



OTTO JUNKER

Использование индукционных печей
для плавки и разливки материалов
на основе меди



OTTO JUNKER Group
Global and Close to the Customer

www.otto-junker-group.com

Использование индукционных печей для плавки и разливки материалов на основе меди

© 2009 г.

Компания «OTTO JUNKER GmbH»

Все права сохранены.

Настоящий документ, включая весь содержащийся в нём текст, защищён законом «Об авторском праве». За исключением случаев, когда издателем выдано разрешение, любое применение настоящего документа в целях, выходящих за пределы, установленные Законом Германии «Об авторском праве», запрещено и считается юридически наказуемым правонарушением. Вышеуказанное распространяется на копирование, воспроизведение, перевод, микрофильмирование или хранение и обработку с помощью электронного оборудования.

Авторы: Фрэнк Донсбах, доктор Уилфред Шмитц, доктор Ханс Беббер, доктор Дитмар Трауцедель
Фотографии: Архивы компаний «OTTO JUNKER», «BSN Thermprozessechnik GmbH»

Подготовка и оформление: Студия «Atelier Beißel», Аахен

Печать: Типография «DAS DRUCKHAUS Beineke Dickmanns GmbH», Коршенбройх

Несмотря на то, что настоящий документ подготовлен со всей тщательностью, ошибки не могут быть полностью исключены. Ни издатель, ни авторы не несут юридическую ответственность и не принимают на себя обязательства за какую-либо неточную информацию, приведённую в документе, а также за любые последствия, связанные с этим. Издатель и авторы будут благодарны за все предложения по внесению поправок или сообщения об ошибках.

Содержание

Введение	7
1 Основные положения	9
1.1 Материалы на основе меди	9
1.2 Металлургия	10
2 Технологический процесс	14
3 Системы индукционных печей для плавки и разливки	17
4 Конструкция и правила эксплуатации индукционных печей	20
4.1 Типы печей	20
4.2 Модуль электропитания	24
4.3 Специальные конфигурации контуров тигельных печей	29
4.4 Технология управления процессами	30
4.5 Меры обеспечения безопасности	32
4.6 Огнеупорная футеровка	36
4.7 Вспомогательное оборудование	39
5 Выбор и эксплуатация разных типов печей	40
5.1 Критерии применения	40
5.2 Рекомендации по применению	42
6 Параметры и эксплуатационные характеристики	45
6.1 Канальные печи	45
7 Экономия энергии и снижение затрат	49
7.1 Ключевые факторы	49
7.2 Тип печи	49
7.3 Конструкция печи, номинальные характеристики и размеры	49
7.4 Режим эксплуатации печи	53
7.5 Сокращение расходов на энергию	55
8 Стандартное применение	57
8.1 Печи и печные установки	57
8.2 Комплектные производственные линии	65
9 Заключение	76
Справочная литература	77

Использование индукционных печей для плавки и разливки материалов на основе меди

Введение

Разнообразное использование новых видов материалов на основе меди как в традиционных, так и в высокотехнологичных продуктах (Рис. 1) подтвердили, что такие материалы являются сегодня необходимым сырьевым товаром для современной промышленности. Среди всех видов применения основная задача заключается в производстве медных сплавов с максимальной точностью и качеством состава. Оба эти требования пользуются особым спросом в сфере технологических процессов плавки и разливки, поскольку химический состав и степень чистоты металла будут окончательно определяться на этапе плавки.



Рис. 1: Общее применение материалов на основе меди

Особые преимущества, связанные с индуктивным переносом энергии, такие как прямой подогрев металла практически без температурного выброса, интенсивное и при этом контролируемое движение ванны (если необходимо), высокопрецизионное управление температурой и технологической обработкой, и согласуемые, нейтральные в металлургическом смысле показатели производственного процесса, имеют ключевое значение в плавке, легировании, аффинировании и выдержке при определённой температуре, а также в разливке различных материалов на основе меди. Различные технологии и варианты конструкций систем индукционной плавки, в сочетании с основными преимуществами индукционной методики, обеспечивают применение оптимально подходящего оборудования для различных требований технологий обработки. Благодаря этим преимуществам и высокой надёжности и экономичности эксплуатации индукционные печи получили широкое признание в сфере производства материалов на основе меди, и при этом высокие металлургические требования к таким материалам способствовали дальнейшему развитию технологий индукционных печей /1/.

И для производства арматуры из латуни с низким содержанием цинка, и для литья слитков бескислородной меди, и для изготовления медных труб – индукционная плавка предоставляет возможность использования технически и экономически эффективного оборудования для широкого диапазона сплавов и технологических процессов.

1 Основные положения

1.1 Материалы на основе меди

Чистая медь

Медь представляет собой материал, характеризующийся, главным образом, отличной электропроводностью и теплопроводностью. Оба эти свойства могут ухудшаться при наличии примесей и легирующих добавок. Поэтому для достижения оптимальных характеристик требуется высокая степень чистоты меди.

Относительно высокая коррозионная стойкость и хорошая обрабатываемость металла также относятся к отличительным особенностям меди.

Медь считается «чистой», в техническом смысле термина, если содержание меди Cu составляет 99,90% и выше. При такой степени чистоты свойства электропроводности и теплопроводности материала уже являются исключительными. Однако имеется возможность дополнительного улучшения про-водимости путём повышения чистоты до 99,99% или даже до 99,995%. В материалах такого типа концентрация примесей будет составлять приблизительно 50 ppm, тогда как содержание кислорода обычно сохраняется ниже 3 ppm. Для специальных видов применения была создана бескислородная медь с чистотой выше 99,999% /2/.

Материалы на основе меди высокой чистоты могут быть изготовлены только в индукционной печи с использованием отборных шихтовых материалов на основе сложных металлургических технологий под строгим контролем процесса.

Медные сплавы

Практически никакой другой материал невозможно перерабатывать путём соединения с другими металлами в такое количество разнообразных технически ценных сплавов.

Прочность чистой нелегированной меди, которая является невысокой, и её низкие антифрикционные свойства и механическая обрабатываемость могут быть повышены путём сплава либо с отдельными основными элементами, т.е. оловом, цинком, алюминием, свинцом, никелем и/или хромом, или с их соединениями. Однако легирование часто приводит к ухудшению других параметров, таких как, например, удлинение при разрыве. Можно вводить дополнительные легирующие добавки в небольшой процентной концентрации – железо, марганец, кремний, для улучшения свойств материала предпочтительным способом или для приведения свойств в соответствие с определёнными требованиями.

Таким образом, различные материалы на основе меди классифицируются на основе входящих в их состав основных легирующих элементов:

- медь – цинк;
- медь – олово;
- медь – олово – цинк;
- медь – алюминий;
- медь – хром;
- медь – марганец – алюминий;
- медь – свинец – олово;
- медь – никель.

Для этих материалов, несмотря на их различия и специфическую пригодность, существует три основные области применения:

- компоненты, необходимые для выявления высокой электропроводности и теплопроводности;
- компоненты, необходимые для достижения требуемых антифрикционных свойств;
- компоненты, необходимые для повышения коррозионной стойкости /3/.

Как правило, можно констатировать, что медь, учитывая её высокую электропроводность, является наиболее важным материалом в электротехнической промышленности. Более половины выпускаемой во всём мире меди используется для этих целей.

1.2 Металлургия

Медь и материалы на основе меди характеризуются широкой эксплуатационной гибкостью в части технологии легирования и возможностью различного применения в металлургии для инженеров. Что касается процесса плавки, следует учитывать реакцию меди на кислород, а также различные металлургические свойства легирующих компонентов при контакте с кислородом, как и проблему потенциального наводороживания.

Кроме того, необходимы меры, предотвращающие загрязнение плавки элементами, ухудшающими её свойства. Такие элементы могут образовываться из шихты, футеровки печи, используемых добавок или даже из среды печи. Практически для всех материалов на основе меди действует правило, заключающееся в том, что их свойства ухудшаются в присутствии водорода.

При плавке меди поддерживается баланс между содержанием водорода и кислорода, таким образом, расплав с высоким содержанием кислорода может поглощать водород, но только в небольшом количестве, тогда как расплав с низким содержанием кислорода поглощает большие количества водорода (Рис. 2).

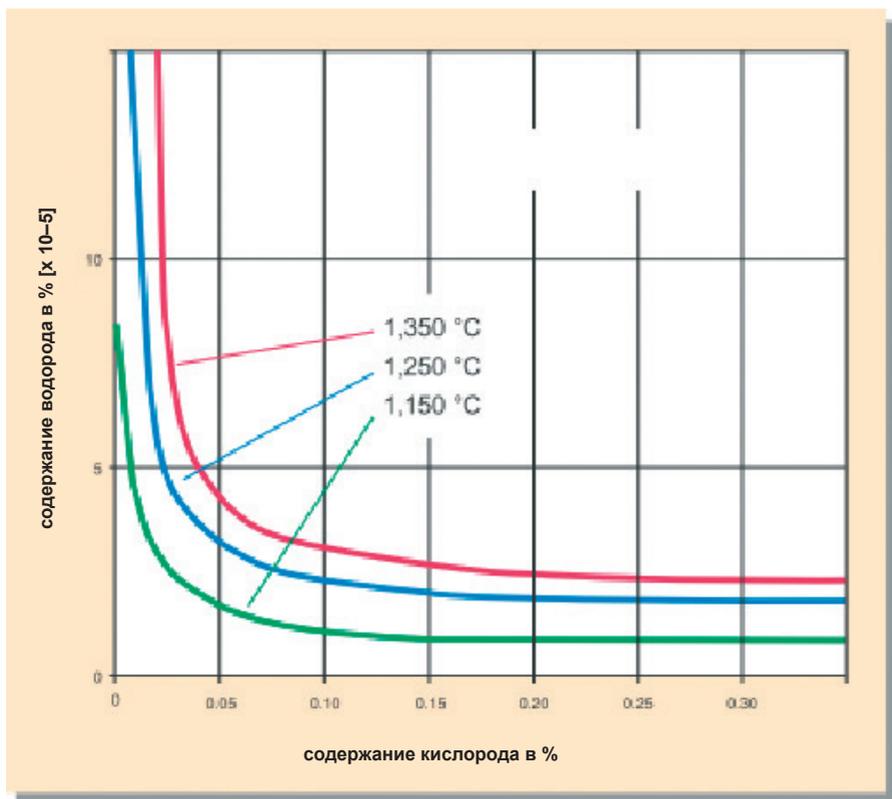


Рис. 2: Баланс между насыщенностью кислорода и водорода в расплаве меди при различных температурах

Такой баланс смещается в направлении повышенных концентраций при повышении давления и температуры. Для создания сплава высшего сорта – с низкими концентрациями этих двух элементов – можно применять два различных подхода. Это так называемые методы окислительной плавки или нейтральной плавки.

В процессе окислительной плавки расплав сначала медленно окисляется для снижения содержания в нём водорода.

Последующая очистка от окислов, которая проводится, как правило, при использовании промежуточного сплава меди/фосфора, снижает концентрацию кислорода до уровня, при котором может быть получен расплав с низким содержанием кислорода и с низким содержанием водорода (Рис. 3).

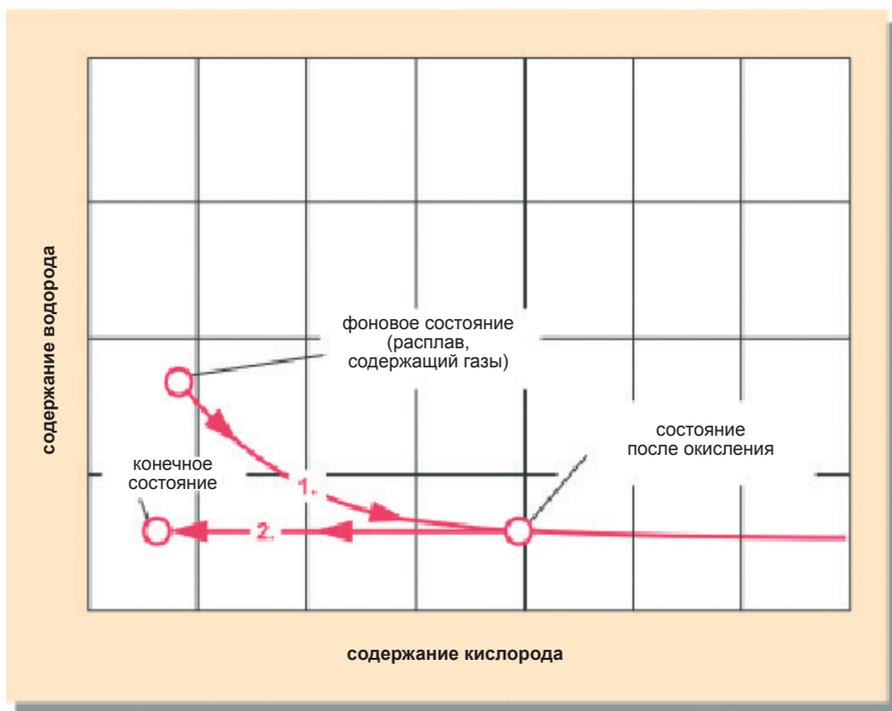


Рис. 3: Метод окислительной плавки: 1 – окисление, 2 – восстановление

При использовании метода нейтральной плавки воздействие окружающего воздуха на расплав минимизируется с целью предотвращения влияния на металл атмосферного кислорода или влажности.

