

Раздел 2. Производство стали в электропечах
Тема 2.1. Конструкция и расчет основных параметров дуговых
сталеплавильных печей

Лекция № 38

Тема: Стойкость футеровки электропечей. Очистка отходящих газов. Электроды, электрическая дуга и электрооборудование. Автоматизация электрического режима плавки. Устройство для электромагнитного перемешивания металла.

План лекции:

1. Стойкость футеровки электропечей.
2. Очистка отходящих газов.
3. Электроды, электрическая дуга и электрооборудование
4. Автоматизация электрического режима плавки
5. Устройство для электромагнитного перемешивания металла

Футеровка печи в эксплуатации изнашивается неравномерно, по этому ее участки через определенные промежутки времени ремонтируют.

Следующие меры способствуют повышению стойкости футеровки дуговых печей:

- улучшение качества применяемых огнеупорных материалов;
- усовершенствование способов изготовления футеровки;
- установление оптимальных размеров плавильного пространства;
- сокращение продолжительности плавки за счет увеличения удельной мощности трансформаторов и совершенствования технологии;
- подогрев металлошихты;
- применение кислорода.

При тщательном уходе за футеровкой удастся увеличить рабочее время плавильного агрегата. Наиболее ответственной частью футеровки дуговой печи является подина, так как она непосредственно контактирует с жидким металлом и шлаком и при ее неисправности возможен «уход плавки».

Состояние подины оценивают после выпуска каждой плавки. Поверхность подины всегда должна быть гладкой, без наростов, бугров и ям.

Неровности устраняются, для чего систематически, после выпуска каждой плавки, подину заправляют огнеупорными подварочными материалами.

Для сокращения периода очистки печи необходимо, чтобы шлак перед выпуском был жидкоподвижным, его сливают с металлом из печи без остатка. Если работают с оставлением шлака в печи и в ковш выпускают только металл, то осмотр подины, ее очистка и заправка осуществляются после серии плавков. Откос у сливного отверстия поддерживают пологим, чтобы обеспечить полное удаление жидких металла и шлака в ковш.

Откос у рабочего окна должен быть гладким, иметь наклон $45-60^\circ$ в сторону подины, чтобы можно было быстро очищать ее от остатков шлака и металла. После очистки подины подварку поврежденных мест на подине и откосах выполняют, как правило, сухим или увлажненным жидким стеклом, мелкозернистым магнезитовым порошком (одним или в смеси с доломитом).

Заправку футеровки слоями магнезита и магнезито-доломитовой смеси выполняют быстро, что необходимо для рационального использования высокой температуры рабочего пространства печи для лучшего спекания зерен огнеупорных материалов между собой и с футеровкой.

При выплавке высокохромистой стали с применением кислорода наблюдается зарастание ванны печи шлаком и огнеупорными материалами. Это явление нежелательное, так как приводит к снижению массы плавки и к работе на ложных (наваренных) порогах.

Чтобы устранить зарастание футеровки, изменяют сортамент выплавляемых марок стали, кроме того, тщательно очищают подину, откосы печи и периодически забрасывают на них кварцевый песок.

Для предупреждения аварийного ухода жидкого металла через футеровку подины и откосов печи необходимо:

- осуществлять очистку и заправку поврежденных мест футеровки высококачественными огнеупорными материалами;
- не допускать зарастания подины и образования ложных порогов;
- применять подбивку и восстановление подины и откосов во время текущих холодных ремонтов футеровки;
- не допускать длительной работы на густых магнезиальных и кислых кремнеземистых шлаках;
- исключать случаи местного перегрева и нарушения электрического и теплового режимов плавки.

Стойкость стен и свода основной дуговой печи значительно ниже стойкости подины и зависит от таких факторов, как:

- электрический режим плавки;
- длительность пребывания в печи жидкого металла;
- состав, вязкость и отражательная способность шлака; «тепловой режим плавки»;
- качество ремонтных работ и используемых огнеупорных материалов и т. д.

