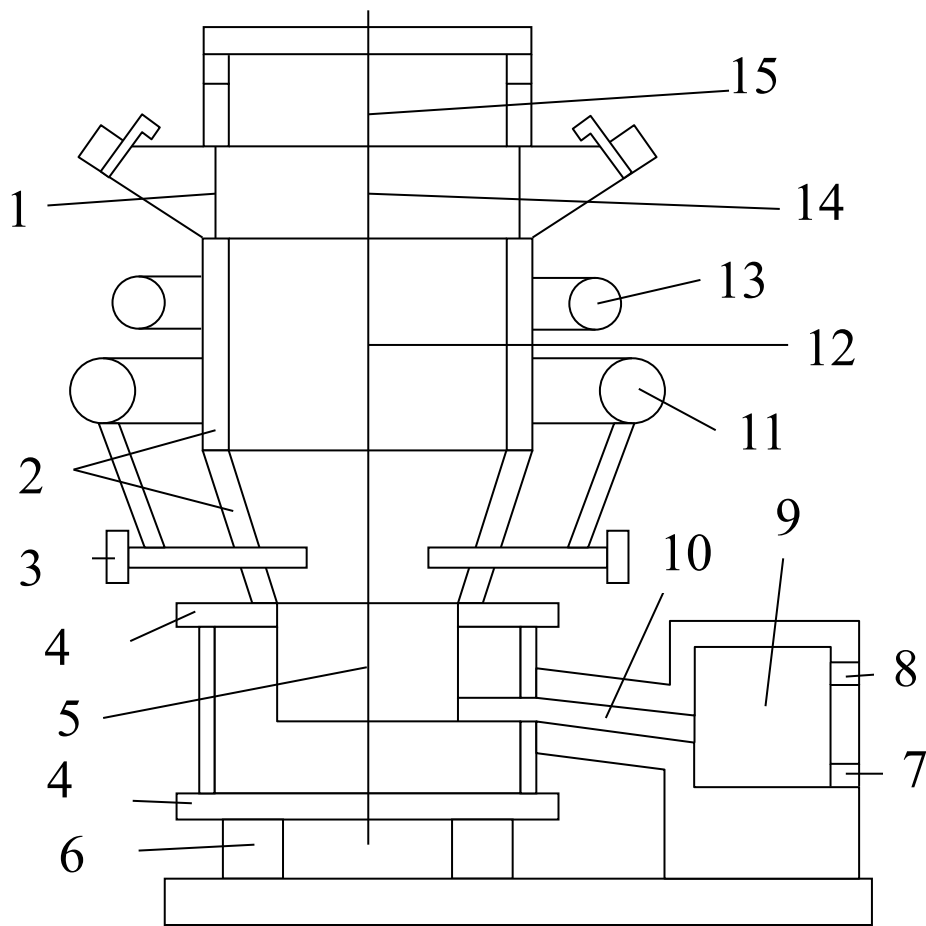
*Выпуск чугуна  
из доменной  
печи*



Шахтные печи цветной металлургии применяют при производстве Cu, Pb, Ni, Co и Zn.

Эти печи представляют собой вытянутые в высоту прямоугольные в плане агрегаты. В зависимости от вида сырья они могут существенно отличаться размерами и профилем. При ширине печи 1÷1,7 м в фурменной зоне ее длина при различной производительности может изменяться от 2,5 до 26,5 м.

Основанием печи служит бетонный фундамент, на котором установлены невысокие колонны 6. На них кладут чугунные лещадные плиты 4, служащие основанием нижней части печи - горна 5. Горн делают из динаса при кислых шлаках и из хромомангезита при основных. Для внешней футеровки используют шамот. Снаружи горн заключен в стальной сварной кожух.