Это достигается путём создания на поверхности ванны защитного слоя древесного угля достаточной толщины. Иногда для этих целей используется технический углерод, поскольку он обеспечивает даже лучшую защиту и при этом содержит меньшее количество воды. При обработке медноникелевых сплавов углерод может выделяться из древесного угля и попадать в расплав, вызывая образование нежелательных карбидов. Покрытие древесного угля не создаёт таких проблем [4]. Воздействие на плавку окружающего воздуха можно также предотвратить, поддерживая защитный газовый слой на металле. В редких случаях применяется плавка в вакууме.

Пропускание через расплав пузырьков инертного газа (например, аргона или азота) или активного газа (например, хлора) снижает содержание в нём водорода и устраняет неприемлемые металлические и неметаллические примеси. Газ, как правило, нагнетается в расплав через соответствующие патрубки или пористый кирпич на днище печи. Такое пропускание пузырьков следует проводить непосредственно перед разливкой, не оставляя времени для дополнительного поглощения газа или загрязнения.

Результат пропускания пузырьков инертного газа основан на том, что растворённый газ (например, водород), присутствующий в расплаве, поглощается пузырьками инертного газа при диффузии и перемещается ими к поверхности ванны. Пузырьки газа при использовании хлора преобразовывают металлические примеси в хлориды, которые после этого могут быть выведены. Парообразные хлориды металлов дополнительно очищают расплав, удаляя неметаллические примеси. С другой стороны, слишком большие потери металла и токсичные испарения, связанные с обработкой хлоридами, ограничивают применение этого метода.

В целом, недостаток метода окислительной плавки состоит в увеличении потерь легко окисляемых легирующих добавок. Кроме того, ускоряется износ огнеупорной футеровки печи. Таким образом, процесс окислительной плавки является экономически не рациональным, учитывая высокую степень потерь металла, для обработки медно-цинковых и медно-алюминиевых сплавов.

Помимо всего прочего, очень сложно обеспечить точную дозировку надлежащего количества окислителей и восстановителей, и вследствие наличия в расплаве остаточных продуктов химической реакции могут возникать проблемы.

Принимая во внимание всё вышесказанное, предпочтительным считается метод нейтральной плавки.

На самом деле, не содержащая кислорода медь с максимальной проводимостью, используемая в современной электронной промышленности, преимущественно, изготавливается на основе метода нейтральной плавки. Этот метод предусматривает особые требования к конструкции и процессу плавки используемых индукционных печей /5/.

Металлургические характеристики плавильных печей индукционного типа могут варьироваться в широком диапазоне и в отличие от печей, работающих на топливе, они обеспечивают нейтральную среду печи. Таким образом, индукционные печи создают оптимальные условия для реализации широкого диапазона режимов плавки. Кроме того, инженер имеет в своем распоряжении множество возможностей для предотвращения воздействия на расплав окружающего воздуха в ходе загрузки и плавки.

2 Технологический процесс

Несмотря на то, что методы производства продуктов на основе меди могут быть различными, плавка и разливка неизменно являются начальным этапом любого процесса. С другой стороны, каждый из методов предъявляет особые требования к первоначальному этапу процесса. В частности, конструкция разливочной части печи определяется выбранным способом производства. В целом, основное различие проводится между отливками и полуфабрикатами.

Производство отливок

Способы производства отливок можно классифицировать на основе заполнения полостей. Из этого естественным образом вытекают особые требования к технологии разлива из печи.

Основные различия проводят между следующими способами:

- литьё без применения давления;
- литьё под давлением.

Кроме того, могут применяться разные изложницы – пресс-формы или разовые формы.

На Рис. 4 представлен обзор различных способов, используемых для производства отливок из меди и медных сплавов. Объём продукции, изготавливаемой литьём под давлением, невелик. Аналогично, применение литья под давлением с применением вакуума ограничивается производством специфических изделий (санитарные приборы).

Производство полуфабрикатов

Выбор одного из способов обработки металла, таких как прессование, прокат, вытягивание и ковка, для производства трубок/ труб, профилей, прутков, катанки, проволоки, полос и листов, определяется первоначальным процессом непрерывного литья заготовок квадратного, круглого сечения и плоских заготовок. После этого выполняются операции обработки металла.

Помимо этого, в настоящее время существуют альтернативные методы изготовления литых заготовок по форме, близкой к окончательной, для профилей, труб, прутков или катанки – специальные технологии непрерывного литья (например, отливка в валках, технология Southwire, заливка снизу вверх, технология Directube, процесс литьё-прокат). После любого из этих методов проводится окончательная обработка для изготовления конечного продукта.



Рис. 4: Методы производства отливок

Методы непрерывного литья классифицируются на основе следующих критериев:

Направление разливки:

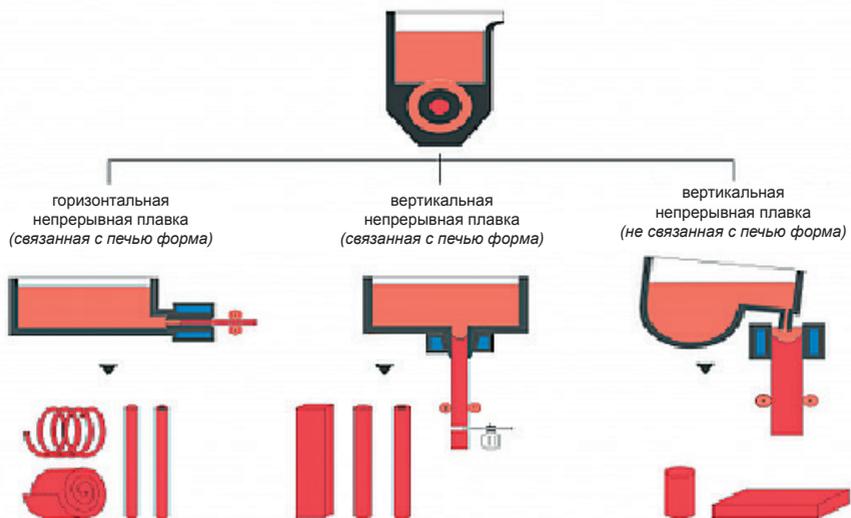
- Вертикальное непрерывное литьё
- Горизонтальное непрерывное литьё

Размещение литейных форм

- Не зависящая от печи форма
- Зависящая от печи форма
- Передвижная форма

Режим работы

- Непрерывная разливка
- Полунепрерывная разливка



3. Системы индукционных печей для плавки и разливки

Загрузка шихты

Первым этапом технологического процесса является загрузка шихты в плавильную печь. В качестве шихты могут использоваться следующие материалы:

- стружка;
- бракованные изделия;
- лом;
- катоды;
- слитки.

При возникновении проблем с влажностью перед загрузкой шихты в печь может потребоваться её сушка, например, если используется стружка. Также может быть целесообразным подогрев шихтового материала до температуры 200°C – 300°C. Помимо тщательной сушки металла, эти меры могут помочь повысить производительность плавки. На Рис. 6 приводятся некоторые примеры типового загрузочного оборудования.

Загрузка

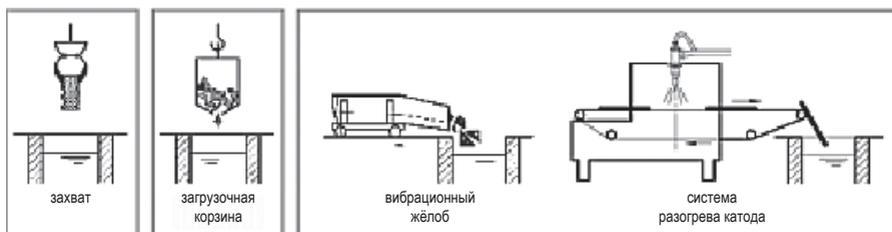


Рис. 6: Загрузочное оборудование

Плавка

Производство высококачественной меди начинается с плавки (или переплавки) шихты, и затем проводятся этапы легирования, окисления/восстановления и дегазации расплавленного металла.

В зависимости от состава материала плавка, как правило, подогревается до температуры приблизительно на 100°C – 150°C выше температуры соответствующих жидкостей.

Основные задачи плавки, то есть, плавление, очищение и разливка, могут быть выполнены либо в одной печи, либо в отдельных агрегатах.

Вследствие высоких эксплуатационных показателей современных линий статического и непрерывного литья и повышенных требований к металлургическим характеристикам отдельные печи для плавки и разливки приобретают всё более широкое применение. Преимущество этого – продвижение дальнейшей специализации и, следовательно, оптимизация отдельных конструктивных узлов печи.

Перегрузка расплавленного металла

Различные возможности перегрузки представлены ниже (Рис. 7).

Очень важно, особенно для материалов на основе меди высшего сорта, обеспечить полностью закрытую перегрузку, с минимизацией вихревого турбулентного движения расплавленного металла.

Перегрузка металла

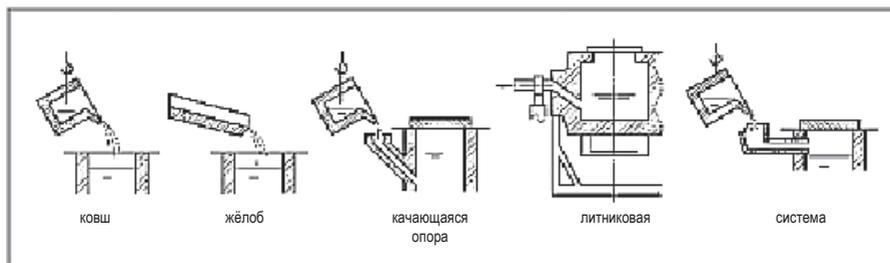


Рис. 7: Оборудование для перегрузки расплавленной меди

Разливка

Если операции плавки и разливки проводятся в отдельных печах, плавильный агрегат используется практически исключительно для расплавления шихты. В таком случае следующая в линии (то есть, разливочная) печь выполняет следующие функции:

- подогрев до температуры разливки;
- выдержка при определённой температуре и накопление металла;
- гомогенизация металла;
- легирование и очищение;
- разливка и дозировка.

Конструкции разливочных печей могут быть различными в зависимости от применяемой технологии обработки. На основе принципа разливки их можно классифицировать следующим образом (Рис. 8):

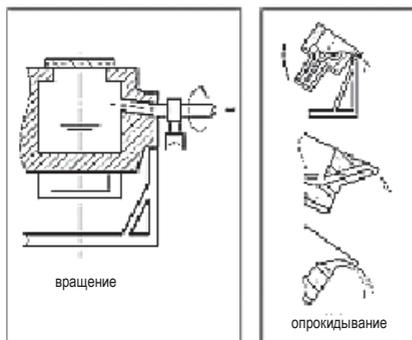
Разливка путём перемещения печи:

- вращение или
- опрокидывание.

Разливка из неподвижной печи:

- подача под давлением;
- гравитационная разливка;
- заливка снизу вверх.