Износ стен и свода существенно возрастает, если плавку ведут на открытых мощных длинных дугах и металл нагревают в последний период доводки. Следует иметь в виду, что футеровка печи к моменту выпуска плавки достаточно разогрета и достигает температуры размягчения огнеупоров.

Плавки с более короткой выдержкой жидкого металла в печи под пенистыми шлаками (после присадки коксика) благоприятны в отношении влияния на повышение стойкости стен и свода. Положительное влияние на стойкость стен и свода оказывает также повышение основности шлака за счет увеличения в нем содержания оксида кальция и снижения концентрации оксидов железа.

Разрушение футеровки откосов на уровне шлакового пояса лишает опоры расположенного выше участка кладки стен и вызывает ее осыпание.

Исполнение шлаковой зоны откосов из высокоплотного магнезитового кирпича на шпинелидной связке улучшает сопротивляемость футеровки размыванию шлаками и увеличивает долговечность кладки стен. Повышению стойкости стен способствуют:

- сокращение продолжительности плавки;
- установка электродов под углом 4-8° к центру печи с целью увеличения расстояния между дугами и футеровкой;
- выравнивание мощности по фазам.

Частичная замена кирпичной кладки стен высокомогущных печей металлическими панелями (кессонами) с водяным или пароиспарительным охлаждением приводит к снижению расхода огнеупоров, повышению производительности труда во время ремонтов и увеличению продолжительности рабочей кампании футеровки стен печи между ремонтами.

Водоохлаждаемые панели для установки в стенах сверхмощных дуговых печей выполняют с принудительной системой циркуляции воды, для чего используют бесшовные трубы диаметром 60—90 мм с толщиной стенки до 16 мм, зазор между трубами составляет 2—5 мм. Преимуществом тонких панелей, имеющих в зависимости от условий эксплуатации различную форму, является отсутствие сварных швов. Панели обеспечивают

нормальную работоспособность при удельном тепловом потоке до 250 кВт·ч/м². Поверхность панели, обращенную в рабочее пространство печи, покрывают специальным огнеупорным материалом, предохраняющим панель от критического теплового потока.

Главной причиной разрушения магнезитохромитовых сводов является поглощение рабочей поверхностью свода оксидов железа.

В современных ЭСПЦ предусмотрена полная эвакуация газов из рабочего пространства ДСП через газоотборный патрубок, установленный на своде печи, а также газов выбивающихся из рабочего окна, в зазоры между электродами и сводом, сводом и кожухом через вытяжной зонт, установленный над печью (рис.20.1).

Отходящие из печи газы содержат вредные вещества (табл.) в виде оксидов углерода, серы, азота, фторидов и цианидов, а также частички пыли и возгоны легколетучих элементов. Выбросы оксидов азота и цианистых соединений пропорциональны удельной мощности дуговой печи. Эту связь можно описать для печей 25-40 т эмпирическими зависимостями:

$$C_{NO} = 6,85 \times 10^{-11} \times P^{3,9}; \quad C_{CN} = 4,4 \times 10^{-14} \times P^{4,4},$$

где C_{NO} и C_{CN} – удельное количество оксидов азота и цианистых соединений (кг/т), P – удельная мощность, подаваемая на электроды (кВт·ч/т).

Количество вредных газообразных веществ в газах, выбрасываемых из электросталеплавильных печей

Вредные веществ	Средняя концентрация, кг/м ³	Удельные выбросы, г/т
Оксиды: углерода	13500	1350,0
азота	550,0	270,0
серы	5,0	1,60
Цианамиды	60,0	28,40
Фториды	1,2	0,56

Связь количества газовыделений (Γ , $\text{нм}^3/\text{ч}$) в зависимости от вместимости печи (Q) описывается выражением, полученным М.М. Гасиком:

$$\Gamma = 21862,61gQ - 9007,6,$$

а связь интенсивности продувки ванны кислородом (I_0 , $\text{нм}^3 \text{O}_2/\text{мин}$) и вместимости печи

$$I_0 = 5,196 + 0,921.$$

Общий выход газа определяется, прежде всего, вместимостью печи, а его удельный выход зависит от применяемой технологии, удельного расхода кислорода, углеродсодержащих материалов, горючих и инертных газов. В современных ДСП интенсивность выхода газа при полном дожигании СО до CO_2 приведена в табл.

