

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СВЕРХМОЩНЫХ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

Основной элемент конструкции современной дуговой сталеплавильной печи – ванна, установленная на наклоняющейся платформе механизма наклона печи. Печь наклоняется в сторону рабочего окна на $10...15^\circ$ для скачивания шлака и на $25...45^\circ$ в сторону сливного отверстия для слива металла. Сверху ванна закрыта сводом. В своде имеются отверстия для опускания в рабочее пространство трех электродов. Основной несущей конструкцией для удержания электрода является рукав электрододержателя, зафиксированный на стойке, способной вертикально перемещаться в двух поясах направляющих роликов под действием привода перемещения электрода. Несущей конструкцией механизмов перемещения электродов служит портал, опирающийся на тумбу наклоняющейся платформы. Удерживает электрод, обеспечивая надежный электрический контакт, механизм зажима электрода. Для открывания ванны печи при загрузке шихты предназначен механизм подъема и поворота свода.

Общий вид современной дуговой сталеплавильной печи емкостью 125 т показан на рис.1 и 2.

1. Футеровка печи

Увеличение мощности печи приводит к значительному износу керамической футеровки, росту частоты и стоимости капитальных ремонтов, что снижает производительность агрегата и повышает себестоимость выплавленной стали. Эффективная реализация идеи сверхмощных печей возможна лишь при замене керамической футеровки водоохлаждаемыми панелями. При внедрении водоохлаждаемой футеровки возникает ряд проблем, главная из которых – обеспечение взрывобезопасности печей. Ее решение достигается отсутствием контакта водоохлаждаемых элементов с расплавленными металлом и шлаком при плавке и сливе и созданием эффективной системы охлаждения, способной снять значительные тепловые нагрузки. Поэтому футеровка стен комбинированная (рис.3).

Нижняя ее часть (откосы), объединенная с подиной, футерована хромагнетитовыми или периклазовыми кирпичами [1]. Ее высота на 380...600 мм превышает уровень шлака, а при приближении к рабочему окну и сливному носку – еще выше. Среднюю и верхнюю части стен покрывают панелями с водяным охлаждением. В результате водоохлаждаемыми панелями заменяют до 65...85 % площади боковой поверхности стен печей.

Применяемые панели можно разделить на два вида: кессонные и трубчатые [2]. На поверхности панелей привариваются штыри или пластины (ребра), на которых удерживается гарнисаж, образуемый брызгами металла и шлака или создаваемый искусственно с помощью обмазки. Толщина гарнисажа составляет несколько миллиметров и имеет важное значение для снижения тепловых потерь. Ширину и высоту ребер выбирают примерно равными

удвоенной равновесной толщине гарнисажной корочки и располагают их с шагом, равным удвоенной высоте.

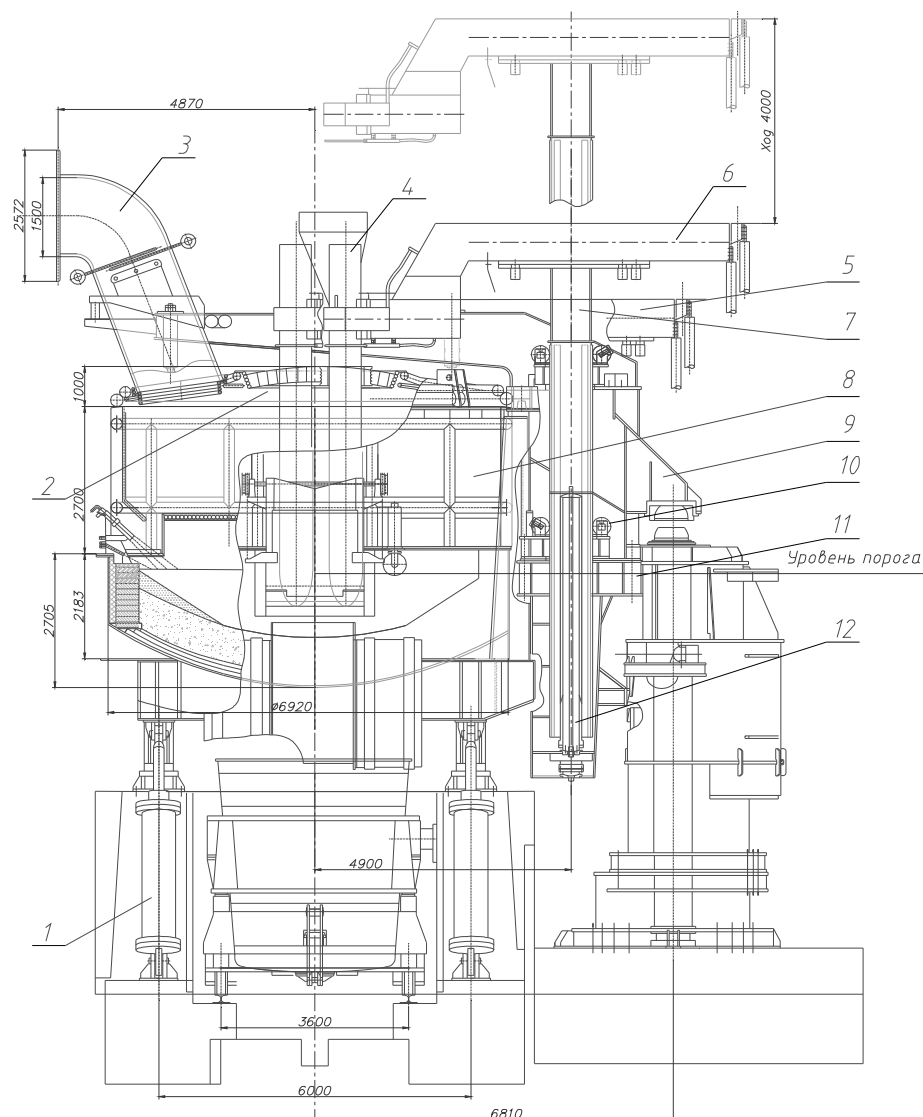


Рис.1. Дуговая сталеплавильная электропечь емкостью 125 т,
главный вид:

1 – монтаж механический приводов платформы наклоняющейся; 2 – свод водоохлаждаемый; 3 – патрубок газоотсоса; 4 – электрод; 5 – электрододержатель крайний; 6 – электрододержатель средний; 7 – стойка электрододержателя; 8 – кожух; 9 – портал; 10 – ролики направляющие; 11 – подвеска портала; 12 – цилиндр перемещения электродов

Панели кессонного типа имеют сварную конструкцию из листовой стали толщиной 20...25 мм с внутренними перегородками для направленной циркуляции воды.

Трубчатые панели собираются из близко расположенных толстостенных труб, по которым проходит вода (рис.4). Для изготовления трубчатых панелей используются стальные трубы диаметром 70...90, с толщиной стенки 14...16 мм. Обычно на стенах печи устанавливают 9...16 панелей. При этом объем рабочего пространства увеличивается на 10...30 %.

В последние годы для наиболее напряженных нижних участков стен – против дуг и ниже (на высоте 350...500 мм), применяются медные панели.