Разливка путём перемещения печи



Разливка из неподвижной печи

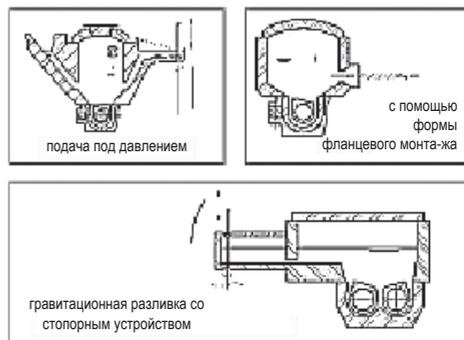


Рис. 8: Способы разливки

4 Конструкция и правила эксплуатации индукционных печей

4.1 Типы печей

На Рис. 9 и Рис. 10 представлены основные концепции конструкций двух типов индукционных печей – канального типа и тигельного типа.

В канальной печи энергия передаётся только металлу в индукционный канал, то есть, относительно малой части содержимого печи, тогда как в тигельной печи осуществляется подогрев практически всего содержимого печи /5/.

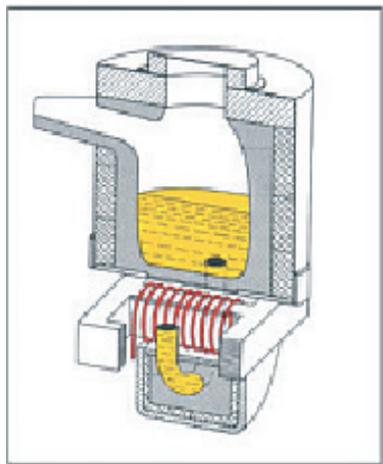


Рис. 9: Принцип конструкции канальной печи

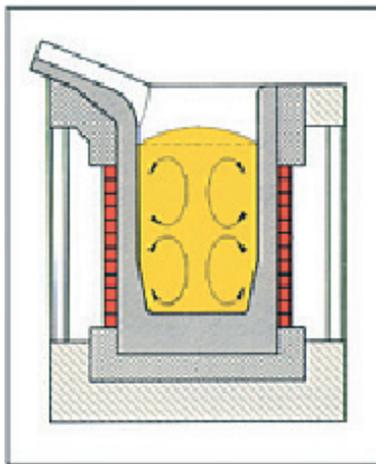


Рис. 10: Принцип конструкции тигельной печи

В результате движение ванны, создаваемое электромагнитными силами в тигельной печи, почти полностью перемешивают содержащийся в печи металл, тогда как активное движение ванны в печи канального типа образуется преимущественно в индукторе.

С другой стороны, обеспечение герметичности тигельной печи – более сложная задача, поскольку её индуктор охватывает практически всю высоту тигля.

На Рис. 11 и Рис. 12 приводятся типичные примеры расширенных индукционных печей большой мощности (Рис. 11 – тигельная печь, Рис. 12 – канальная печь).

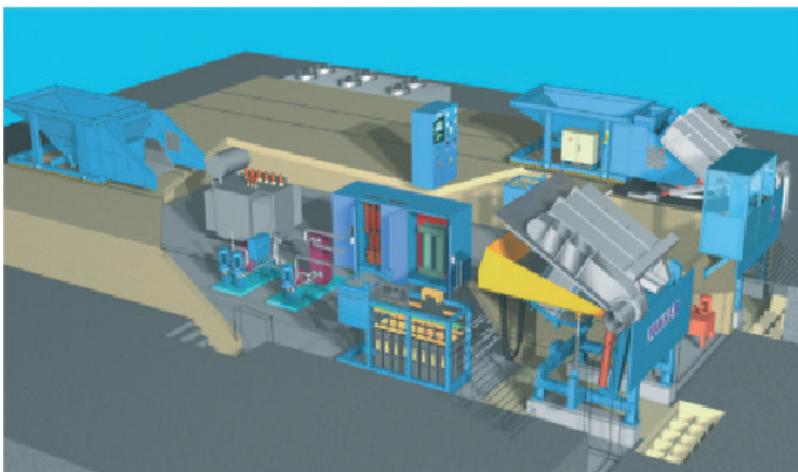


Рис. 11: Расширенная установка тигельной печи

В частности, в состав системы промышленного применения входят следующие компоненты:

Плавильный агрегат включает в себя:

- корпус печи с катушкой или индуктором;
- люльку печи;
- гидравлический блок питания;
- панель управления оператора.

Система электропитания включает в себя:

- трансформатор;
- преобразователь частоты;
- стеллаж для конденсаторов;
- силовые кабели.

Система управления технологическим процессом включает в себя:

- систему контроля взвешивания;
- шкаф управления оператора;
- процессор контроля плавки.

Вспомогательное и внешнее оборудование, такое как

- система повторного охлаждения водой с воздушным охладителем/башенным охладителем;
- система сбора пыли с вытяжным колпаком и
- загрузочное оборудование.

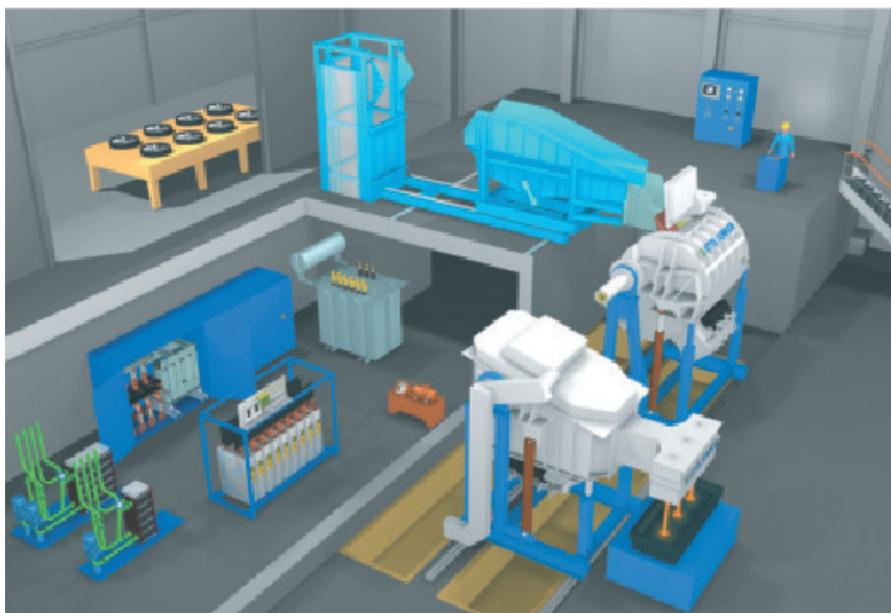


Рис. 12: Расширенная установка канальной печи

Тигельная индукционная печь

Корпус печи включает в себя, в основном, цилиндрическую катушку печи, окружающую тигель (изготавливается, как правило, из керамического огнеупорного материала), обвязку из ламинированных металлических листов для экранирования магнитного поля, а также несущий стальной каркас. Корпус печи монтируется в люльке печи и может опрокидываться при помощи гидравлических цилиндров (Рис. 13).

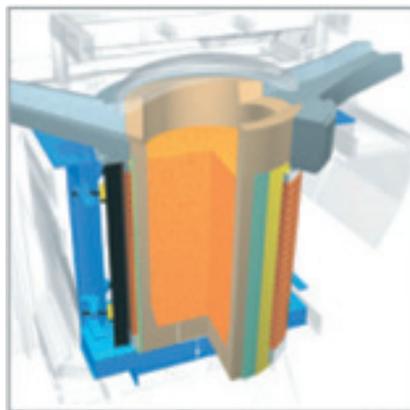


Рис. 13: Тигельная система печи

Катушка с водяным охлаждением предназначена для генерирования электромагнитного поля, а также для поглощения радиальных сил, создаваемых тиглем. К дополнительным компонентам печи относится крышка печи, вытяжной колпак, система контроля взвешивания и, при необходимости, система управления тиглем. Независимо от конструктивных деталей, в основном используется два типа таких печей: стандартная тигельная печь с катушкой, охватывающей тигель практически по всей высоте, и так называемая модель с «укороченной катушкой». Укороченная катушка печи охватывает только нижнюю треть тигля (Рис. 14)

Канальная индукционная печь

Подогрев такого типа печей осуществляется вертикальными, наклонными или (в редких случаях) горизонтальными канальными индукторами, закрепляемыми к кожуху печи. Это позволяет применять различные варианты конструкций, если при этом сохраняется геометрия корпуса печи. Имеются конструкции тигельного, барабанного или лоткового типа. Кроме того, возможны их комбинации или специальные конструкции (Рис. 15).

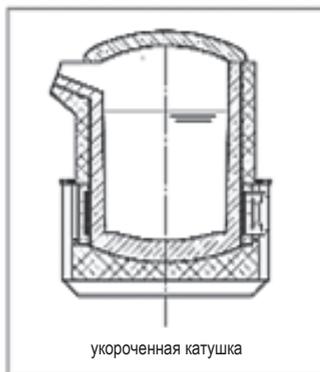
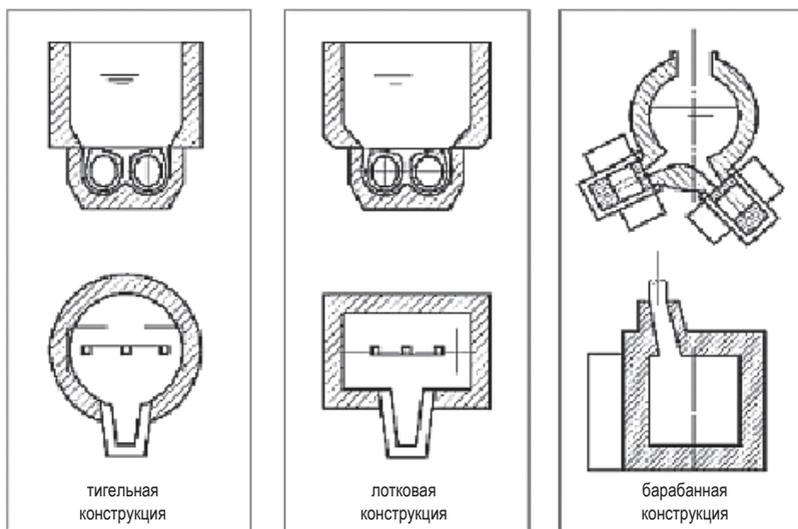


Рис. 14: Печь с укороченной катушкой

Типы конструкций



Подогрев

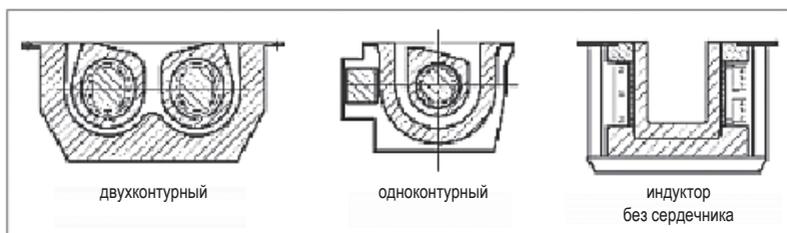


Рис. 15: Варианты конструкций канальной печи и подогрева

Наиболее распространённой конструкцией является печь с люлькой и гидравлическими цилиндрами для опрокидывания печи, однако имеются и альтернативные решения. Принцип конструкции канального индуктора представлен на Рис. 16. Металл в жёлобе канала нагревается посредством медной катушки и сердечника из ламинированной трансформаторной листовой стали. Поперечное сечение канала может быть круглым или прямоугольным. Большинство индукторов, используемых сегодня, представляют собой так называемые двухконтурные индукторы с W-образными каналами.

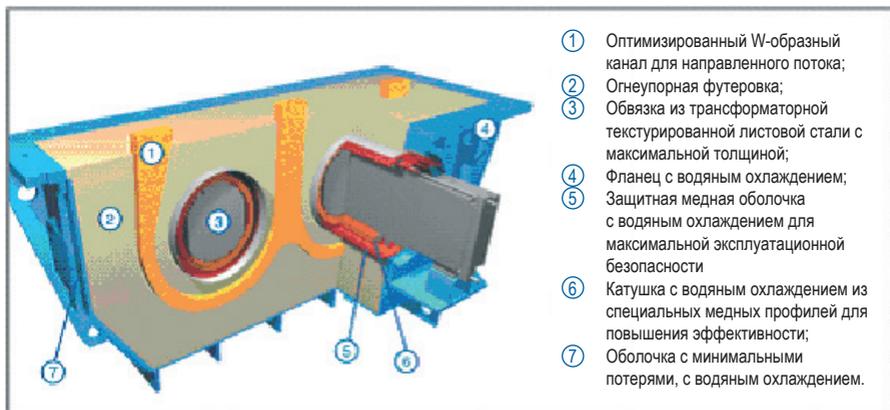


Рис. 16: Система двухконтурного индуктора

В печах высокой мощности рассеивание тепловых потерь в катушке и охлаждение агрегата осуществляется системой водяного охлаждения. Для установок меньшей мощности достаточно воздушного охлаждения.