Интенсивность газовойделения из ДСП

Условия	Вместимость ДСП, т			
	6	12	25	50
Интенсивность подачи кислорода, $\text{нм}^3/\text{мин}$	15	20	25	35
Выход газа из под свода печи, $\text{нм}^3/\text{т}\times\text{ч}$	8000	15000	21000	28000
Объем газов, отсасываемых через зонт в межфонарном пространстве над ДСП, тыс. $\text{нм}^3/\text{час}$	150	250	400	700
Объем газов, идущих на тканевые фильтры, тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$	280	400	612	1020

Для точного расчета выхода газов из ДСП необходимо проводить материальный баланс, учитывая количество окислившегося углерода, поступившего с металлоломом, вдуваемого углеродсодержащими

материалами, углерода электродов, расход кислорода и других газов. При расчете можно ориентировочно принять, что газ выходит из ДСП при температуре порядка 1200°C , перед установкой мокрой газоочистки он имеет температуру около 450°C и перед фильтрами сухой газоочистки – около 130°C .

Эвакуации и очистке подвергаются газы выходящие из плавильного пространства печи и отсасываемые из-под фонарного пространства. Газы в современных ЭСПЦ подвергаются дожиганию в специальных камерах (или в установках предварительного подогрева лома) и затем подаются в камеры быстрого охлаждения. Здесь газы охлаждаются водой или путем подсоса наружного воздуха. При охлаждении водой происходит дополнительно с охлаждением частичное улавливание пыли, которая вместе с водой уходит в шламоборник. Охлажденные до определенной температуры газы через систему отсечки газа поступают в общий газопровод от вытяжного зонта. Система газоочистки регулирует остаточное давление в ДСП в различные периоды плавки. Из газопровода газ с помощью принудительной вентиляции подается на фильтры сухой очистки, где происходит окончательная очистка газа с выделением сухой пыли. Очищенный газ удаляется в атмосферу, а шламы и пыли направляются в шламоборник на дальнейшую переработку.

Используются различные системы очистки газов, отходящих из ДСП. В качестве очистительных устройств применяются *тканевые фильтры, электрофильтры*, а также используют *трубы Вентури*.

В электросталеплавильном производстве на отечественных заводах наиболее широко применяется мокрый способ очистки газов с использованием труб Вентури и редко сухой – с помощью тканевых фильтров. Достоинством мокрого способа являются малые габариты и незначительные капитальные затраты на их сооружение по сравнению с системами сухой газоочистки. Однако, мокрый способ характеризуется значительно большими эксплуатационными затратами, связанными с большим расходом воды и необходимостью ее очистки в оборотных и замкнутых циклах водоснабжения.

Количество выделяющихся из современной ДСП газов достигает $500 \text{ м}^3/\text{т}\times\text{ч}$ и более. Поэтому в ДСП суммарная площадь отверстия для газоотвода в своде печи должна быть большой (или несколько отверстий) и мощность газоочисток – повышенной.