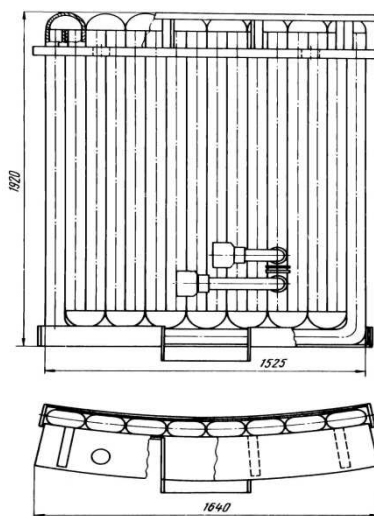


Рис.4. Водоохлаждаемая стеновая трубчатая панель

Поверхностная плотность тепловых потоков, падающих на панели, достигает 70...120 кВт/м². Это предъявляет жесткие требования как к конструкции панелей, так и к эффективности системы водяного охлаждения. Последняя работает с расходами воды 6...11 м³/ч на 1 м² площади стенового элемента при скорости ее истечения 2...6 м/с и рабочей температуре на выходе не более 65 °С. Давление воды в панели составляет 0,3...0,4 МПа с потерей напора в системе охлаждения 0,1...0,15 МПа.

Применение водоохлаждаемых стен привело к необходимости изменения конструкции кожуха печи. В настоящее время чаще всего используется корпус каркасного типа. Верхнее кольцо жесткости одновременно играет роль водяного коллектора. Оно соединено с нижним кольцом жесткости трубами или коробчатой конструкцией.

Стойкость панелей кессонного или трубчатого исполнения составляет 1500...6000 плавок, а в отдельных случаях может быть доведена до 8000...9000. Применение трубчатых панелей предпочтительнее, так как в них легче организовать высокую скорость прохождения воды и они более приспособлены для использования повышенного давления в системе охлаждения. А это в свою очередь позволяет получить на выходе более высокую температуру воды (до 120...240 °С), что увеличивает возможность ее полезного использования в качестве вторичного энергоресурса. При этом, однако, необходимо производить химическую очистку воды.

На дуговых печах с водоохлаждаемыми стенами и сводом появляется возможность увеличить среднюю мощность и работать на более длинных дугах при пониженных значениях тока. При этом время плавки сокращается примерно на 10 %, а следовательно, сокращаются и потери тепла. Кроме того, растет электрический КПД, и снижаются электрические потери во вторичном токоподводе. Однако значительно (в несколько раз) возрастают потери тепла через стены печи, особенно на печах малой емкости. В то же время средняя температура поверхности панелей существенно ниже температуры керамической футеровки. Это вызывает снижение температуры отходящих газов и потерь тепла с газами, что в значительной степени компенсирует увеличение тепловых потерь через водоохлаждаемую футеровку и снижает требования к системам газоотсоса и их стоимость. В связи с этим на крупных печах не наблюдается повышения удельного расхода электроэнергии. Высокая стойкость водоохлаждаемых стен дополнительно способствует повышению годовой производительности печей и снижает себестоимость полученной стали.

Указанные факторы определяют высокую экономическую эффективность использования на высокомоощных печах водоохлаждаемых стеновых панелей.

На современных печах охлаждением панелей управляют микропроцессорные системы, являющиеся частью АСУ ТП. Для получения необходимой информации каждая панель снабжена датчиком расхода и температуры воды на выходе. О температуре воды на входе в панель судят по температуре воды коллектора.

2. Водоохлаждаемый свод

Внедрение сверхмощных печей поставило задачи повышения стойкости сводов. Эта проблема решается введением в конструкцию свода водоохлаждаемых элементов.

На начальном этапе применялись полностью водоохлаждаемые металлические своды плоской конфигурации. Однако при эксплуатации печей выявились их серьезные недостатки. Дуговые разряды и наводки тока приводили к нарушению целостности свода и появлению течи воды, особенно в его центральной части.

Современные сверхмощные печи работают с комбинированными куполообразными сводами разнообразных конструкций [2]. Комбинированный свод (рис. 5) состоит из трех основных элементов: водоохлаждаемого каркаса, представляющего собой два концентрически расположенных кольца, соединенных радиальными пилонами; съемных водоохлаждаемых панелей с индивидуальной подачей воды, подвешенных к каркасу; центральной керамической части свода, набираемой в собственном опорном кольце.

Число сводовых панелей колеблется от 9 до 16. Они могут быть как кессонными, так и трубчатыми. Сверху на них кладутся съемные плиты, которые служат рабочей площадкой во время обслуживания свода. Нижняя часть панелей снабжается шипами для удержания огнеупорной набивки, которая в процессе эксплуатации печи обычно дополнительно покрывается шлаковым гарнисажем. На таких сводах площадь водоохлаждения составляет 75...80 %.

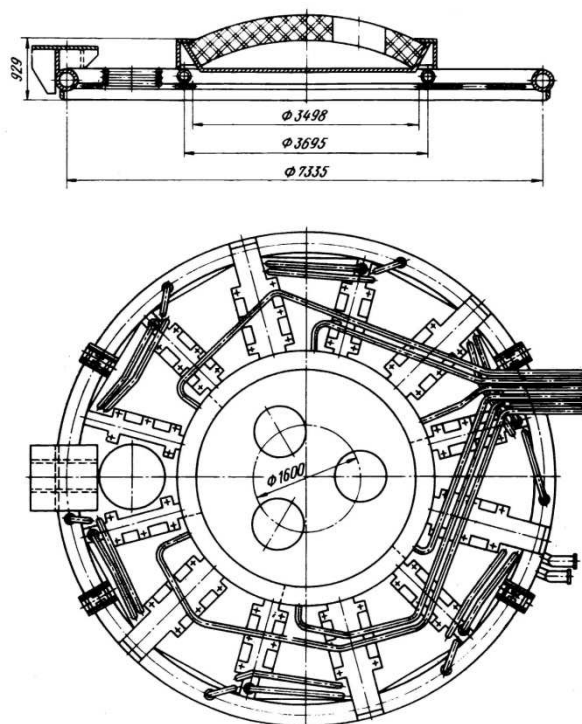


Рис.5. Комбинированный водоохлаждаемый свод

3. Размеры плавильного пространства

Для достижения производительной и экономичной работы дуговой печи необходимо придать ее плавильному пространству рациональные пропорции и форму.

Геометрические размеры рабочего пространства ДСП определяются с учетом требований технологии и теплообменных процессов.

При установлении геометрии рабочего пространства ДСП выбирают форму и соотношение основных размеров ванны, высоту положения свода над жидким металлом, диаметр распада электродов, внутренний профиль кладки и конфигурацию кожуха.

От соотношения между диаметром ванны и ее полной глубиной зависят габариты и масса печи, а также величина теплоотдающей поверхности и удельный расход электроэнергии.

Вопросу определения геометрии печного пространства всегда уделялось большое внимание. Были созданы различные методики расчета, которыми пользуются и сейчас, но с внесением необходимых изменений. Так, существует методика, созданная А.Н. Соколовым [3], в которой подробно рассмотрен вопрос определения размеров круглой сфероконической ванны с углом откосов, равным 45° .