Индукторы без сердечников используются лишь в исключительных случаях.

4.2 Модуль электропитания

Питание индукционной печи обеспечивается либо от электрической сети посредством соответствующего трансформатора (в этом случае печь называется «печь промышленной частоты»), либо от системы с преобразованием частоты, способной подводить переменный ток любой, чаще всего, более высокой частоты.

Печи с питанием посредством преобразователей работают в диапазоне средних частот от 110 Гц до 1000 Гц. В разработках новых тигельных печей они практически вытеснили установки промышленной частоты благодаря множеству преимуществ. Решающим преимуществом таких печей по сравнению с установками промышленной частоты является плавное регулирование мощности и отсутствие необходимости в коммутационных операциях.

Тигельные печи с питанием от преобразователей за счёт переменной (и более высокой) частоты с высокой эффективностью могут использоваться для переработки твердого шихтового материала, без потерь мощности, а также надёжно работают с удельной мощностью, которая в разы превосходит мощность печей промышленной частоты. Более того, в случае плавки с низким уровнем плавильного «болота» (например, для расплавления стружки) печь можно эксплуатировать с максимальной входной мощностью. Это обусловлено способом воздействия рабочей частоты на глубину проникания электромагнитного поля и движение ванны. При повышении частоты оба эти параметра снижаются (Рис. 17).

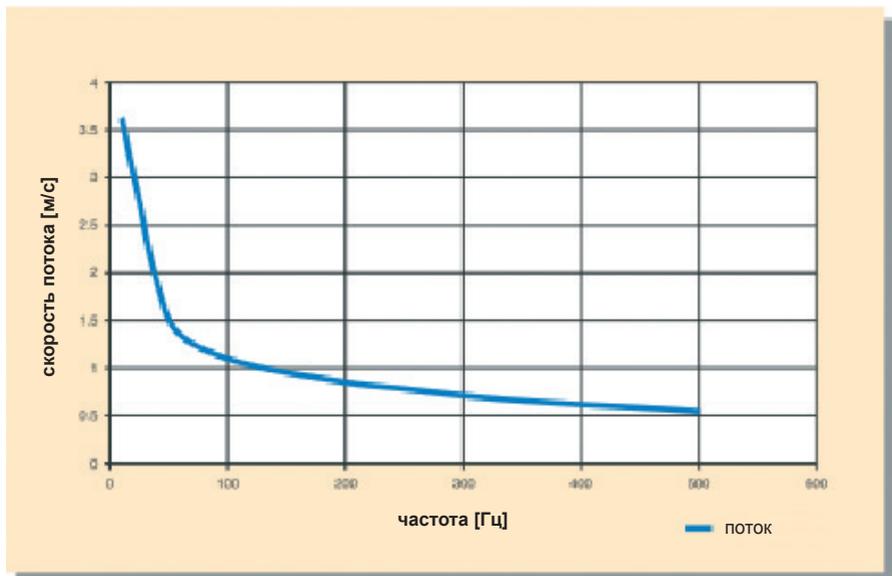


Рис. 17: Влияние частоты на движение ванны

В первых модулях питания средней частоты использовались преобразователи роторационного преобразователя. Их заменили магнитные преобразователи, увеличивающие частоту до 3-, 5- или 9-кратной величины промышленной частоты. Позднее они стали называться умножителями на три (150 Гц), умножителями на пять (250 Гц) и т.д.

Следует также упомянуть ламповые генераторы, хотя их применение ограничивается, главным образом, оборудованием высокой частотой, где требуется низкая выходная мощность, например, для лабораторного или научно-исследовательского применения и для специальных металлов.

В современном преобразователе частоты сетевое электропитание, поступающее через выпрямительный трансформатор, сначала выпрямляется. После этого из постоянного тока на выходе посредством инвертера генерируется тре-

буемое напряжение средней частоты. Для этих целей в качестве полупроводников могут использоваться триодные тиристоры или транзисторы, в частности, типа БТИЗ (биполярный транзистор с изолированным затвором).

Блок конденсаторов, расположенный между индукционной печью и преобразователем частоты, формирует резонансный контур в печи. Данный резонансный контур колеблется на собственной резонансной частоте (т.е., от 70% до 110% номинальной частоты в зависимости от уровня ванны печи). На Рис. 18 представлена базовая конструкция преобразователя с параллельным колебательным контуром. В настоящее время в основном используются преобразователи частоты двух типов, то есть, с параллельным или с последовательным резонансным контуром. Они различаются компоновкой схемы резонансного контура, образуемого индукционной печью и блоком конденсаторов.

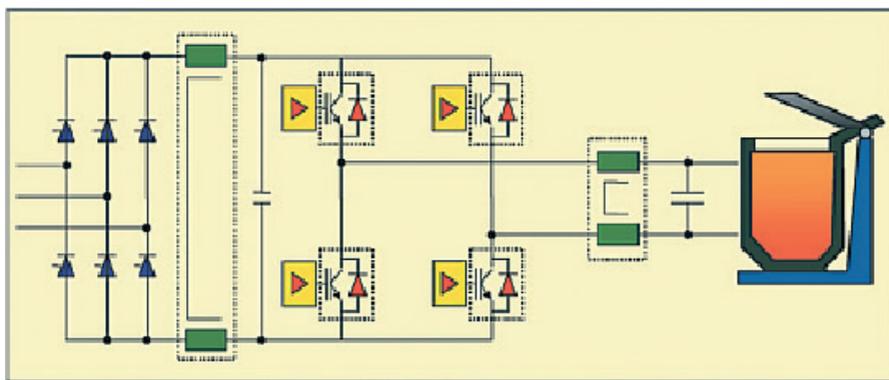


Рис. 18: Схема параллельного колебательного контура преобразователя

Преобразователи с параллельным колебательным контуром производства компании «ОТТО JUNKER» были специально разработаны для использования в индукционном плавильном оборудовании и отличаются безопасностью и надёжным функционированием даже в условиях предельной нагрузки. Цифровая система управления преобразователей обеспечивает стабильные выходные характеристики мощности в течение всего цикла нагревания, с оптимальным согласованием колебаний напряжения сети и изменяющихся условий нагрузки.

Такие преобразователи с параллельным колебательным контуром обладают следующими характеристиками:

- высокая эксплуатационная надёжность за счёт устойчивого соединения постоянного тока и сглаживающего реактора;
- малые нагрузки инвертера благодаря действию только активной составляющей тока (то есть, без воздействия тока печи, который выше 5-10);
- высокий электрический коэффициент полезного действия;
- 6-, 12- или 24-импульсная конструкция и
- простота в техническом обслуживании и высокая доступность.

Сегодня в выпрямительных и инвертирующих мостовых схемах используются, главным образом, тиристоры высокой мощности с водяным охлаждением.

Кроме испытанной технологии на основе тиристоров, в инвертерах всё чаще применяются усовершенствованные транзисторы.

Преобразователи частоты на базе усовершенствованных транзисторов БТИЗ отличаются следующими характеристиками:

- чрезвычайно высокая степень внутренней защиты от предельных нагрузок;
- постоянный высокий коэффициент мощности ($\cos \varphi$) почти 1,0 и
- невысокие требования к качеству охлаждающей воды /6/.

В настоящее время технология преобразователей на основе БТИЗ широко применяется для среднемощного оборудования до нескольких МВт (Рис. 19).



Рис. 19: Модуль преобразователя на базе БТИЗ

Эффективность различных систем преобразования частоты для индукционной плавки			
Тип	Эффективность, %	Частота, кГц	Номинальная мощность, кВт
Двигатель-генераторная установка	70 – 80	0,3 – 10	до 2000
Умножитель частоты	88 – 93	0,15 0,25 0,45	до 3000
Преобразователь с колебательным контуром (на базе тиристоров)	95 – 97	0,05 – 3*	до 20000*
Преобразователь с колебательным контуром (на базе транзисторов/БТИЗ)	95 – 97	0,05 – 1*	до 6000*

* возможны более высокие значения номинальной мощности

Таблица 1: Повышение эффективности по мере развития технологии преобразователя

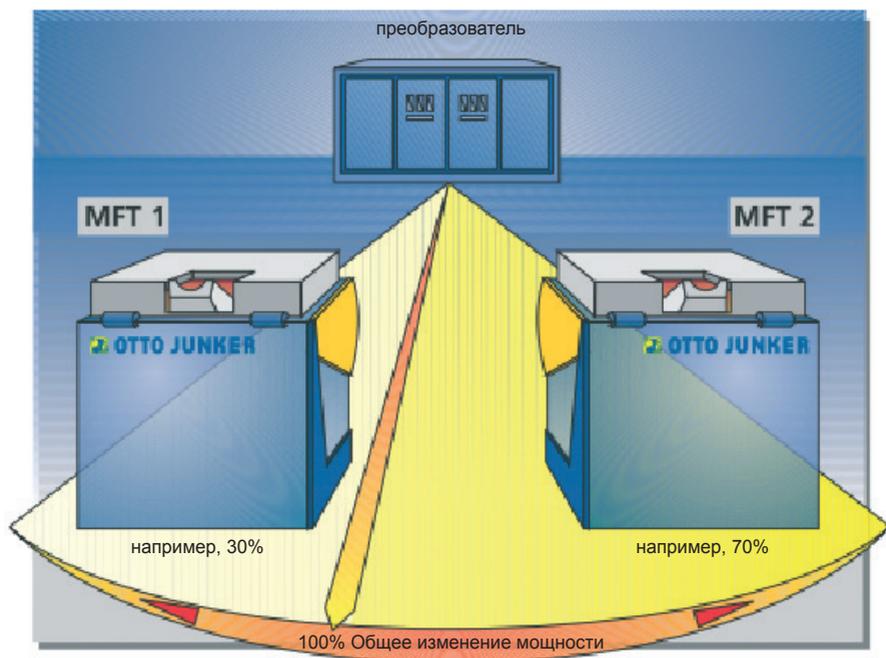


Рис. 20: Схема системы DUOMELT

Преобразователи частоты были преобразованы в надёжные системы высокой мощности, которые отличаются низкими потерями энергии и минимизацией возникновения помех в сети электропитания. Более того, они могут быть сконфигурированы для выполнения различных металлургических требований. В Таблице 1 продемонстрирован значительный рост эффективности, достигнутый за счёт последовательного развития технологии преобразователей /7/.

4.3 Специальные конфигурации контуров тигельных печей

Уже давно инженеры стремятся добиться полной номинальной выходной мощности таких сложных установок и максимально повысить показатель выплавки определённой системы. В результате появились разработки тандемных установок, ставших основой нашей технологии DUOMELT. В конфигурации такого типа две тигельные печи подключены к одному преобразователю частоты. При помощи специальной схемы контура общий выход преобразователя распределяется между печами в любом требуемом соотношении.

Это означает, что одна печь может использоваться для плавки высокой мощности, в то время как в другой печи проводится, например, легирование (Рис. 20).

С целью создания оптимальных условий для выполнения особых металлургических задач можно регулировать входную мощность, частоту печи и концентрирование мощности вдоль катушки печи с максимальной избирательностью.

В соответствии с этими требованиями компания «OTTO JUNKER» разработала две специальные конфигурации контуров, называемые технологиями Power Focus (технология концентрации мощности) и Multi-Frequency (многочастотная технология). Обе системы продемонстрировали отличные показатели в различных областях применения.

Технология концентрации мощности позволяет автоматически концентрировать мощность с выбором той секции (верхней или нижней) катушки, где это наиболее необходимо. Таким образом, если печь загружена только наполовину, входная мощность может быть направлена в нижнюю область тигля для подвода в эту секцию наибольшего количества мощности. С другой стороны, при максимальной загрузке печи входная мощность может быть направлена в верхнюю секцию катушки для создания движения ванны, например, с целью надлежащего перемешивания стружки.

Многочастотная технология предоставляет возможность изменять рабочую частоту в ходе цикла плавки. Допустим, при плавке шихтового материала применяется частота 250 Гц. Для ввода легирующих добавок система автоматически переключается на более низкую частоту (например, 125 Гц).