## Поперечный вертикальный разрез шахтной печи:

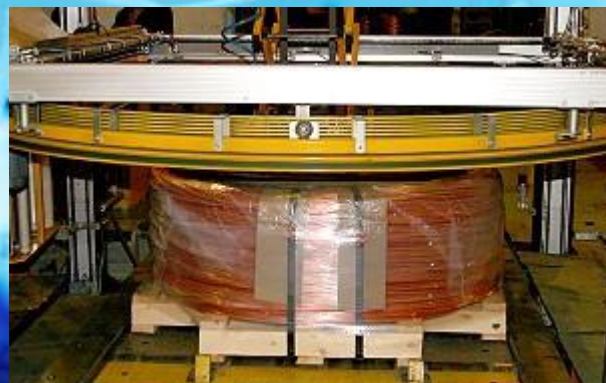
- 1 - загрузочные окна;
- 2 - кессоны;
- 3 - воздушные фурмы;
- 4 - металлические плиты;
- 5 - горн;
- 6 - колонны;
- 7 - отверстие для металла;
- 8 - отверстие для шлака;
- 9 - передний горн;
- 10 - жёлоб;
- 11 - воздухопроводы;
- 12 - шахта;
- 13 - водяной коллектор;
- 14 - колошник;
- 15 - шатёр



*Шахтная печь компании  
Miruso Mining Co  
в Демократической  
Республике Конго  
и выпуск черновой меди*



*Шахтная печь  
для обжига  
известки  
на предприятии  
ООО  
"Силекатобетон"  
г. Сумы, Украина*



*Осветленная медная катанка диаметром 8 мм  
для производства электротехнических изделий (слева)  
и шахтная печь компании «Asarco» (США)  
для ее производства (справа)*



В горне накапливается расплав, которым в зависимости от вида технологического процесса может быть *штейн* - сплав сульфидов металлов, *штейза* - сплав арсенидов (соединений с мышьяком As) и антимонидов (соединений с сурьмой Sb) Fe, Co, Ni, Cu и других металлов или *черновой металл*, а также *шлак*.

Обязательным элементом шахтной печи, работающей с непрерывным выпуском жидких продуктов плавки, является соединенный с горном футерованным желобом 10 передний горн 9 - обогреваемый отстойник овальной формы, в котором имеются отверстия для выпуска шлака 8 и остальных продуктов плавки 7.

Сверху на стенки горна укладывают и приваривают к кожуху массивные металлические плиты, служащие основанием для установки и крепления кессонов 2 - плоских металлических коробок, охлаждаемых проточной водой. Нижние кессоны устанавливают с небольшим наклоном к вертикальной плоскости, образуя заплечики, воспринимающие часть активного давления слоя находящегося в печи материала. Кессоны второго ряда устанавливают вертикально и поддерживают с помощью окружающих печь металлических балок, роль которых иногда выполняют воздухопроводы печи 11. С помощью отбортовки кессоны соединяются между собой с зазором для прохода воды, которую подают в нижнюю часть кессона и отводят сверху. Для уплотнения зазоров между кессонами закладывают асбестовый шнур. Каждый ряд кессонов обычно присоединяют к собственному водяному коллектору 13. В кессонах нижнего ряда имеются отверстия для установки воздушных фурм 3.

Часть печи, расположенная над шахтой 12, называется колошником 14. Его сооружают из металлических плит.

Шихту загружают в печь через окна 1, расположенные в продольных стенах колошника. Для герметизации рабочего пространства загрузочные окна оборудуют двухшиберными устройствами, имеющими специальную приемную камеру, исполняющую роль шлюза. Выше колошника расположен шатер 15 - газоотводящая и сепарационная камера. Шатер футеруют шамотом, в его куполе имеются отверстия, соединенные с металлическим газоходом.

Достоинствами шахтных печей цветной металлургии (по сравнению с другими агрегатами для выплавки металлов) являются: 1) высокая удельная производительность; 2) небольшой расход топлива; 3) большое значение коэффициента использования топлива (до 70 %); 4) высокая степень десульфурации (до 80 %). Недостатки: 1) значительный пылевынос - до 12 % от массы перерабатываемых материалов; 2) повышенные требования к крупности кусков - не менее 10÷20 мм; 3) использование дорогостоящего кокса, в связи с чем перспективным является вдувание природного газа и частичная замена кокса антрацитом.

Основными характеристиками режима движения материалов и газа в рабочем пространстве шахтных печей служат давление и скорости их перемещения в слое. Они являются сложными функциями пространства, времени и особенностей технологического процесса, выраженных в непрерывном изменении состава, свойств и агрегатного состояния движущейся среды. Наиболее полные и точные сведения об этих характеристиках могут быть получены при непосредственном измерении на промышленном агрегате.