Результаты расчета по этой методике для печей емкостью 125 и 100 т приведены в табл. 1.

Этот метод был разработан в 1963 году. С тех пор произошли значительные изменения в электротехнологии дуговой печи, например, стали применяться подины, отличающиеся по форме и размерам от прежних.

Таблица 1

**Результаты расчета параметров ванны ДСП емкостью 100 и 125 т
по методике [2]**

Емкость печи, т	Глубина ванны $H_{в}$, мм	Диаметр ванны $D_{в}$, мм	Высота сферического сегмента $H_{сф}$, мм	Высота конического сегмента $H_{кон}$, мм	Диаметр распада электродов $D_{рз}$, мм
100	1040	5890	208	832	1840
125	1100	6370	220	880	1990

Приведем сравнительные данные параметров плавильной ванны для печей емкостью 100 т различного исполнения, имеющихся на заводе «Сибэлектротерм» (табл. 2) [4].

Таблица 2

Параметры плавильной ванны ДСП-100 различного исполнения

Печь	$H_{в}$, мм	$D_{в}$, мм	$H_{сф}$, мм	$H_{кон}$, мм	$D_{рз}$, мм
ДСП-100И6	1365	5400	415	950	1300
ДСП-100И7	1365	6030	300	1065	1300
ДСП-100И8	1200	6580	350	850	1300
ДСП-100БМЗ	1320	5150	150	1170	1400
ДСП-100(125)	1177	6032	250	927	1300

Примечание. Условные обозначения – см. табл. 1.

Сравнивая параметры плавильного пространства современных печей с данными, полученными расчетным путем, можно сделать вывод, что методика [3] устарела.

Применение в качестве шихты для плавки стали легковесного амортизационного лома привело к заметному увеличению объема рабочего пространства сверхмощных печей с целью уменьшения числа подвалок шихты. Это достигается в результате увеличения диаметра и особенно высоты рабочего пространства. Но это же в свою очередь приводит к увеличению площади стен и свода и, следовательно, к возрастанию площади водоохлаждаемых панелей, увеличению тепловых потерь и расхода электроэнергии. При увеличении высоты рабочего пространства печи возрастают длина части электрода, находящейся внутри печи, суммарная площадь поверхности электродов, подверженная окислению, и расход электродов вследствие окисления боковой поверхности. В таком случае возрастает и вероятность поломок электродов, поэтому не может быть однозначных решений по выбору размеров рабочего пространства печи.

Для крупных отечественных печей обычной мощности отношение диаметра ванны D_v к ее глубине H_v приближалось к 5 [5]. Для действующих печей это отношение колеблется от 4,2 до 5, а глубина ванны составляет 1100...1200 мм. Для современных сверхмощных печей глубина ванны больше, а отношение $D_v/H_v < 4$. Так, глубина ванны ДСП-100БМЗ равна 1320 мм, а $D_v/H_v = 3,9$. Такое изменение размеров ванны приводит к резкому уменьшению ее удельной поверхности (печь ДСП-100И6 – 0,23 м²/т, ДСП-100БМЗ – 0,2 м²/т) и поверхности контакта шлак–металл. Уменьшение удельной поверхности ванны закономерно, так как процессы десульфурации и раскисления металла вынесены за пределы печи, а процесс дефосфорации металла облегчается благодаря значительному увеличению поверхности контакта металл–шлак при интенсивном кипении ванны вследствие окисления углерода. Выбор глубины ванны лимитируется лишь возможностью нагрева металла дугами. Если совмещать основной нагрев металла с процессом окисления углерода, как этого требует современная технология электроплавки, то равномерному нагреву ванны способствует хорошее перемешивание металла всплывающими пузырями оксида углерода СО.

Как известно, типичной формой круглой ванны является сфероконическая (СК), с углом откосов 45°. Ее рациональные пропорции и размеры в зависимости от емкости печи были определены на основе промышленного опыта и исследований теплообменных процессов в расплаве на физических моделях. При этом исходили из необходимости эффективного теплообмена в расплаве и проведения химических реакций, требуемых по двухшлаковой технологии. В связи с этим необходимо было поддерживать удельную поверхность зеркала ванны не менее 0,3 м²/т и отношение диаметра зеркала к глубине ванны D_v/H_v на уровне 5...5,5. При такой геометрии улучшался нагрев ванны и обеспечивался требуемый уровень десульфурации и дефосфорации.

Внедрение одношлаковой технологии сделало эти ограничения неактуальными, так как дефосфорацию проводят в период плавления в условиях перемешивания ванны пузырями СО при частичном удалении углерода, а процессы десульфурации и раскисления выведены в агрегат внепечной обработки стали. Поэтому для химических реакций в печи не требуется прежней величины контакта металл–шлак, а интенсивное кипение ванны при окислении углерода уменьшает температурный перепад в ванне и позволяет увеличить ее глубину [6].

Диаметр распада электродов в современных печах значительно снижен. К его определению можно подходить только экспериментальным путем. Это очень важный параметр, так как это диаметр окружности, на которой располагаются оси электродов. Он должен быть достаточным для того, чтобы внутри него разместились электрододержатели без риска соприкосновения при движении. Если диаметр большой, то возрастает строительная прочность центральной части свода, усиливается нагрев стали и шлака на откосах печи, легче разместить электрододержатели, но ухудшается нагрев центральной части поверхности ванны и возрастает неравномерность нагрева внутренней поверхности стен печи. Уменьшение диаметра распада элект-

трода приводит к уменьшению индуктивного сопротивления вторичного токоподвода и уменьшению тепловой нагрузки на стены и большей ее равномерности. Но надо всегда помнить, что уменьшать до бесконечности нельзя. На печах обычной мощности емкостью 100 т этот параметр достигал в среднем 1800 мм, на современных агрегатах он составляет 1200...1400 мм.

Так же диаметр распада электродов влияет на такой весьма важный показатель, как шаровой сегмент, от которого во многом зависит срок службы подины. Если величина диаметра выбрана правильно, то кладка центральной части пода в меньшей степени подвержена эрозии от теплового воздействия дуг и потоков металла. Таким образом, при выборе геометрии шарового сегмента следует учитывать емкость печи и взаимное расположение футеровки и электрических дуг [7].

В связи с технологическими изменениями в практике стали появляться круглые ванны цилиндросфероконической (ЦСК) формы с углом откосов 55...60°. Ранее упомянутая сфероконическая ванна (СК) и ванна ЦСК с обозначением определяющих размеров показаны на рис.6.

Для совершенствования существующих методик В.В. Афанасьев в статье журнала «Электromеталлургия» [7] описывает проведенные исследования геометрических параметров плавильного пространства дуговых печей с использованием метода корреляционно-регрессионного анализа. На основании полученных данных были выведены следующие зависимости:

$$\text{для ванны ЦСК:} \quad D_{\text{в}} = 780 \cdot M_{\text{п}}^{0,401},$$

$$H_{\text{в}} = 169 \cdot M_{\text{п}}^{0,411},$$

$$\text{для ванны СК:} \quad D_{\text{в}} = 1106 \cdot M_{\text{п}}^{0,338},$$

$$H_{\text{в}} = 165,8 \cdot M_{\text{п}}^{0,422},$$

где $M_{\text{п}}$ – масса плавки, кг.