Испытания показали /8/, что растворение легирующих добавок можно существенно ускорить благодаря такому переходу на более низкую рабочую частоту. Кроме того, следует отметить, что можно также объединить обе эти конфигурации контуров в одну систему. Это повысит их эффективность.

4.4 Технология управления процессами

Преимущества современных технологий индукционных печей, в особенности в системах с высокой удельной мощностью, можно использовать в полной мере только в сочетании с системами автоматизации и компьютерного управления.

Базовая технология процесса основывается на непрерывном мониторинге содержимого печи посредством взвешивающего оборудования. После этого рассчитывается электрическая мощность, необходимая для достижения требуемой температуры плавки, и подводится только для загруженной массы шихты. Такой режим работы, ориентированный на процесс, в особенности на этапе максимального нагрева, обеспечивает важный фактор безопасности, учитывая, что скорости максимального нагрева могут достигать 30 К/мин. Система предотвращает излишний перегрев, экономит электроэнергию и снижает потери металла. При обработке сплавов с разными показателями энтальпии компьютер будет принимать это в расчёт, используя отдельные специфические энергетические значения.

Контроллер JOKS (система управления печи Junker) гарантирует надёжное и понятное управление и мониторинг всех функций плавки и последовательностей процесса. Кроме того, он отвечает за обмен данными и информацией с системами управления более высокого уровня, а также осуществляет регистрацию данных по шихте и выполняет функции составления отчётов.

Система JOKS (Рис. 21) разработана, главным образом, для интегрирования всех функций контроля и управления для всей цепочки процесса: от подготовки, загрузки шихты, плавки и анализа с коррекцией до использования вспомогательного и внешнего оборудования.

Функции автоматизации системы JOKS:

- расчёт состава шихты;
- составление шихты и загрузка в печь;
- расчёт требуемой мощности и оптимальной входной мощности для определённого сплава;
- оптимизация контроля температуры;
- расчёт добавок для коррекции анализа;
- максимальный нагрев до конечной температуры;
- режимы холодного пуска и спекания;
- активация специальных рабочих режимов и режимов печи (например, технология концентрации мощности и многочастотная технология);
- использование внешнего оборудования;
- обмен данными с системами управления процессами более высокого уровня и соответствующим оборудованием;
- контроль потребления энергии.

А также для разливочных печей:

- поддержание параметров разливки для определённого сплава;
- контроль скорости литья.

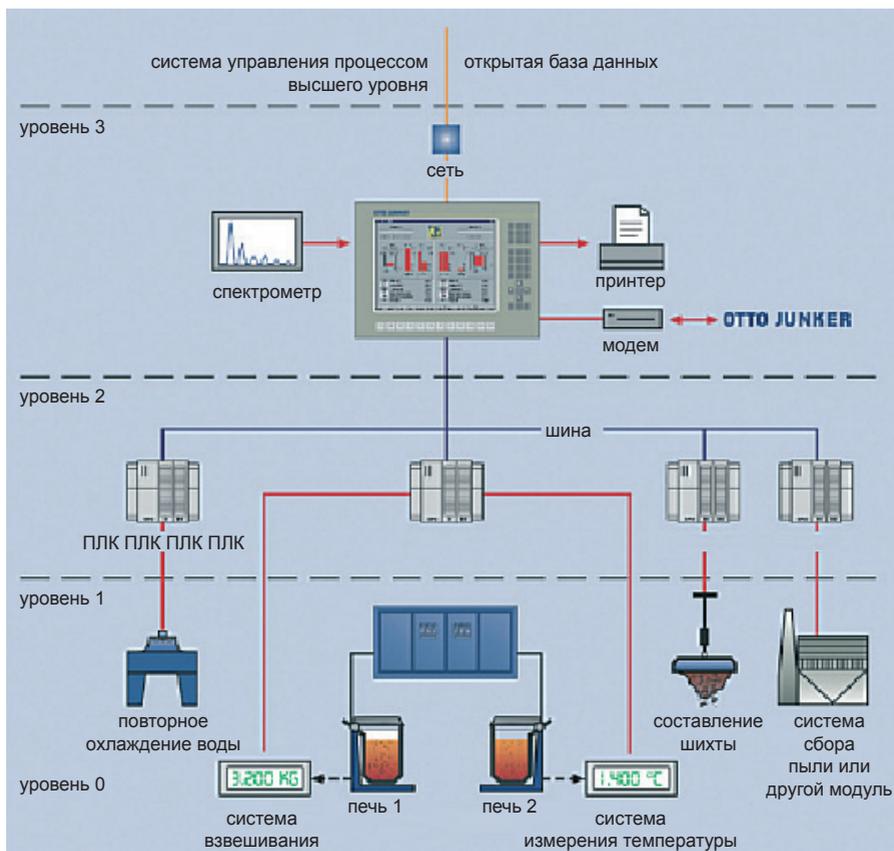


Рис. 21: Схема системы JOKS

Функции контроля системы JOKS:

- эрозия огнеупорной обшивки в тигле или канале;
- температура стенок тигля или канала (если используется оптическая система защиты катушки – OPC);
- контуры охлаждения;
- статус всего оборудования.

Функции записи данных системы JOKS:

- данные по мощности и процессам;
- отчёты о партии, отчёты о смене и ежемесячные отчёты;
- графики динамических изменений;
- аварийные сообщения.

Непрерывный контроль оборудования, поиск и устранение неисправностей, а также ввод настроек параметров также могут выполняться дистанционно, из любой точки (например, из главного офиса изготовителя печи) посредством связи с помощью модема.

4.5 Меры обеспечения безопасности

Предусмотрено несколько систем и функций, обеспечивающих безопасную эксплуатацию индукционных печей и надёжную защиту операторов от потенциальных опасностей. К ним относятся:

Аварийное устройство опрокидывания

В случае длительного отключения электропитания необходимо обеспечить возможность разгрузки печи. Для этого имеющийся гидравлический блок питания приводится в действие либо посредством гидравлического насоса при помощи баллонов с азотом, либо посредством аварийного генератора питания.

Аварийное водоснабжение

Во избежание повреждений катушки или индуктора следует обеспечить бесперебойную подачу воды в достаточном количестве. За исключением индукторов малой мощности, для этого используется система охлаждения водой с требуемыми параметрами. В аварийной ситуации охлаждение печи необходимо поддерживать до её полного остывания. В случае отключения питания и, следовательно, останова насоса воды охлаждения аварийная вода поступает из водопроводной сети или из резервуара для воды.

Подключение к источнику аварийной воды осуществляется с помощью электромагнитных клапанов, открывающихся при отключении электропитания.

Устройства электрозащиты

В условиях аварийной ситуации или во время проведения технического обслуживания или ремонта печи или силового блока следует отключить электропитание установки и обеспечить защиту от случайной активации.

Для этого в различных точках технологической линии предусмотрено несколько чётко обозначенных кнопок аварийного останова. При нажатии одной из этих кнопок расцепляется главный выключатель питания. Выключатель питания замыкается также при открытии двери одного из шкафов электроуправления.

Контроль замыкания на землю

Система контроля замыкания на землю и тигля служит для индикации угрозы прорыва тигля с одной стороны и замыкания на землю в электрической системе (в катушке печи, системе шин, конденсаторах, контакторах) с другой стороны. Для этих целей на дне печи предусмотрена заземляющая крестовина

для заземления ванны расплавленного металла. Катушка печи принимает на себя электрический потенциал соответствующего измерительного напряжения. В случае прорыва тигля ток проходит между катушкой печи и землёй, что подтверждается показаниями омметра (Рис. 22). Эта функция заземления ванны обеспечивает также защиту операторов, например, при контакте с шихтовым материалом или во время замеров температуры сварки.

Кроме того, в канальных печах имеется устройство непрерывного контроля протекания металла для проверки надлежащей изоляции канального индуктора. Это позволяет своевременно обнаружить короткое замыкание между защитной оболочкой и катушкой и явное протекание металла из канала в направлении защитной оболочки. Поскольку в результате таких неисправностей индуктор может выйти из строя, эта функция контроля является важным инструментом профилактического технического обслуживания и предотвращения потерь продукта.

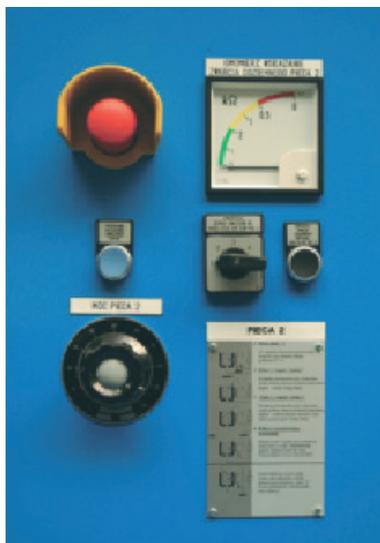


Рис. 22: Система контроля утечки на землю/ прорыва тигля

Оптическая система защиты катушки (ОСР) для тигельных и канальных плавильных печей

Система ОСР – средство непрерывного контроля и измерения температуры последнего поколения на основе оптоволоконных датчиков, которые специально предназначены для помехоустойчивого мониторинга индукционных плавильных печей. Такие датчики предоставляют непосредственные и независимые данные о температуре на месте.

Кабель датчика, заделываемый в постоянную футеровку печи (Рис. 23), позволяет измерять температуру на всей площади рядом с индукционной катушкой или каналом индуктора.

Отличительные характеристики системы:

- максимальная защита от простоев в работе, повреждений оборудования и травм оператора;
- ранее оповещение о возникновении условий критических температур;
- чрезвычайно высокое пространственное и температурное разрешение с точностью до 1 К;
- регистрация и визуализация температурных профилей в течение всего срока футеровки;
- прямое оптическое измерение температуры, не основанное на электрических схемах (Рис. 24).

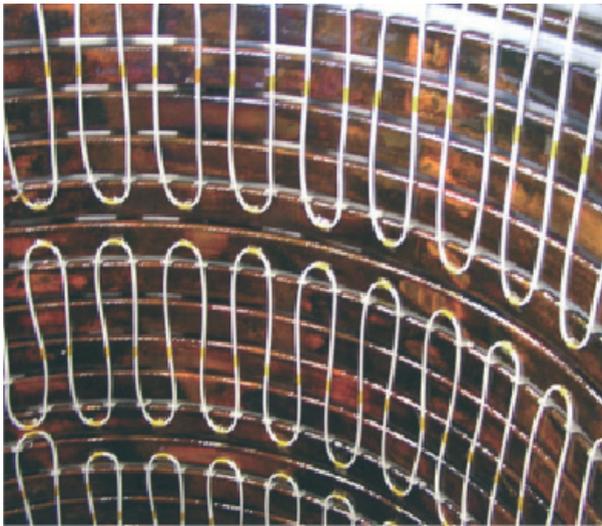


Рис. 23: Прокладка кабеля датчика ОСП в 12-тонной печи



Рис. 24: Оптическое измерение температуры

Защитное ограждение колодца печи

Раскрытие колодца печи, образующееся при наклоне печи, должно быть ограждено для предотвращения падения оператора или получения оператором травм. С этой целью печь оборудована системой защитного ограждения колодца, которое автоматически расширяется, закрывая колодец при наклоне печи.

Как правило, эта система включает в себя тройную раму ограждения и пневматические пружины с защитными трубками.



Рис. 25: Защитное ограждение колодца тигельной печи

Защита от электромагнитного поля

Экранирование магнитного поля обеспечивается короткозамкнутым кольцом, установленным над активной катушкой, плитой днища и ярмом, с радиальным расширением вокруг катушки. В результате вблизи печи может формироваться только слабое магнитное поле рассеяния (Рис. 26). Замеры, проведённые в нескольких печных установках компании «ОТТО JUNKER» для определения силы электромагнитного поля на рабочем участке оператора продемонстрировали, что эти поля в действительности очень слабые, значительно ниже допустимых пределов /10/.

Это обеспечивается оптимальной конструкцией оборудования и подбором размеров, в частности, ярма, с учётом удельной мощности печи и рабочей частоты. Не допускается эксплуатация тигельных индукционных печей без короткозамкнутого кольца и ярма, поскольку это может привести к превышению разрешённых пределов.