Количество теплоты, выделяющейся в шахтной печи, определяется интенсивностью протекания экзотермических реакций и зависит от количества подаваемого дутья. Однако при увеличении количества дутья наступит момент, когда динамическое давление газового потока уравновесит массу столба шихтовых материалов. Зависание столба шихты приводит к его резкому обрушению после расплавления. Вызывающее это явление количество дутья называется предельным.

Произведем качественную оценку тепловой работы шахтной печи, рассматривая ее как противоточный теплообменник. Общее уравнение теплового баланса:

$$G_M \cdot C_M \cdot dT_M = G_G \cdot C_G \cdot dT_G ,$$

где  $G_M$  и  $G_G$  - массовый расход нагреваемого материала и охлаждающих газов, кг/с;

$C_M$  и  $C_G$  - их теплоемкость, Дж/(кг·К);

$dT_M$  и  $dT_G$  - изменение их температуры, К,

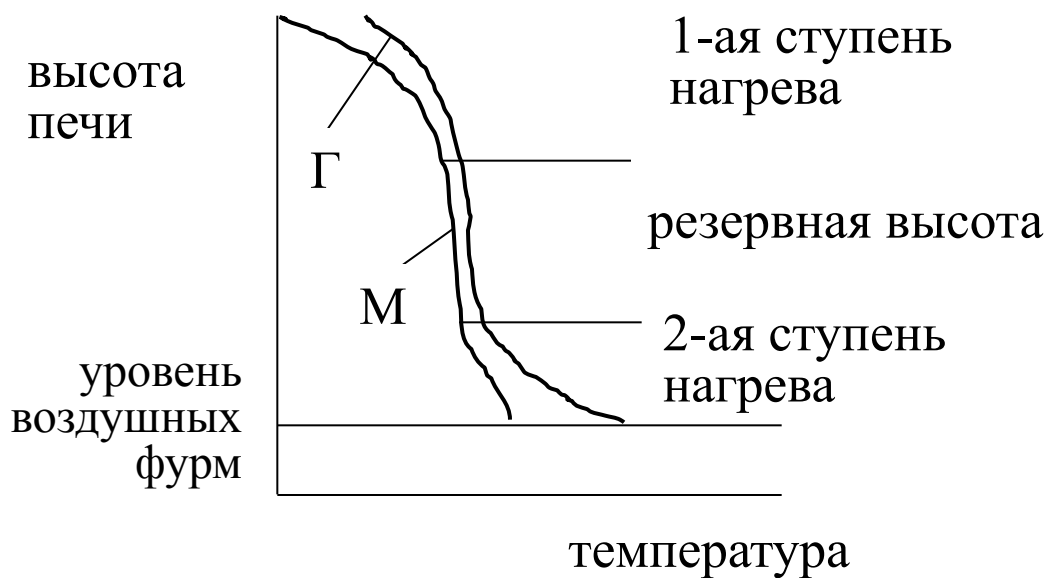
или

$$W_M \cdot dT_M = W_G \cdot dT_{MG} ,$$

где  $W_M$  и  $W_G$  - «водяные числа» материала и газов, Вт/К.

«Водяные числа» в зависимости от интервала температуры и протекающих физико-химических процессов могут значительно изменяться.

Часто наблюдается случай, когда в верхней части печи  $W_M < W_G$ , в средней -  $W_M = W_{MG}$ , а в нижней -  $W_M > W_G$ . Таким образом, типичное изменение температуры по высоте шахтной печи имеет вид:



В нижней части печи при достаточной поверхности нагрева газы отдадут всю свою теплоту материалу, однако этой теплоты не хватит, чтобы нагреть материал до начальной температуры газов.

На 1-ой ступени нагрева конечная температура нагреваемого материала практически достигает начальной температуры газов; газы при любой высоте слоя не могут отдать всей своей теплоты нагреваемому материалу и выходят из состояния теплообмена с высокой конечной температурой, что является неизбежным.

Теплообмен в шахтной печи завершен, на что указывает наличие зоны умеренной температуры. С увеличением высоты печи не происходит значительного снижения температуры колошниковых газов. Объемы верхней и нижней ступеней теплообмена остаются практически неизменными, при этом расширяется лишь зона умеренной температуры (резервная высота).