Глубина и радиус шарового сегмента (сферической части ванны):

$$h_{\text{сф}} = 40,457 \cdot M_{\text{п}}^{0,348},$$

$$r_{\text{сф}} = 468,81 \cdot M_{\text{п}}^{0,255}.$$

Диаметр распада электродов:

$$D_{\text{р}} = \frac{h_{\text{сф}}}{0,156},$$

Обычно дополнительной характеристикой геометрии ванны является величина удельной поверхности зеркала $f_{\text{к}}$:

$$\text{для ванны ЦСК:} \quad f_{\text{к}} = 0,452 \cdot M^{-0,184},$$

$$\text{для ванны СК:} \quad f_{\text{к}} = 1,131 \cdot M^{-0,357},$$

где M – масса металла ванны, равная сумме массы плавки и массы жидкого остатка.

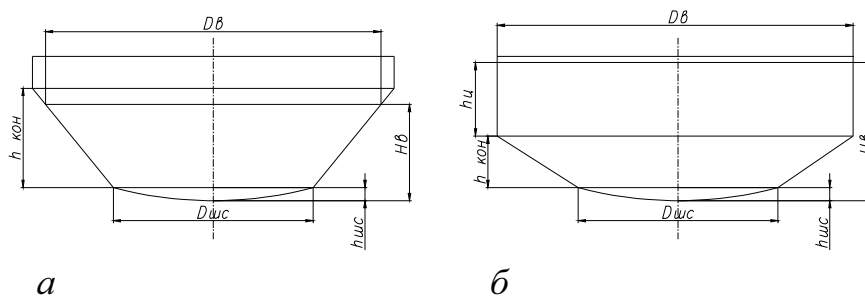


Рис.6. Схемы круглых ванн дуговых электропечей:

а – ванна СК; б – ванна ЦСК

Расчет параметров по [7] представлен в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов параметров ванн ДСП по [7]

Емкость печи, т	H_v , мм	D_v , мм	$H_{сф}$, мм	$D_{рз}$, мм	f_k
100(ЦСК)	1120	4950	190	1200	0,19
125(ЦСК)	1229	5407	200	1300	0,182
100(СК)	1158	5245	190	1200	0,211
125(СК)	1276	5656	200	1300	0,194

Примечание. Условные обозначения – см. табл. 1.

Проанализировав данные, можно прийти к выводу, что ванны ЦСК по сравнению с ваннами СК имеют меньший диаметр, меньшую величину удельной поверхности зеркала и немного меньшую высоту ванны за счет того, что ванны ЦСК имеют угол откосов $55...60^\circ$.

Эскиз плавильного пространства ДСП емкостью 125 т представлен на рис.7.

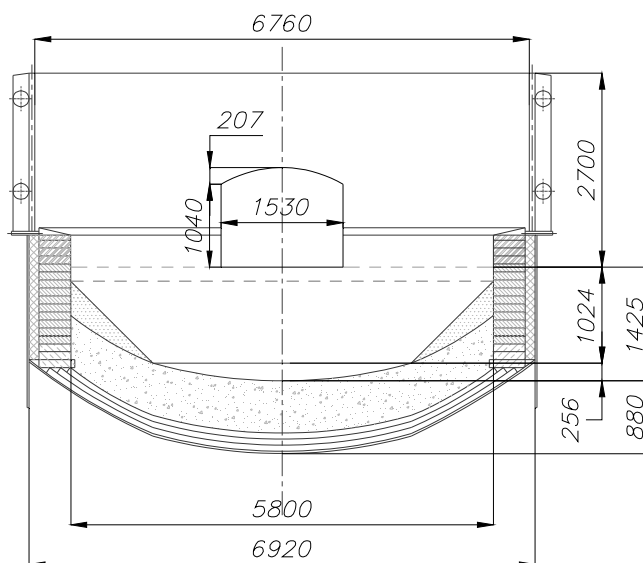


Рис.7. Эскиз плавильного пространства ДСП емкостью 125 т

4. Схема выпуска металла

Первые сверхмощные электропечи с кирпичной футеровкой стен имели традиционную схему выпуска: через сливной носок при наклоне печи на 45° (рис.8, *а*) [5], хотя изменившаяся в соответствии с концепцией сверхмощной печи технология плавки не требовала и не предусматривала обработки металла шлаком во время выпуска, а затем, с развитием внепечной обработки стали, потребовала обязательной отсечки шлака от металла. Традиционная схема выпуска ограничивает размер площади водяного охлаждения стен и требует большего расхода высококачественного огнеупорного кирпича, так как в целях безопасности над выпускным отверстием водоохлаждаемые панели приходится располагать значительно выше, чем в остальной части печи. Печи с так называемым сифонным выпуском (рис.8, *б*) – своего рода приложение классической схемы выпуска к сверхмощной печи и новой технологии плавки. Сифонный выпуск позволяет полностью решить проблему выпуска металла из печи без шлака, оставления шлака в печи и работы сверхмощной печи на «болоте», однако не дает существенного выигрыша в смысле упрощения конструкции печной установки и увеличения площади водоохлаждаемых панелей (такие печи установлены на ОЭМК и БМЗ).

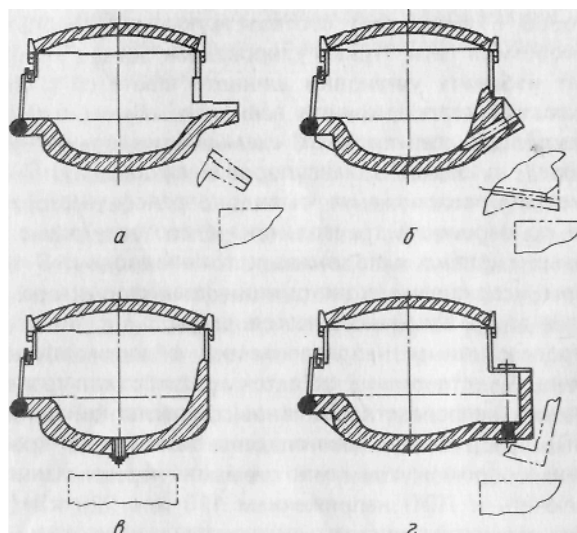


Рис.8. Схема выпуска металла:

а – традиционная технология; *б* – сифонный выпуск;
в – донный выпуск; *г* – эркерный выпуск

Для увеличения площади поверхности футеровки, занимаемой водоохлаждаемыми панелями, разработана конструкция дуговой сталеплавильной печи с донным выпуском металла (рис.8, *в*). Такая конструкция позволяет увеличить площадь водяного охлаждения стен от 70 до 85 %. Наклон печи с донным выпуском осуществляют лишь в случае необходимости скачивания шлака на угол до 12° . Это позволяет заметно упростить конструкцию механического оборудования печи, уменьшить длину короткой сети печи. Отверстие в днище печи оформлено при помощи магнезитовой трубы. После полного опорожнения печи перед загрузкой шихты выпускное отверстие закры-

вается запирающим пневматическим клапаном, расположенным под днищем печи, и заполняется специальным огнеупорным порошком. Перед выпуском плавки клапан открывается, и расплавленная сталь прорывается через спекшийся порошок в верхней части выпускного отверстия. Стойкость магниевой трубы – примерно 100 плавов. Кроме снижения расхода стеновых огнеупоров достоинствами такой печи являются быстрый выпуск плавки, снижение тепловых потерь печи в это время, уменьшение насыщения металла газами (азотом) во время выпуска, некоторое уменьшение электрических потерь в короткой сети, снижение износа футеровки разливочного ковша. Недостатки такой печи – в невозможности отсекал шлак и оставлять его в печи, а также использовать очень выгодный режим работы с оставлением части металла в печи на следующую плавку. Налицо и сложность обслуживания выпускного отверстия печи.