Электромагнитное поле канальной печи направляется замкнутой магнитной цепью сердечника (Рис. 16). Первичная и вторичная обмотка соединены напрямую, аналогично обмоткам трансформатора.

При правильных размерах сердечника магнитное поле рассеяния вне индуктора является незначительным.

Защита от шума

Низкий уровень шума печей достигается за счёт нескольких конструктивных особенностей. К ним относятся разделение и виброизолирующий монтаж компонентов, применение шумопоглощающих материалов и прочное крепление индукционной катушки (Рис. 27).

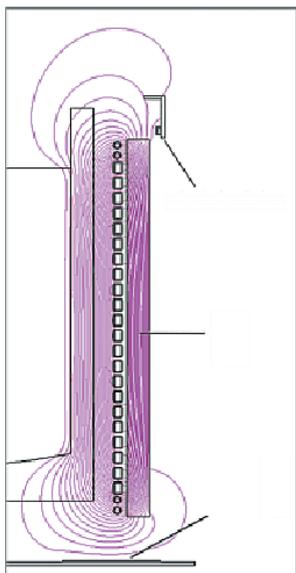


Рис. 26: Экранирование магнитного поля тигельной печи



Рис. 27: Виброизолирующий монтаж элементов (жёлтого цвета)

4.6 Огнеупорная футеровка

Тип и качество огнеупорной футеровки влияет на потребление мощности и металлургические характеристики печной установки и определяет безопасность и надёжность эксплуатации.

Огнеупорная футеровка должна обеспечивать должную теплоизоляцию и надлежащую защиту катушки или индуктора. Помимо устойчивости к тепловым нагрузкам в условиях высоких температур расплавленной меди и быстрым изменениям температуры футеровка должна выдерживать механические напряжения, создаваемые давлением расплава и тяжёлым шихтовым материалом. При этом следует минимизировать металлургические реакции с расплавом и шлаком. Необходимо принять меры, предотвращающие проникание расплавленного металла в пустоты или стыки футеровки.

Не только выбор футеровки требует тщательности и специальных знаний. Для её подготовки и установки также необходим опыт и строгое соблюдение порядка монтажа. Даже небольшие ошибки при монтаже футеровки могут существенно сократить срок её службы.

Огнеупорная футеровка укладывается, как правило, в несколько слоёв для создания надлежащей теплоизоляции катушки/индуктора и кожуха печи и требуемой защиты от проникания металла. Стандартная обкладка тигельной печи огнеупорной футеровкой представлена на Рис. 28:

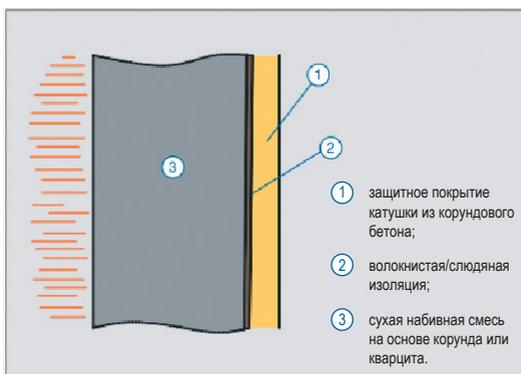


Рис. 28: Огнеупорная обкладка тигельной печи

На Рис. 29 и Рис. 30 представлена структура огнеупорной футеровки канальной индукционной печи.

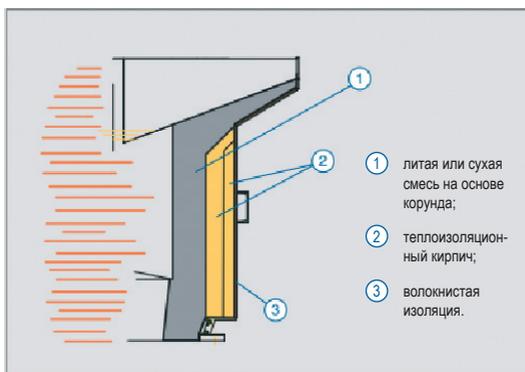


Рис. 29: Огнеупорная обкладка кожуха канальной печи

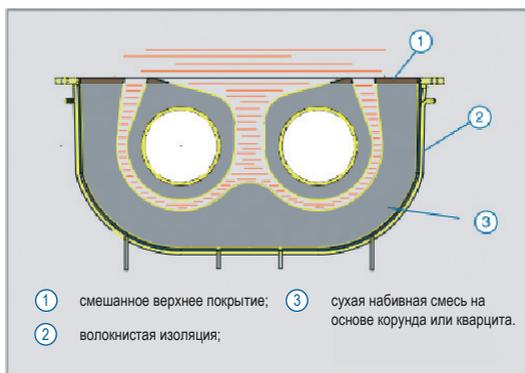


Рис. 30: Огнеупорная обкладка канального индуктора

На вопрос, какой именно огнеупорный материал идеален для данного материала на основе меди и типа печи, сложно дать однозначный ответ. Практика показала, что оптимальные результаты могут быть получены с использованием различных решений футеровки.

На основе исследований процессов статической и непрерывной заливки в литейных цехах по изготовлению меди в Германии были получены следующие результаты /11/:

Для плавки чистой или низколегированной меди в канальных печах используются различные марки огнеупорных материалов – от кварцита до соединений, содержащих корунд. Такие материалы применимы для футеровки как кожуха печи, так и индуктора.

В случае плавки латуни и бронзы в канальных печах рекомендуется использовать кварцитовые массы (но не только их). Согласно Е. Дётшу /12/ для футеровки индукторов, предназначенных для печей плавки латуни, могут применяться и кварцитовые (кислые), и меллитовые сухие огнеупорные смеси.

Тигельные печи для меди, латуни и бронзы футеруются, преимущественно, кислыми сухими смесями. В среднечастотных тигельных индукционных печах высокой мощности использование высокосортной сухой вибрационной смеси на основе меллита может обеспечить максимальную безопасность, надёжность и экономичность /13/.

Тигельные печи меньшего размера также оснащены борными глиняно-графитовыми или карбидокремниевыми тиглями, в особенности для производства специальных сплавов.

Футеровка горячей стороны из кирпича, который применяется вместо набивных смесей или огнеупорного бетона, используется реже. Только тигельные печи очень больших размеров и канальные печи барабанной или тигельной конструкции иногда футеруются огнеупорной кирпичной кладкой.

В случае высокой коррозии и термомеханических напряжений используется также футеровка из высокосортного магнезитового или хромомagneзитового кирпича.

Разумеется, применяются другие высококачественные огнеупорные футеровки для специальных процессов и выполнения особых металлургических требований. Например, при заливке снизу вверх (см. пункт 8.2.2, стр. 79) для достижения требуемых металлургических характеристик используется графическая футеровка.

4.7 Вспомогательное оборудование

Для максимального повышения эффективности и надёжности общего процесса необходимо тщательное планирование и расчёты при выборе внешнего и вспомогательного оборудования.

К такому оборудованию относятся:

- оборудование предварительного разогрева лома и катодов (Рис. 31);
- захваты катодов;
- загрузочные ковши (подъёмники) или подъёмные/опрокидывающие устройства;
- загрузочные желоба;
- специальные вытяжные колпаки (например, для расплавления стружки);
- толкатели или лопасти (для погружения стружки и т.п.);
- станции заполнения разливочных печей;
- перегрузочные литейные желоба/ ковши;
- системы пропускания пузырьков газа;
- оборудование для сбора пыли;
- устройства очистки тиглей;
- системы извлечения тигля.



Рис. 31: Устройство разогрева катодов

5 Выбор и эксплуатация разных типов печей

5.1 Критерии применения

Два основных принципа технологии индукционных печей, т.е. плавка в тигельной печи или в канальной печи, представляют собой вескую альтернативу для плавки меди. Тем не менее, в зависимости от технологических требований и задач обработки предпочтительным является выбор одного из этих двух типов печей.

В установке канального типа индуктор(-ы) может (могут) быть закреплён(-ы) к днищу и/или к боковым стенкам печи. Это предлагает практически неограниченные возможности для проектирования кожуха печи, помимо исключительной совместимости для интегрирования сифонов.

Ключевое преимущество канальных печей, в частности, состоит в значительной экономии энергии (почти 100 кВт-час/т по сравнению с тигельными печами) в случае плавки чистой меди. С другой стороны, интенсивное и контролируемое движение ванны в тигельных печах более практично для расплавления стружки и легирования, а также для металлургической переработки (такой как окислительная плавка). Более того, в тигельной печи предусмотрена возможность существенного ослабления движения ванны благодаря переключению частоты на более позднем этапе цикла плавки (например, с целью предотвращения чрезмерного поглощения кислорода). При этом, что касается периодического процесса и замены сплавов, тигельная печь является гораздо более гибким оборудованием.

В ходе сравнения двух основных типов печей, описанных в Таблицу 2, были сделаны следующие выводы:

Индукционные печи канального типа используются для процессов со следующими характеристиками:

- низкие удельные мощности;
- большие рабочие объёмы;
- объёмные шихтовые материалы (катоды и т.п.);
- выпуски плавки большого веса;
- непрерывный режим работы.

Сравнение индукционных печей тигельного и канального типа для плавки меди		
	Канальная печь	Тигельная печь
Потребление энергии/1200°C	250–280 кВт-час/т	340–380 кВт-час/т
Эффективность	73% – 82%	54% – 60%
Удельная мощность	средняя	высокая
Потери плавки (стружка)	низкие	очень низкие
Перемешивание стружки	среднее	отличное
Объёмный шихтовый материал	отлично	умеренно
Непрерывный режим работы	отлично	хорошо
Периодический режим работы	не рекомендуется	отлично
Замена сплавов	сложно	просто
Обработка расплава	умеренно	отлично
Футеровка	сложная	простая
Однородность температуры	хорошая	отличная
Возможности геометрии кожуха	отличные	ограниченные

Таблица 2: Сравнение характеристик канальной печи и тигельной печи для плавки меди

Применение тигельных печей в следующих рабочих условиях является более целесообразным:

- высокая удельная скорость плавления относительно рабочего объёма;
- высокая удельная мощность;
- стружка и шихтовые материалы малых размеров;
- частые замены сплава;
- возможность разделения легирующих элементов;
- длительные перерывы и остановки в работе.

Разливка

Для разливки канальная печь предлагает следующие преимущества:

- гибкость геометрии конструкции;
- простое интегрирование сифона и форкамеры;
- несколько камер печи и
- возможность обеспечения герметичности конструкций.

Эта информация позволит принять верное решение при выборе типа печи.

5.2 Рекомендации по применению

Задача выбора наиболее подходящего типа печи может быть решена на основе систематической оценки металлургических, инженерно-технологических и экономических критериев, характеризующих определённый производственный процесс /1/. Поэтому в качестве руководящих принципов рекомендуется использовать следующие примечания.

5.2.1 Плавка

Плавка обычной меди проводится, главным образом, в печах канального типа. Эта печь характеризуется универсальностью в части формы и геометрии и быстро приспособляется к определённым производственным требованиям. В частности, в печь можно загружать катоды больших размеров. Невысокая гибкость не является недостатком, поскольку, чаще всего, эта печь используется для производства только одного сорта меди. Прочность огнеупорной футеровки достаточно высока при условии обеспечения мер, предотвращающих возникновение чрезмерно высоких концентраций кислорода. Учитывая, что такие печи отличаются отсутствием значительного движения ванны, ванна расплавленного металла эффективно защищена от поглощения газа посредством древесного угла.

Если для плавки меди используется тигельная печь, движение ванны может быть ограничено путём выбора соответствующей частоты, поскольку в противном случае расплав поглощает слишком большое количество кислорода. Для этого оптимально подходит тигельная индукционная печь, в которой применена многочастотная технология, поскольку позволяет переключать печь на более высокую или более низкую частоту, в зависимости от требований к обработке.

Практика показала, что для плавки латуни применимы оба типа меди, хотя предпочтение, чаще всего, отдаётся канальной печи. Тигельные печи показывают хорошие результаты плавки материалов небольших размеров, например, стружки. В этом случае интенсивное движение ванны представляет собой преимущество.