Теплосодержание отходящих газов колеблется от $50\text{-}65 \text{ кВт}\times\text{ч}/\text{т}$ стали до $150\text{-}200 \text{ кВт}\times\text{ч}/\text{т}$. Тепло отходящих газов для предварительного нагрева лома используется в шахтных ДСП. Однако, при этом, как известно, охлаждение отходящих газов приводит к образованию диоксинов и наиболее интенсивно в интервале $300\text{-}400^{\circ}\text{C}$. Для их разложения потребовался бы

подогрев газов до температуры не ниже 800°C . Разработанные системы газоочисток для гарантированного предупреждения образования диоксинов требуют подогрева отходящих газов до $1150\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ с последующей их закалкой до $200\text{--}250^{\circ}\text{C}$, что позволяет, в соответствии с очень жесткими международными требованиями, снижать содержание диоксинов в выбрасываемых в атмосферу газах до $0,1\text{ мг/м}^3$. Но при этом в значительной степени теряются преимущества организации подогрева шихты теплом отходящих газов непосредственно в электросталеплавильном агрегате, т.е. использования шахтных ДСП.

Электроды, электрическая дуга

Ток в плавильное пространство печи подается через электроды, собранные из секций, каждая из которых представляет собой круглую заготовку диаметром от 100 до 610 мм и длиной до 1500 мм. В малых электропечах используют угольные электроды, в крупных — графитированные. Графитированные электроды изготавливают из малозольных углеродистых материалов: нефтяного кокса, смолы, пека. Электродную массу смешивают и прессуют, после чего сырая заготовка обжигается в газовых печах при 1300°C и подвергается дополнительному графитирующему обжигу при температуре $2600\text{—}2800^{\circ}\text{C}$ в электрических печах сопротивления. В процессе эксплуатации в результате окисления печными газами и распыления при горении дуги электроды сгорают. По мере укорачивания электрод опускают в печь. При этом электрододержатель приближается к своду. Наступает момент, когда электрод становится настолько коротким, что не может поддерживать дугу, и его необходимо наращивать. Для наращивания электродов в концах секций сделаны отверстия с резьбой, куда ввинчивается переходник-ниппель, при помощи которого соединяются отдельные секции. Расход электродов составляет $5\text{—}9\text{ кг}$ на тонну выплавляемой стали.

Электрическая дуга — один из видов электрического разряда, при котором ток проходит через ионизированные газы, пары металлов. При кратковременном сближении электродов с шихтой или друг с другом возникает короткое замыкание. Идет ток большой силы. Концы электродов раскаляются добела. При раздвигании электродов между ними возникает электрическая дуга. С раскаленного катода происходит термоэлектронная эмиссия электронов, которые, направляясь к аноду, сталкиваются с нейтральными молекулами газа и ионизируют их. Отрицательные ионы направляются к аноду, положительные к катоду. Пространство между анодом и катодом становится ионизированным, токопроводящим. Бомбардировка анода электронами и ионами вызывает сильный его разогрев. Температура анода может достигать 4000°C . Дуга может гореть на постоянном и на переменном токе. Электродуговые печи работают на переменном токе. В последнее время в ФРГ построена электродуговая печь на постоянном токе.

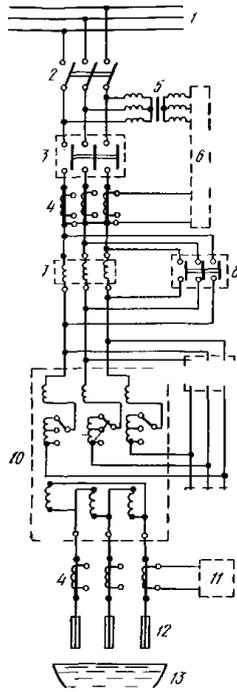


Рис. 79. Схема электропитания дуговой печи:

1 — высоковольтный кабель; 2 — разъединитель; 3 — главный выключатель; 4 — трансформатор тока; 5 — трансформатор напряжения; 6 — защитные реле, измерительные приборы; 7—дроссель; 8 — шунтирующий выключатель; 9 — переключатель ступеней напряжения; 10 — печной трансформатор; 11— регулятор; 12 — электроды; 13 — металл

В первую половину периода, когда катодом является электрод, дуга горит. При перемене полярности, когда катодом становится шихта — металл, дуга гаснет, так как в начальный период плавки металл еще не нагрет и его температура недостаточна для эмиссии электронов. Поэтому в начальный период плавки дуга горит беспокойно, прерывисто. После того как ванна покрывается слоем шлака, дуга стабилизируется и горит более ровно.