В связи с отмеченными недостатками печи с донным выпуском не получили широкого распространения, хотя и применяются на зарубежных заводах.

Для устранения отмеченных недостатков постепенно выпускное отверстие было перенесено из центра подины в специальный выступ (эркер), расположенный в области заднего откоса печи. Уровень выпускного отверстия стал несколько выше уровня подины печи (см. рис.8, з). Такую конструкцию в зарубежной литературе называют печью с эксцентричным, или эркерным, выпуском.

Как показала практика использования печей с эркерным выпуском, вынесение выпускного отверстия за кожух печи (в эркер) облегчает ее обслуживание. Наклон печи при выпуске уменьшается до $10...12^\circ$, что позволяет снизить уровень водоохлаждаемых панелей по задней стенке от обычных 400...500 до 250...350 мм с увеличением площади этих панелей по задней стенке от 59 до 84 %, а в целом по печи до 84...89 %. Выпуск стали через донное отверстие в эркере и наличие отдельного шлаковывпускного отверстия позволяют выпускать сталь практически без шлака, а при необходимости оставлять часть металла в печи. Вследствие того, что при выпуске струя металла компактная (не расширяется) и короткая, понижение его температуры составляет лишь $20...35^\circ\text{C}$, что приводит к экономии энергии $15...30\text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ при ее расходе $510...530\text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$.

Эркерный выпуск осуществляется следующим образом. Ковш с необходимыми присадками на дне помещают перед выпуском под печь. Затем открывают запорное устройство (рис.9) и выпускают плавку. Во время выпуска (длительностью 2 мин для крупной печи) печь слегка наклоняют в сторону ковша, чтобы обеспечить постоянный уровень металла над выпускным отверстием. Наклон печи автоматически блокируется при достижении требуемого максимального угла наклона 10° . Когда в ковше оказывается необходимое количество металла, печь возвращается в исходное положение, выпускное отверстие при этом остается открытым. Сверху, с рабочей площадки печи, отверстие промывают струей кислорода. Оставшийся в отверстии застывший металл удаляют снизу. Для этого под печью смонтирована убирающаяся рабочая площадка, которая позволяет осматривать и обслуживать

выпускное отверстие. Управление запирающим устройством осуществляется с пульта, расположенного внизу под печью. С этого же пульта управляют наклоном печи, присадкой добавок в ковш и движением сталевоза. После обслуживания отверстия затвор закрывают и сверху в отверстие засыпают огнеупорную смесь. Операция обслуживания выпускного отверстия продолжается не более 3 мин.

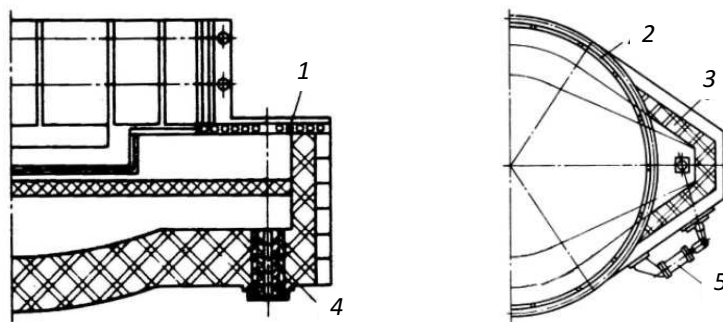


Рис.9. Эркер дуговой печи:

- 1 – сводик эркера; 2 – стеновые панели; 3 – футеровка эркера;
4 – выпускное отверстие эркера; 5 – привод запорного устройства

Срок службы внутренней кладки отверстия составляет 200 плавов, срок службы графитовых колец, установленных непосредственно на выпуске, в нижней части отверстия, – 20...30 плавов. Срок службы колец увеличивается, если они изготовлены из смеси магнезита с графитом. Замена футеровки отверстия проводится в течение 2 ч, замена колец на выходе – в течение 20...30 мин. Полное опорожнение печи с эркерным выпуском для осмотра и заправки подины осуществляется один раз в неделю.

Если учесть, что в большинстве случаев печь с эркерным выпуском выгоднее других конструкций, такая печь перспективна для новых отечественных электросталеплавильных цехов. Перевод одной из двух печей БМЗ с сифонного на эркерный выпуск стали улучшил показатели работы.

5. Конструктивные решения элементов токоподвода

5.1. Кабельные гирлянды

Вторичный токоподвод сверхмощной дуговой печи выполняется из обычного набора элементов – шины или трубошины, подсоединяемые к выводам низкого напряжения трансформатора, гибкие кабели и трубошины, располагаемые на рукаве электрододержателя. Наибольшая доля индуктивного сопротивления приходится на гибкие кабели. При токах, достигающих десятки килоампер, растет как сечение, так и число параллельно работающих кабелей.

Выбор рационального сечения и количества кабелей в гирлянде определяется рядом обстоятельств [5]. Уменьшение числа параллельных проводников в кабельной гирлянде одной фазы положительно влияет на распределение тока между ними. Поэтому на современных сверхмощных печах гирлянды обычно выполняются из небольшого количества массивных водоохлаждае-

мых кабелей (не более 4 штук на линейный ток печи) при соответствующем увеличении их сечения. Однако увеличение сечения кабеля связано с изменением его механических характеристик (масса, жесткость), что вызывает существенное усиление электромеханических колебаний кабельных гирлянд под действием электродинамических сил. А это в свою очередь сказывается на вибрации рукавов электрододержателей и электродов, на флуктуации токов и в результате – на колебании напряжения в энергосистеме.

Применяемые на печах малой и средней мощности для крепления кабелей в гирлянде фланцы позволяют добиться стабильности геометрии расположения кабелей в гирлянде одной фазы, но увеличение жесткости гирлянды приводит к увеличению интенсивности раскачивания гирлянд других фаз под действием электродинамических сил. Поэтому конструкция кабеля для сверхмощных печей претерпела изменения (рис.10).