Для обычных литейных цехов гибкость печи считается приоритетным качеством. Поэтому в таких случаях решение принимается в пользу тигельной печи. Простая разгрузка упрощает замену сплавов. Однако при вводе ценных легирующих элементов следует учитывать риск загрязнения нового сплава веществами, оставшимися в огнеупорной футеровке после предыдущей плавки. Дополнительной гибкости можно добиться за счёт использования системы горячей замены для корпуса печи. Кроме того, это поможет решить проблемы, упомянутые выше (см. также стр. 62).

Параметры удельной мощности и частоты могут быть подобраны для определённой группы сплавов с целью предотвращения таких проблем, как, например, частичное испарение легирующих добавок или чрезмерное поглощение газа.

При производстве сплавов, которые могут настывать на огнеупорной футеровке, тигельная печь является единственным решением, поскольку в этом случае канальная печь экономически нецелесообразна по причине значительного сокращения срока службы футеровки канала. Один из примеров, который заслуживает внимания, является сплав CuAl5Zn5Sn1 , так называемое «северное золото», используемое для изготовления монет Евро /14/. С другой стороны, поглощение газа, неизбежное в тигельной печи (и неприемлемое для этого сплава), требует проведения дополнительного этапа обработки – дегазации. Для этого в днище печи встраиваются пористые пробки или используется импеллер, как, например, в алюминиевой промышленности /15/.

В частности, для изготовления содержащих алюминий сплавов, таких как упомянутое выше «северное золото», тигельная печь применяется в качестве установки для выдержки и разливки. В таких случаях вполне приемлемы недостатки этой печи, то есть, довольно высокая потребность в мощности и ассиметричные тепловые нагрузки, действующие на огнеупорную футеровку по причине медленной разгрузки печи /16/.

При производстве судовых гребных винтов для обработки многокомпонентной алюминиевой бронзы используются тигельные индукционные печи с укороченной катушкой, ёмкостью свыше 100 тонн. Это единственный способ накопления больших объёмов металла, необходимых для отливки крупногабаритных гребных винтов.

Скорость плавки таких печей весьма низкая для такой ёмкости, поскольку их задача заключается в подготовке расплава к циклу разливки в течение определённого времени (которое зависит опять же от сплава).

В литейных цехах по производству полуфабрикатов с изменением состава сплавов успешно используются мощные тигельные печи средней частоты. Переход к изготовлению другой группы медных сплавов, даже в кратчайшие сроки, осуществляется без осложнений при помощи устройств горячей замены для ула катушки.

Дополнительная гибкость достигается благодаря тому, что в системах средней частоты предусмотрена возможность бесступенчатого распределения полной выходной мощности преобразователя между двумя индукционными печами. Это позволяет проводить процесс легирования в первой печи, а плавку металла с высокой мощностью – во второй печи /18/.

Для отливки в песчаные формы и кокильной отливки для обработки различных сплавов в сменных сборных глиняно-графитовых или карбидокремниевых тиглях используются тигельные печи меньших размеров, ёмкостью от 50 кг до 3000 кг, с возможностью быстрой частой смены сплавов.

5.2.2 Выдержка и разливка

Тип и конструкция печей для выдержки и разливки определяются, главным образом, применяемой на месте технологии литья. При этом ключевым условием является подача расплавленного металла.

Если расплавленный металл подаётся посредством жёлоба или разливочной воронки, целесообразно использовать гравитационную разливку из сливной трубы кожуха тигельной или канальной печи, если допустимо возникающее поглощение газа. В противном случае расплавленный металл следует разливать сифонным способом. Для этого в тигельной печи разливка металла должна осуществляться при помощи качающейся опоры.

Для разливки непосредственно в изложницу или в пресс-форму с использованием системы стопорного устройства рекомендуется печь канального типа с форкамерой, которая предотвращает воздействие окружающего воздуха на расплав, тем самым, обеспечивая высокую степень чистоты металла. Кроме того, при такой конфигурации печи нагревание может осуществляться также индуктором без сердечника.

В случае горизонтальной непрерывной разливки изложница, определяющая геометрию непрерывной заготовки, как правило, встраивается в стену разливочной печи. Именно поэтому для такого применения, чаще всего, выбирают канальные индукционные печи.

Печи с разливкой под давлением, обычно используемые для литья под низким давлением, практически всегда имеют канальную конструкцию /19, 20/. Это же относится к разливочным печам с подачей непрерывной отливки /21/. Объясняется такое решение сложностью обеспечения герметичности и газонепроницаемости тигельных печей. Разумеется, дополнительным важным преимуществом канальных печей является малое потребление энергии.

Применение автономных тигельных печей для разливки и выдержки ограничивается особыми условиями; в ряде случаев такие печи проектируются как установки с укороченными катушками.

В цехах по производству сплавов автономные разливочные печи либо не используются вовсе, либо устанавливаются тигельные печи с укороченной катушкой. Печь с укороченной катушкой отличается от канальной печи более низким электрическим коэффициентом полезного действия. Однако благодаря низким тепловым потерям потребление энергии такой печи для процесса выдержки ненамного превышает этот показатель канальной печи. Печь с укороченной катушкой может также работать с полной входной мощностью даже при низком уровне плавильного «болота», что создаёт идеальные условия легирования по сравнению с печными системами канального типа.

6 Параметры и эксплуатационные характеристики

6.1 Канальные печи

Производительность и скорость плавки канальных печей могут существенно различаться, обеспечивая широкие возможности проектирования геометрии кожуха печи, а также высокую гибкость в выборе номинальной мощности и количества индукторов. Максимальная номинальная мощность индукторов, используемых в настоящее время, может составлять от 2000 кВт до 2400 кВт. Каждый из индукторов печи канального типа с двумя индукторами мощностью 2000 кВт может расплавлять 16 тонн в час при среднем потреблении энергии 250 кВт·час/т [22].

С другой стороны, количество индукторов, как правило, не ограничивается конструкцией (геометрией кожуха печи). Многие из печей такого типа оборудуются двумя индукторами. Однако печи канального типа с четырьмя индукторами, например, встречаются нечасто.

Оснащение несколькими индукторами может быть целесообразным даже в небольших печах. Таким образом, разливочная печь низкого давления «INDUGA-KWC» ёмкостью 1800 кг оборудована тремя компактными индукторами. Установка выполняет плавку со скоростью 300 кг/час [19]. Особая причина использования в этом случае трёх индукторов заключается в соответствующем балансировании нагрузки в трёх фазах сетевого источника электропитания.

Индукторы высокой мощности должны отвечать следующим основным требованиям:

- высокая скорость теплообмена между индуктором и кожухом печи;
- предотвращение локального превышения потока на участках канала, что может привести к чрезмерному износу огнеупорной футеровки;
- минимизация потерь энергии в индукторе и сокращение потребления энергии;
- снижение риска нарушения (сжатия) потока расплава в канале при неполной загрузке печи;
- простота в техническом обслуживании, ремонте и при замене деталей.

Для выполнения этих отчасти противоречивых требований наилучшим способом требуются долгие годы практики и всестороннего числового моделирования.

Разработанная серия индукторов большой мощности (Таблица 3) объединяет в себе высокий электрический коэффициент полезного действия с продолжительным сроком службы огнеупорной футеровки и отличной эксплуатационной надёжностью.

Тип индуктора	Мощность [кВт] для меди	Скорость плавки [т/час] для меди	Мощность [кВт] для латуни	Скорость плавки [т/час] для латуни
WRI 300*	300	0,9	400	1,7
WRI 500*	500	1,6	600	2,6
WRI 850	850	3,0	1000	4,7
WRI 1000	1000	3,5	1200	5,6
WRI 1400	1400	5,2	1600	7,4
WRI 2000	2000	7,4	2400	11,2

* с воздушным охлаждением

Таблица 3: Серия индукторов для плавки меди

Диапазон мощности от 300 кВт до 2000 кВт (и до 2400 кВт для латуни) обеспечивает необходимую гибкость при выборе наиболее подходящих параметров оборудования для определённой скорости плавки и типа печи.

Эти индукторы успешно используются в печах ёмкостью от нескольких до 50 тонн и выше (например, 3-тонная печь с индуктором мощностью 600 кВт или 50-тонная печь с двумя индукторами мощностью 2050 кВт).

Для специальных печей выдержки и разлива (например, печи для литья под низким давлением) разработаны индукторы малой номинальной мощности, которые показали отличные результаты в ходе испытаний.

6.2 Тигельные печи

Независимо от особенностей конструкции такие печи можно отнести, в основном, к двум типам: стандартные тигельные печи с катушкой, охватывающей тигель практически по всей высоте, и так называемые установки с укороченной катушкой, которая охватывает только нижнюю треть тигля.

Системы электропитания, в состав которых входит усовершенствованное оборудование преобразования частоты, позволяют использовать тигельные индукционные печи с частотами от 60 Гц до 500 Гц и выше. В отличие от систем с питанием промышленной частоты, такие решения обеспечивают возможность надёжного контроля параметров высокой удельной мощности от 300 кВт-час/т до 600 кВт-час/т, в зависимости от параметров печи и рабочей частоты.

В Таблице 4 приводятся максимальные эксплуатационные параметры для печей с наиболее применимыми параметрами.

Ёмкость [кг]	Максимальная мощность для меди [кВт]	Максимальная скорость плавки для меди 1) [кг/час]	Максимальная мощность для латуни Ms 58 [кВт]	Максимальная скорость плавки для латуни Ms 58 2) [кг/час]
600	400	1000	400	1400
900	500	1200	500	1700
1200	600	1500	600	2100
1800	900	2300	900	3100
2400	1200	3000	1100	3800
3600	1800	4700	1400	4800
4800	2400	6200	1600	5500
6000	2800	7400	1800	6200
7200	3200	8500	2000	7000
9600	4000	10800	2500	8800
12000	4500	12200	2900	10500
14400	5000	13600	3300	12000
16000	5500	14800	3600	13300
20000	6300	17100	4300	15600
30000	8000	21700	6000	21800

1) Значения применяются для частоты 120 Гц и крупных шихтовых материалов.
 2) Значения применяются для частоты 120 Гц и крупных шихтовых материалов.
 При плавке стружки указанные номинальные параметры следует уменьшать до 80% – 85%.

Параметры тигельных печей для плавки меди

Печь с укороченной катушкой считается установкой для выдержки и разливки. В особых случаях она может классифицироваться как альтернатива канальной печи, поскольку объединяет в себе малое потребление энергии канальных печей и гибкость тигельных печей.

Для того чтобы использовать преимущества обоих типов печей в одном агрегате, был разработан так называемый комбинированный плавитель.

Комбинированная плавильная печь тигельного/канального типа имеет кожух тигельной конструкции, который оборудован индуктором в нижней секции печи и укороченной кольцевой катушкой в верхней секции /23/. Эта печь используется для плавки стружки.

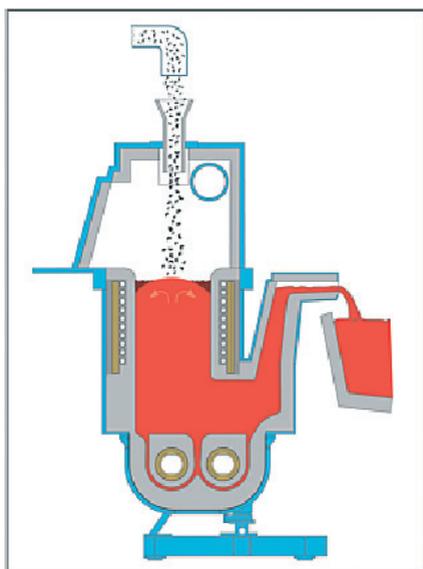


Рис. 32: Комбинированная печь тигельного/канального типа

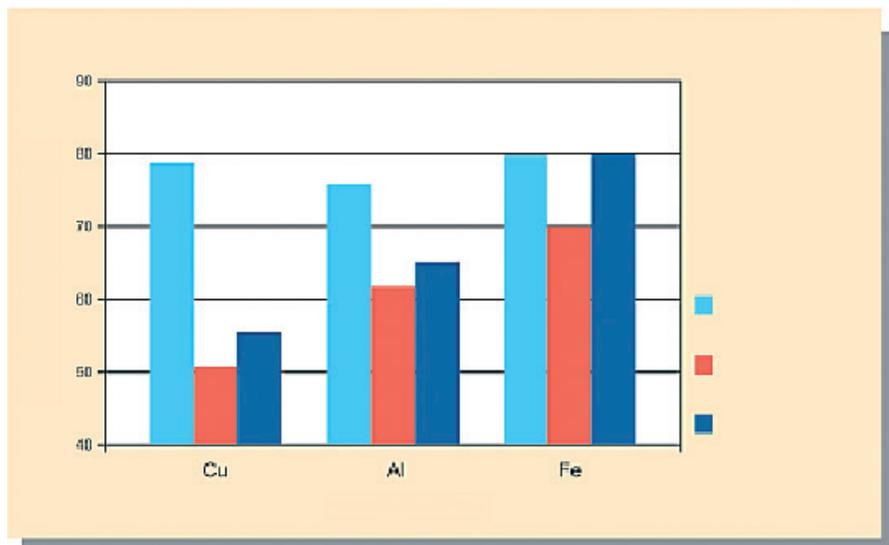


Рис. 33: Эффективность индукционной печи в зависимости от материала и типа печи

7 Экономия энергии и снижение затрат

7.1 Ключевые факторы

Ключевыми факторами, влияющими на потребление энергии для проведения плавки в соответствии с определёнными условиями, являются:

- тип печи;
- конструкция печи, номинальные характеристики и размерные параметры;
- режим эксплуатации;
- управление производственным процессом.