Физическое тепло газов используется в доменной печи очень хорошо, и в этом отношении доменная печь является совершенным агрегатом.

Химически же связанное тепло углерода используется не полностью, так как в печи необходимо поддерживать восстановительную атмосферу, поскольку основное назначение доменной печи заключается в восстановлении железа из его оксидов.

В результате неполного окисления углерода и водорода влаги в колошниковом газе содержатся горючие газы  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ , и  $\text{CH}_4$ . С колошниковым газом уходит приблизительно 44 % теплоты, получаемой при сгорании кокса и природного газа (в печи для выплавки цветных металлов - около трети расходуемой теплоты).

Применение высокотемпературного дутья позволяет уменьшить расход кокса на 10-15 %.



Шахтные печи цветной металлургии могут иметь два принципиально различных режима работы. При восстановительной плавке, т.е. при переработке окисленных руд, в печи создают *газогенераторный режим*, при котором обеспечивают образование газообразной восстановительной среды (СО) для непрямого восстановления окислов. Прямым восстановителем является кокс, однако в этом случае энергозатраты на процесс восстановления, отнесенные к 1 кг углерода, в 2,5 раза выше.

При окислительной плавке, т.е. при переработке сульфидных руд, создают *топочный режим работы*, при котором дутье используют для сжигания кокса и для окисления сульфидов, а также элементарной серы, выделившейся при термическом разложении минералов. В первом случае расход кокса может достигать 20-25 %, а во втором - всего лишь 2-3 %.

Из рассмотрения работы шахтных печей следует, что в них имеют место все три вида теплообмена между газообразными продуктами горения и кусковым материалом.

Горячие газы, двигаясь через пустоты в шихте, передают теплоту конвекцией, а при температуре выше  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  - и излучением.

Малая толщина слоя газа уменьшает интенсивность передачи теплоты излучением, поэтому конвекция играет существенную роль и при температуре до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Интенсивность теплообмена зависит от скорости движения газа и величины поверхности контакта газа с кусками шихты.

Теплота с поверхности шихты передается внутрь кусков теплопроводностью, ее интенсивность прямо пропорциональна коэффициенту теплопроводности и обратно пропорциональна радиусу кусков шихты.

Плотный слой образуется кусками различной формы и размеров, имеющими различные теплофизические свойства. Сложный характер движения кусков затрудняет определение реальной поверхности теплообмена. Различная величина зазоров между кусками влияет не только на особенности омывания их газами, но и делает неразделимыми процессы теплопроводности, излучения и конвекции, действующие в слое. Поэтому приходится применять общий коэффициент теплопереноса.

Из-за неопределенности поверхности теплообмена используют объемный коэффициент теплопередачи  $\alpha_v$ , Вт/(м<sup>3</sup>·К). Его связь с поверхностным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), выражается следующим образом:

$$\alpha_v = \alpha \cdot F,$$

где  $F$  - площадь поверхности нагрева, заключенная в 1 м<sup>3</sup> слоя кусковых материалов, м<sup>2</sup>.

Технологические газы в доменной печи имеют температуру 1600-2300 °С, а на выходе из печи - 150-300 °С.

Из-за большого объема рабочего пространства и неравномерной газопроницаемости шихты дутье неравномерно распределено по фурмам, поскольку они питаются из одного коллектора. Неравномерное по окружности распределение газов, в свою очередь, создает различные температурные условия в фурменных очагах, поскольку в них поступает разное количество дутья.

Эта неравномерность распределения температуры и состава газовой фазы в фурменном поясе усугубляется в дальнейшем всем ходом технологических и теплообменных процессов, вызывает местные перегревы кладки и является причиной ее прогара.

Максимальную температуру в шахтной печи цветной металлургии - 1400-1500 °С - получают на ее оси несколько выше уровня фурм.

В центральной части шахты идет интенсивное взаимодействие между коксом и остатками нерасплавившейся шихты, и температура здесь составляет 1300-1350 °С из-за потребления большого количества теплоты на реакции прямого восстановления.

В нижней части печи температурный режим определяется условиями наиболее полного разделения шлака и металлосодержащей части: температуру шлака поддерживают на уровне 1400 °С, а температура штейна зависит от его состава и составляет 1000-1300 °С.