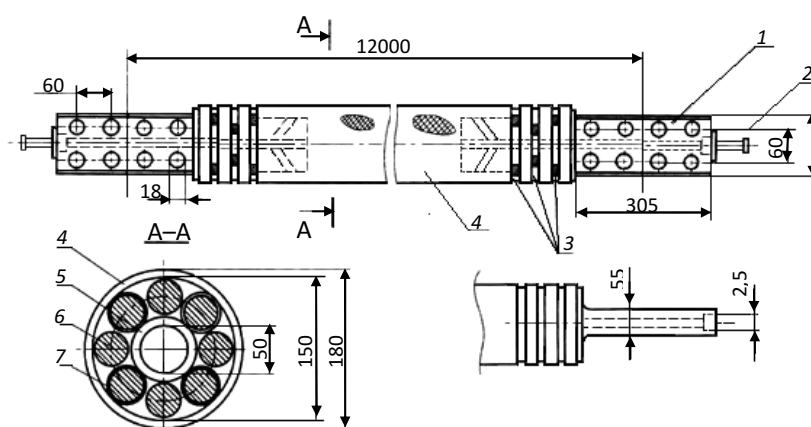


Рис.10. Кабель КСВ ДСП-4000 [8]:

1 – наконечник медный; 2 – штуцер подвода холодной воды; 3 – хомуты; 4 – защитный резиновый рукав; 5 – опорный сердечник; 6 – жила медная гибкая; 7 – трубка перфорированная

Уменьшения длины и индуктивного сопротивления кабельной гирлянды достигают сдвигом трансформатора в сторону сливного носка на 1...1,5 м и, что особенно эффективно, применением донного выпуска металла.

Для уменьшения жесткости кабеля центральную пружину из нержавеющей стали (в кабелях марки КВС) заменили гибким резиновым сердечником. Кроме того, зарубежными фирмами разработаны различные варианты для повышения износостойкости рукавов. Фирма ERIGO (Франция) предлагает нанесение на рукава специального защитного покрытия. На печах фирмы DEMAG используются кабели с бамперами. Бамперы изготавливаются из резины и надеваются на кабель равномерно, через промежутки, не превышающие их ширины.

5.2. Электроды

Современные дуговые сталеплавильные печи работают преимущественно на графитированных электродах, ежегодное мировое производство которых превышает 1 млн т. Расход электродного графита в процессе электроплавки стали определяется качеством электрода и условиями работы ду-

говой печи. Снижению расхода электродов способствуют уменьшение их пористости, повышение плотности, снижение содержания золы в электродной массе, удельного электрического сопротивления, увеличение предела прочности электродов.

Печи, снабженные трансформаторами обычной мощности, работают на сравнительно небольших токах, до 45 кА, что позволяет использовать весьма недорогие электроды обычного качества. Дуговые печи сверхвысокой мощности работают на очень больших токах, до 100 кА. Для таких печей применяют специальные высококачественные графитированные электроды, обладающие низким электрическим сопротивлением, более плотные и прочные, способные выдерживать высокие токовые нагрузки и значительные механические усилия, возникающие при работе трансформатора сверхмощной печи, и менее подверженные поломкам. Специальные электроды должны обеспечить допустимую плотность тока 25 А/см^2 .

Технология производства высококачественных электродов для сверхмощных дуговых печей достаточно сложна. Необходимые свойства электродов получают при использовании дорогих высококачественных малозольных шихтовых материалов (главным образом игольчатого нефтяного кокса), мощного прессового оборудования, пропитки заготовок электродов пековыми связующими, при специальной длительной и сложной высокотемпературной обработке (операция графитизации). Высокая стоимость шихтовых материалов и большой расход электроэнергии определяют очень высокую стоимость специальных графитированных электродов для сверхмощных печей (1500...2000 долларов США за 1 т).

В связи с этим в настоящее время затраты на электроды при работе печей обычной мощности для выплавки углеродистых сталей составляют 8 % себестоимости продукции, а при работе сверхмощных печей такие затраты могут превышать 15 % себестоимости стали. Для улучшения технико-экономических показателей производства металла большое значение имеют мероприятия по снижению расхода электродов на плавку. Расход электродов зависит не только от их качества, но и от конструкции печи, технологических и режимных факторов плавки, температуры и характера атмосферы печи, качества применяемого лома, марки выплавляемой стали, применения топливно-кислородных горелок и т. д.

Суммарный расход электродов на плавку в электросталеплавильном производстве обычно определяют по трем статьям:

- 1) расход рабочих концов электрода или эрозия торцов электродов (испарение графита в зоне горения дуги и растворение графита в шлаке);
- 2) расход боковой электродной поверхности (окисление графита с боковой поверхности электродов);
- 3) промежуточный расход электродов (потери в виде неиспользуемых огарков и вследствие поломок электродов).

В хорошо работающей сверхмощной сталеплавильной печи общий расход электродов составляет 1,9 кг/т стали [9], при этом расход рабочих концов достигает почти 50 %, окисление с боковой поверхности – 40 и промежуточный расход составляет 10 % общего расхода. При работе печей малой

мощности статьи расхода электродов несколько иные: расход рабочих концов – 30 %, окисление с боковой поверхности – до 60 % общего расхода электродов.

Расход электродов в результате окисления с поверхности зависит от общей площади их поверхности, подверженной воздействию печных газов, от химического состава и скорости перемещения газов относительно электродов, от температуры поверхности электродов, общей длительности плавки, степени герметизации печи. В общем случае расход электродов в результате окисления с поверхности может быть снижен при повышении качества электродов, рациональной организации и технологии плавки, уменьшении высоты печи, а значит, и длины электродов, уменьшении по возможности диаметра электрода.

В конструкции некоторых дуговых сталеплавильных печей предусмотрена возможность обдува боковой поверхности электрода потоком защитного газа. При этом практически по всей длине электродной свечи создается присоединенный газовый слой, препятствующий доступу кислорода печной атмосферы к поверхности электрода. Этот способ защиты позволяет снизить общий расход электродов в среднем на 36 % [5].

5.3. Подвижная часть вторичного токоподвода

Анализ и сравнение основных характеристик электрододержателей

Электрододержатель – один из важных элементов дуговых печей, к которому предъявляются следующие требования:

- подведение с минимальными потерями к электроду тока, сила которого на большегрузных печах составляет десятки килоампер;
- сопротивление тепловым нагрузкам, обусловленным действием тока и теплопередачей от расплава, выделяемых из печи газов и графитированных электродов.

Так как электрододержатели обычной конструкции с медными токоведущими трубошинами, изолированными от несущих рукавов (рис.11), не в полной мере отвечают этим требованиям, в последние годы все большее применение в зарубежных и отечественных печах получают электрододержатели с токопроводящими рукавами (рис.12) [10]. Особенностью этой конструкции является совмещение электрических, механических и теплообменных функций в одном узле – водоохлаждаемом рукаве с развитой токоведущей наружной поверхностью.

Идея применения в дуговых печах электрододержателей с токопроводящими рукавами принадлежит сотрудникам ВНИИЭТО, получившим авторское свидетельство в 1976 году. Однако первая практическая реализация этой идеи была осуществлена за рубежом только в середине 80-х годов XX века.

Преимущества электрододержателей с токопроводящими рукавами по сравнению с электрододержателями обычной конструкции подтверждает

анализ их электрических, тепловых и механических характеристик в реальных условиях работы печи.