Электрооборудование

Рабочее напряжение электродуговых печей составляет 100—800 В, а сила тока измеряется десятками тысяч ампер. Мощность отдельной установки может достигать 50—140 МВ·А. К подстанции электросталеплавильного цеха подают ток напряжением до 110 кВ.

Высоким напряжением питаются первичные обмотки печных трансфор

маторов. На рис. 79 показана упрощенная схема электрического питания печи. В электрическое оборудование дуговой печи входят следующие приборы

1. Воздушный разъединитель, предназначен для отключения всей электропечной установки от линии высокого напряжения во время производства ремонтных работ на печи

2. Главный автоматический выключатель, служит для отключения под нагрузкой электрической цепи, по которой протекает ток высокого напряжения. При неплотной укладке шихты в печи в начале плавки, когда шихта еще холодная, дуги горят неустойчиво, происходят обвалы шихты и возникают короткие замыкания между электродами. При этом сила тока резко возрастает. Это приводит к большим перегрузкам трансформатора, который может выйти из строя. Когда сила тока превысит установленный предел, выключатель автоматически отключает установку, для чего имеется реле максимальной силы тока.

3. Печной трансформатор необходим для преобразования высокого напряжения в низкое (с 6—10 кВ до 100—800 В). Обмотки высокого и низкого напряжения и магнитопроводы, на которых они помещены, располагаются в баке с маслом, служащим для охлаждения обмоток. Охлаждение создается принудительным перекачиванием масла из трансформаторного кожуха в бак теплообменника, в котором масло охлаждается водой. Трансформатор устанавливают рядом с электропечью в специальном помещении. Он имеет устройство, позволяющее переключать обмотки по ступеням и таким образом ступенчато регулировать подаваемое в печь напряжение. Так, например, трансформатор для 200-т отечественной печи мощностью 65 МВ-А имеет 23 ступени напряжения, которые переключаются под нагрузкой, без отключения печи. На рис. 80 представлена схема подачи электроэнергии к дуговой печи. Участок электрической сети от трансформатора до электродов называется короткой сетью. Выходящие из стены трансформаторной подстанции фидеры при помощи гибких, водоохлаждаемых кабелей подают напряжение на электрододержатель. Длина гибкого участка должна позволять производить нужный наклон печи и отворачивать свод для загрузки. Гибкие кабели соединяются с медными водоохлаждаемыми шинами, установленными на рукавах электрододержателей. Трубошины непосредственно присоединены к головке электрододержателя, зажимающей электрод. Помимо указанных основных узлов электрической сети в нее входит различная измерительная аппаратура, подсоединяемая к линиям тока через трансформаторы тока или напряжения, а также приборы автоматического регулирования процесса плавки.

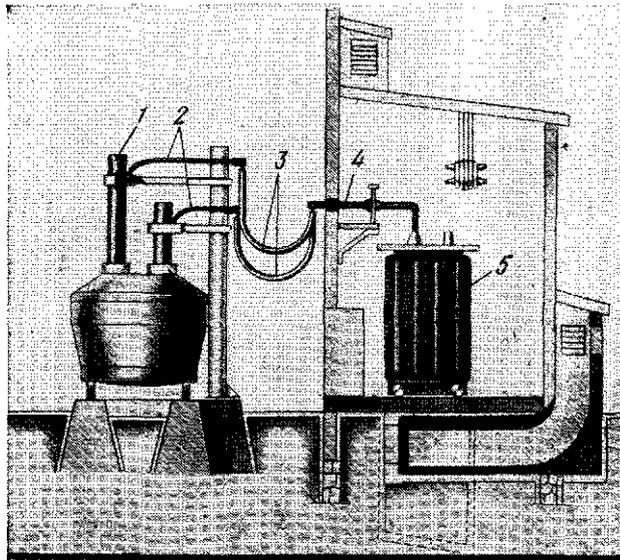


Рис. 80. Схема короткой сети электродуговой печи:

1 — электроды; 2 — жесткие трубошины; 3 — гибкие электро- подводы; 4 — фидер; 5 — печной трансформатор

Автоматическое регулирование

По ходу плавки в электродуговую печь требуется подавать различное количество энергии. Менять подачу мощности можно изменением напряжения или силы тока дуги. Регулирование напряжения производится переключением обмоток трансформатора. Регулирование силы тока осуществляется изменением расстояния между электродом и шихтой путем подъема или опускания электродов. При этом напряжение дуги не изменяется. Опускание или подъем электродов производятся автоматически при помощи автоматических регуляторов, установленных на каждой фазе печи. В современных печах заданная программа электрического режима может быть установлена на весь период плавки.

Устройство для электромагнитного перемешивания металла

Для перемешивания металла в крупных дуговых печах, для ускорения и облегчения проведения технологических операций скачивания шлака под днищем печи в коробке устанавливается электрическая обмотка, которая охлаждается водой или сжатым воздухом. Обмотки статора питаются от двухфазного генератора током низкой частоты, что создает бегущее магнитное поле, которое захватывает ванну жидкого металла и вызывает движение нижних слоев металла вдоль подины печи в направлении движения поля. Верхние слои металла вместе с прилегающим к нему шлаком движутся в обратную сторону. Таким образом можно направить движение либо в сторону рабочего окна, что будет облегчать выход шлака из печи, либо в сторону сливного отверстия, что будет благоприятствовать равномерному распределению легирующих и раскислителей и усреднению состава металла и его температуры. Этот метод в последнее время "имеет ограниченное

применение, так как в сверхмощных печах металл активно перемешивается дугами.

Вопросы для самоконтроля.

1. Какие электроды используют в малых электропечах?
2. Какие электроды используют в крупных электропечах?
3. Из каких материалов изготавливают графитированные электроды?
4. Как происходит опускание или подъем электродов?
5. Как происходит регулирование напряжения?
6. По ходу плавки в электродуговую печь требуется подавать какое количество энергии.
7. Для перемешивания металла в крупных дуговых печах, для ускорения и облегчения проведения технологических операций скачивания шлака под днищем печи в коробке устанавливается что и для чего?
8. От чего питается обмотка статора?
9. Как верхние слои металла вместе с прилегающим к нему шлаком движутся?
10. Электродную массу смешивают и прессуют, а что происходит дальше?
11. Что происходит с электродами в процессе эксплуатации в результате окисления печными газами и распыления при горении дуги?
12. Что необходимо сделать по мере укорачивания электрода?
13. Наступает момент, когда электрод становится настолько коротким, что не может поддерживать дугу, что необходимо сделать?
14. Стойкость стен и свода основной дуговой печи значительно ниже стойкости подины и зависит от таких факторов, перечислите их..?
15. Откос у сливного отверстия поддерживают каким, чтобы обеспечить полное удаление жидких металла и шлака в ковш?
16. Расскажите об откосе у рабочего окна, каким должен быть ?
17. Для чего иметь откоса 45-60° в сторону подины?
18. Для чего производят подварку подины?
19. Какими материалами выполняют подварку поврежденных мест на подине и откосах?
20. Почему заправку футеровки слоями магнезита и магнезито-доломитовой смеси выполняют быстро?
21. Почему при выплавке высокохромистой стали с применением кислорода наблюдается зарастание ванны печи шлаком?
22. Как устранить зарастание футеровки?
23. Зачем на откосы печи периодически забрасывают кварцевый песок?
24. Какие вредные газообразные вещества в газах, выбрасываются из электросталеплавильной печи?

Использованная литература:

<https://metallurgy.zp.ua/povyshenie-stojkosti-futеровki-dugovoj-pechi/>