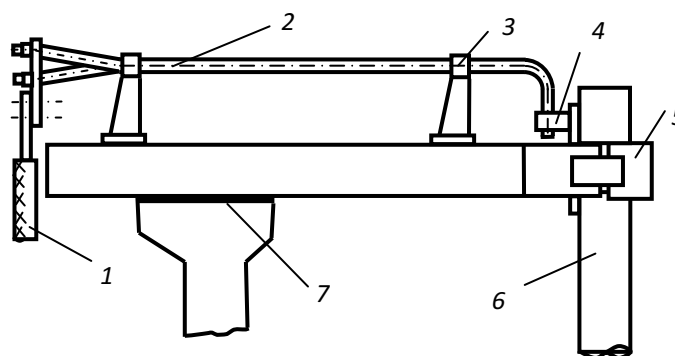


Рис.11. Электроподдержатель обычного типа:

1 – гибкий кабель; 2 – трубошина; 3 – кронштейн; 4 – головка электроподдержателя; 5 – хомут; 6 – электрод; 7 – электрическая изоляция

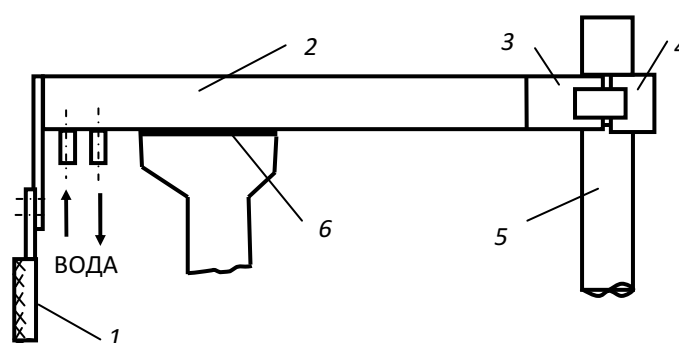


Рис.12. Электроподдержатель с токопроводящим рукавом:

1 – гибкий кабель; 2 – токопроводящий рукав; 3 – головка электроподдержателя; 4 – хомут; 5 – электрод; 6 – электрическая изоляция

Активное фазное сопротивление токоведущих элементов на участке «рукав» для обоих электроподдержателей, если пренебречь эффектом близости, может быть рассчитано по формуле [10]:

$$r_p = \rho \frac{l}{n(\Pi - k_{lt}\delta)\delta}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление токоведущих элементов электроподдержателя на участке «рукав»; l – длина токоведущих элементов (трубошин или токопроводящего рукава); n – число параллельных элементов в фазе; Π – наружный периметр токоведущего элемента; k_{lt} – коэффициент, равный для проводников круглого сечения 3,14, а для проводников прямоугольного сечения 4; δ – глубина проникновения электромагнитной волны в проводник.

Индуктивное фазное сопротивление токоведущих элементов для $n > 1$ и $n = 1$ на участке «рукав» определяют по формулам для $n > 1$:

$$x_p = \frac{628 \cdot 10^{-7} \cdot l}{n} \left[\ln \left(\frac{4l^2}{k_2 \Pi d_1} \right) - 0,5 \ln \left(\frac{4l^2}{d_2 d_3} \right) - l \right]; \quad (2)$$

для $n = 1$:

$$x_p = 628 \cdot 10^{-7} \cdot l \left[\ln \left(\frac{2l}{k_2 \Pi} \right) - 0,5 \ln \left(\frac{4l^2}{d_2 d_3} \right) \right], \quad (2')$$

где k_2 – коэффициент, равный 0,16 для проводников круглого сечения и 0,11 для проводников прямоугольного сечения; d_1 – среднее расстояние между осями параллельных проводников в одной фазе; d_2 и d_3 – средние расстояния между проводниками данной фазы и проводниками двух других фаз.

Из формул (1) – (2') следует, что значения активного и индуктивного сопротивления токоведущих элементов электрододержателя на участке «рукав» при прочих равных условиях уменьшаются с увеличением суммы наружных периметров их токоведущих сечений. Поэтому для токопроводящих рукавов с развитым периметром, существенно превышающим периметр трубошин обычного электрододержателя, их значения будут соответственно ниже. В результате значения активного и индуктивного электрического сопротивления короткой сети дуговой печи с токопроводящим электрододержателем будут меньше, чем эти показатели работы печи с обычным электрододержателем, что обеспечивает для заданного значения ступени напряжения $U_{тр}$ трансформатора увеличение мощности дуги каждой фазы на величину $\Delta P_{дф}$:

$$\Delta P_{дф} = I^2 \left[\sqrt{\left(\frac{U_{тр}}{I} \right)^2 - (x_{к1} - x_{p1} + x_{p2})^2} - \sqrt{\left(\frac{U_{тр}}{I} \right)^2 - (x_{к1})^2} - r_{p1} + r_{p2} \right],$$

где индекс 1 относится к печи с обычным электрододержателем, а индекс 2 – к печи с токопроводящим электрододержателем, при этом электрододержателю с большим периметром токоведущих элементов будет соответствовать меньшая токовая нагрузка, определяемая плотностью тока j :

$$j = \frac{1}{(\Pi - k_1 \delta) \delta}.$$

Исследования и расчеты, выполненные в НПО «ЭЛОТЕРМ» [10], показывают, что тепловые нагрузки рукавов электрододержателей обоих типов, определяемые внешними факторами (теплопередачей конвекцией от потоков газа, выходящего через зазоры между электродом и электродными отверстиями в своде, излучением с поверхности электрода, теплопроводностью от головки электрододержателя), сосредоточены в их головной части и примерно одинаковы. В то же время тепловыделения в токоведущих элементах, обусловленные прохождением через них электрического тока и равные активным потерям, будут выше для трубошин обычного электрододержателя, имеющих меньший периметр сечения.

Следует также учитывать нагрев несущих рукавов обычных электрододержателей в результате действия вихревых токов.

Механические нагрузки электрододержателей обоих типов – это статические и динамические нагрузки. Статические нагрузки, определяемые гравитационными силами, пропорциональными массе электродов и рукавов, включая массу закрепленных на них токоведущих элементов, а также динамические нагрузки, возникающие при наклоне печи, перемещении электродов, упоре электродов в твердую шихту и по иным причинам, в первом приближении могут быть приняты одинаковыми для обоих электрододержателей при использовании в них медных токонесущих элементов.

Однако электродинамические усилия, возникающие в токоведущих элементах электрододержателей на участке «рукав», даже при равенстве их абсолютных значений, оказывают различное воздействие на механическую прочность несущих элементов. Это объясняется следующим:

- трубошины обычного рукава, характеризующиеся меньшими значениями периметра, площади и момента инерции, поперечного сечения имеют меньшую жесткость и сопротивление деформации;
- несущие рукава обычных электрододержателей подвергаются дополнительному воздействию момента сил, являющегося результатом консольного расположения трубошин на рукаве (рис.11) и равному

$$M = f_{\text{эд}} l h,$$

где $f_{\text{эд}}$ – электродинамическое усилие, приходящееся на 1 м длины трубошины; l – длина трубошины; h – расстояние между трубошиной и рукавом.

Максимальное (удельное) электродинамическое усилие, приходящееся на 1 м длины токоведущих элементов трубошин или токопроводящего рукава для средней фазы, равно

$$f_{\text{эд max}} = 1,73 \cdot 10^{-7} \frac{I_y^2}{a} k_{\text{ф}},$$

где a – среднее расстояние между проводниками соседних фаз; I_y – ударный ток трехфазного короткого замыкания; $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы проводника, равный 1...1,5.

Действие этих усилий вызывает вибрацию трубошин и разрушение электрической изоляции, расположенной между ними и несущим рукавом.

Материалы токопроводящих рукавов

Из анализа физических свойств и стоимости различных материалов и сплавов, удовлетворяющих условиям эксплуатации токопроводящих рукавов (высокой электропроводности и теплопроводности, достаточной механической прочности и относительно невысокой стоимости), следует, что наиболее приемлемые материалы для изготовления токопроводящих рукавов – медь и алюминий, а также сплавы на их основе.

В табл. 4 приведены сопоставимые свойства меди и алюминия.

Сравнение показывает, что несмотря на более высокое удельное сопротивление алюминий является материалом, перспективным для изготовления токопроводящих рукавов в связи с существенно меньшей плотностью и большей глубиной проникновения электрического поля.

Таблица 4

Физические свойства ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) и стоимость меди и алюминия

Металл	Плотность, кг/м^3	Теплоемкость, $\text{кДж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$	Теплопроводность, $\text{Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$	Удельное электрическое сопротивление, $\text{Ом}\cdot\text{м}\cdot 10^{-8}$	Предел прочности, $\text{Н/(м}^2\cdot 10^7)$	Стоимость, усл. ед./т
Медь	8700...8900	0,39	390	1,6...1,8	20...50	4300...4500
Алюминий	2700...2750	0,95	200	2,50...2,75	8...13	2900...3000

Таблица 5

Стойкость проводниковых материалов (балл^{*}) в атмосфере, содержащей химические примеси

Химические примеси в атмосфере	Алюминий	Медь
Окислы азота	4,5	6
Оксид углерода	1	6
Серный ангидрид	1	1
Сероводород	1	6
Фтористый водород	6	6

* Балл 1 – совершенно стойкий, балл 10 – нестойкий

Механические свойства алюминия могут быть значительно улучшены путем его легирования различными упрочняющими элементами или усиления посредством стальной арматуры. При этом большое значение в условиях интенсивного теплового излучения в печах имеет свойственное алюминию низкое значение степени черноты.

Одним из важных показателей материалов в условиях металлургического производства, характеризуемого значительным уровнем газовой выделенности, является стойкость в атмосфере, содержащей химические примеси. При оценке по десятибалльной шкале (табл. 5) коррозионная стойкость алюминия во многих средах выше стойкости меди.

Конструкции и эксплуатационные характеристики токопроводящих рукавов

Наиболее распространенная конструкция токопроводящего рукава, применяемая с середины 80-х годов XX века западными печестроительными фирмами (Fuchs Systemtechnik, Krupp, Danieli, Voest-Alpine и др.), представляет собой трубу прямоугольного сечения, полученную сваркой биметаллических (медь–сталь) листов [10]. Толщина наружного токопроводящего слоя составляет обычно 8...10 мм. Внутри биметаллическая труба имеет многоканальное или полостное водяное охлаждение, обеспечивающее требуемый теплосъем и нормальные температурные условия работы токоведущей части рукава и расположенного внутри него пружинно-гидравлического механизма зажима электрода, а также электрической изоляции, находящейся между нижней «гранью» рукава и его опорной стойкой. К контуру водяного охлаждения рукава подключены элементы головки электрододержателя (контактная плита и хомут) и плита стойки, на которой размещена электроизоляционная прокладка.

Биметаллический лист для токопроводящего рукава может быть изготовлен различными методами: сваркой взрывом, наплавкой, прокаткой в вакууме, электрошлаковым методом (метод разработан в АО «ВНИИЭТО»).

Опыт эксплуатации электрододержателей с токопроводящими биметаллическими рукавами подтверждает их преимущества перед обычными электрододержателями. Они имеют меньшее активное и индуктивное сопротивление, обеспечивая лучшие электрические показатели печи и увеличение полезной мощности дуг, и большую механическую жесткость, что позволяет значительно уменьшить диаметр распада электродов и увеличить стойкость стен (футеровки) печи (или ковша). Одновременно устраняется нагрев стальных элементов рукава под воздействием электромагнитных полей в результате экранирования их наружным токопроводящим слоем, повышается срок службы механизма зажима электрода и электрической изоляции, снижаются затраты на ремонт и обслуживание электрододержателя.

Фирма Badische Stahl Werke (Германия) с 1988 года эксплуатирует на дуговых сталеплавильных печах емкостью 80 и 85 т электрододержатели со сварными алюминиевыми рукавами конструкции фирмы BSE и Klark и отмечает их следующие преимущества: уменьшение массы на 50 %, увеличение скорости перемещения электродов, повышение полезной мощности на 8,5 % и увеличение среднего коэффициента мощности с 0,81 до 0,84, снижение себестоимости стали.

Таким образом, анализ характеристик и опыт эксплуатации электрододержателей обычной конструкции и с токопроводящими рукавами свидетельствует о значительных преимуществах последних.

Эффективность применения электрододержателей с токопроводящими рукавами возрастает с увеличением емкости печи, так как сокращение актив-

ных потерь и увеличение мощности дуг пропорциональны квадрату силы тока. Это показывает целесообразность их применения также в дуговых печах постоянного тока, сила рабочего тока которых в 2 раза превышает силу тока трехфазных печей идентичной емкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гудим Ю.А. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы: монография / Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров, А.Д. Киселев. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. - 547 с. (Серия монографий "Современные электротехнологии". Т.9).
2. Миронова А.Н., Миронов Ю.М. Энерготехнологическая эффективность дуговых сталеплавильных печей: учеб. пособие / Под ред. Ю.М. Миронова. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1999. - 154 с.
3. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: учебник для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др.; под ред. А.Д. Свенчанского. - М.: Энергоиздат, 1981. - 296 с.
4. Горева Л. П. Электротехнологические установки и системы. Электродуговые установки : учебное пособие / Л. П. Горева ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2008. - 109, [2] с. : схемы
5. Поволоцкий Д.Я., Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю. Устройство и работа сверхмощных дуговых сталеплавильных печей. - М.: Металлургия, 1990. - 176 с.
6. Морозов А.Н., Галян В.С. Эффективность работы высокоомощных дуговых печей // Сталь. - 1986. - № 4. - С. 30-32.
7. Афанасьев В.В. Размеры и форма ванны круглой дуговой печи // Электрометаллургия. - 2005. - № 1. - С. 17-21.
8. ЗАО «Фонд-Металл» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.fondmet.ru>, свободный (22.05.2014).
9. Еланский Д.Г. Тенденции развития электросталеплавильного производства // Электрометаллургия. - 2001. - № 5. - С. 3-19.
10. Бершицкий И.М., Военный В.А., Никулин А.А. Электрододержатели дуговых печей // Электрометаллургия. - 2001. - № 5. - С. 22-29.