Таким образом, меры по снижению потребления энергии сфокусированы на двух направлениях: Во-первых, на этапе технического планирования и проектирования необходимо учесть минимизацию потерь электрической и тепловой энергии оборудования и выбрать оптимальную конфигурацию оборудования. Во-вторых, при эксплуатации печей следует избегать дополнительных затрат энергии по причине неверного режима эксплуатации [24].

7.2 Тип печи

Применение индукционного принципа для плавки металлов влечёт за собой потери электрической и тепловой энергии печи, величина которых зависит от расплавляемого металла и от типа используемой печи. Установлено, что при обработке металлов с низким электрическим сопротивлением, таких как алюминий и медь, помимо более высоких потерь по сравнению с плавкой чёрных металлов, разница этих характеристик для двух базовых типов печей (тигельных или канальных) также является существенной (см. Рис. 33).

7.3 Конструкция печи, номинальные характеристики и размеры

Влияние на потребление энергии оптимизации конструкции печи и определённых номинальных характеристик и размеров печи показано на примерах.

Потери электрической энергии в катушке или индукторе являются самым большим коэффициентом потерь. Поэтому целесообразно, прежде всего, рассмотреть способы значительного снижения таких потерь.

В конструкции индукторов большой мощности для крупных канальных печей с целью определения распределения поля и шаблона рассеяния было применено числовое моделирование электромагнитного поля. На основе моделирования в конструкцию были внесены изменения, в том числе в размеры окна ярма, размеры площади поперечного сечения канала и конструкцию охлаждающей рубашки. В результате потери энергии индуктора были снижены на 40%. Это соответствует сокращению потребления энергии в процессе плавки на 5% /25/ (Рис. 34).

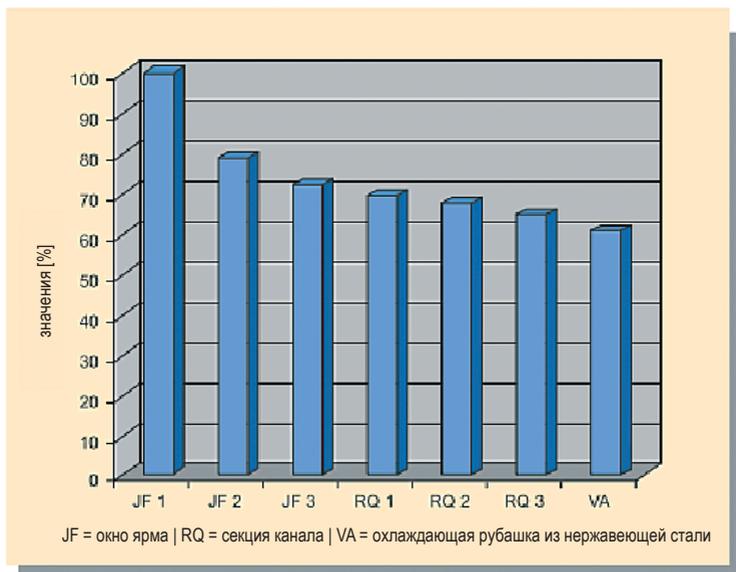


Рис. 34: Снижение потерь в индукторе высокой мощности путём оптимизации конструкции

Для тигельных индукционных печей существенное снижение потерь энергии в катушке была достигнута благодаря новой концепции экономии энергии, которая разрабатывалась компанией «OTTO JUNKER» в течение нескольких лет интенсивных научных исследований и проектирования и была испытана на надёжность и практическую эффективность в ходе всесторонних экспериментов.

Омические потери в катушке в значительной степени зависят от площади токопроводящей поверхности катушки и, следовательно, от плотности тока катушки.

Однако электромагнитные силы концентрируют ток на небольшой части общей площади поперечного сечения катушки, что повышает плотность тока. Особая конструкция катушки позволяет сократить площадь токопроводящей поверхности и, соответственно, потери.

На Рис. 35 представлены результаты, достигнутые в плавке меди в тигельной печи. Увеличение эффективной площади токопроводящей поверхности катушки до 160% относительно стандартной площади катушки позволило достичь 9%

экономии энергии в ходе максимального нагрева меди. Этому способствовало повышение общей массы меди в новой катушке всего на 10%.

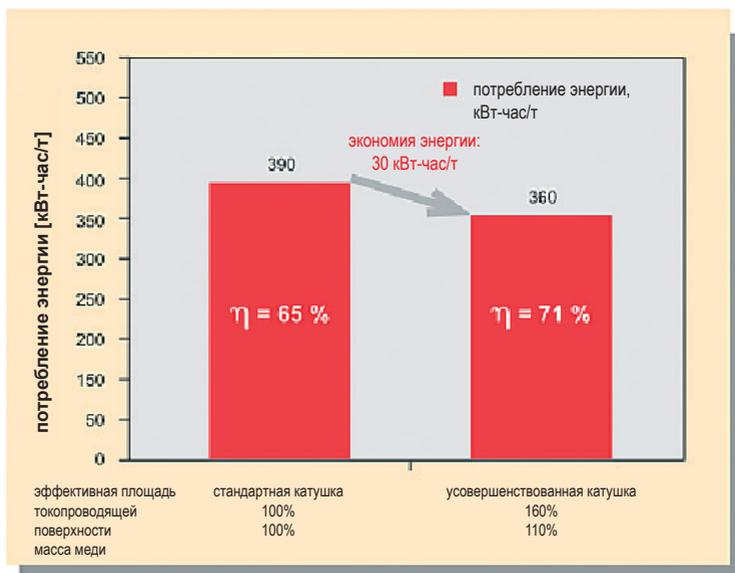


Рис. 35: Результаты использования энергосберегающей катушки

Достигнутый высокий уровень эксплуатационной надёжности и функциональных показателей подтверждают промышленную эффективность системы /25/. Значительная часть катушек, используемых в настоящее время в промышленности, приходится на новые энергосберегающие катушки.

Вообще потребление энергии печи зависит, в основном, от удельной мощности. Чем выше удельная мощность (кВт/т), тем ниже потребление энергии в процессе плавки. Это обеспечивается лучшим соотношением энергии, затрачиваемой на выдержку, и номинальной мощностью, а также более высокой эффективностью.

Если тигельные печи работают на средней частоте, а не на промышленной частоте, применяемая удельная мощность может быть увеличена в два – три раза без создания интенсивного движения ванны. Это существенно сокращает потребление энергии на 10%, как показано на Рисунке 36.

Кроме того, для того чтобы пользоваться выгодой такой экономии, при выборе плавильной печи средней частоты необходимо учитывать, что удельная мощность должна быть максимально возможной (в допустимых технологических пределах).

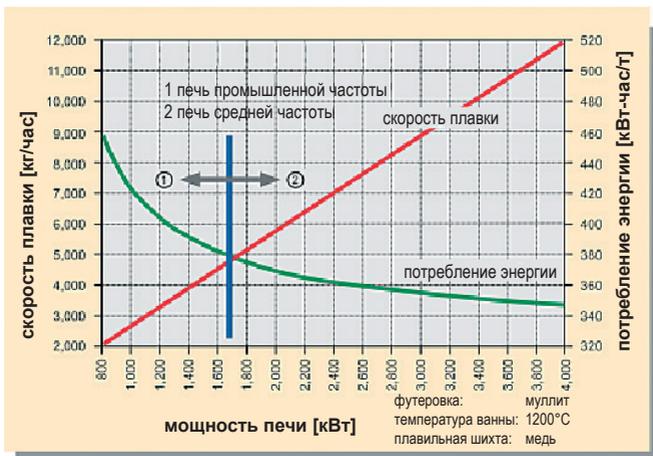


Рис. 36: Влияние номинальной мощности на потребление энергии 10-тонной тигельной печи

Поскольку катушка должна быть защищена керамической футеровкой, между токопроводящей катушкой и расплавляемым металлом предусмотрен определённый интервал. Для 10-тонной тигельной плавильной печи, например, этот так называемый электромеханический воздушный зазор составляет 120 мм.

Чем больше зазор, тем ниже эффективность катушки и входная мощность печи (Рис. 37). Уменьшение толщины футеровки, например, в результате износа огнеупорной футеровки в ходе длительной эксплуатации снижает потребление мощности на 8% – 10%.



Рис. 37: Соотношение между толщиной футеровки (зазором) и эффективностью катушки

Этот потенциал экономии следует применять осмотрительно при повторной футеровке печи по той причине, что толщина новой огнеупорной футеровки не должна быть чрезмерной. В частности, при использовании современной системы контроля катушки, такой как оптическая система защиты катушки ОСР /9/, достаточно большие резервные поля по толщине футеровки могут быть удалены без какого-либо ущерба для безопасности и надёжности эксплуатации печи.

7.4 Режим эксплуатации печи

Как правило, предпочтительным режимом эксплуатации печи считается непрерывный режим, поскольку повторяющиеся процессы охлаждения и разогрева потребляют дополнительное количество энергии, а также отрицательно влияет на огнеупорную футеровку. Что касается тигельных индукционных печей, энергия, необходимая для разогрева из холодного состояния, втрое превышает энергию выдержки, потребляемую в течение такого же интервала времени (Рис. 38). Таким образом, в случае кратковременных перерывов и простоев в работе продолжительностью до четырёх часов, если позволяют условия эксплуатации, рекомендуется поддерживать температуру печи, но не допускать её остывания.

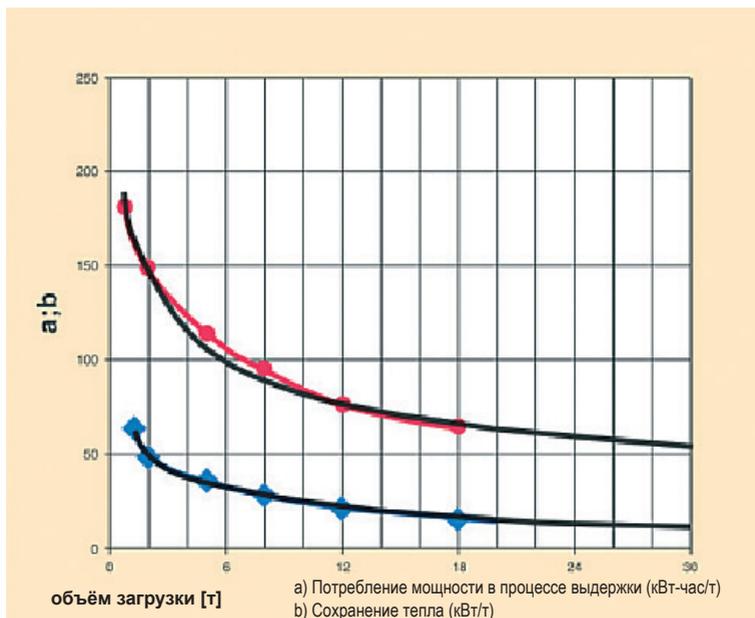


Рис. 38: Потребление энергии в процессе выдержки и сохранение тепла в виде функции ёмкости тигля

Пример 60-тонной канальной печи для плавки меди, приведённый на Рис. 39, подтверждает, что работа печи с полной номинальной мощностью является предпочтительной в показателях потребления энергии. Эксплуатация печи

со средней номинальной мощностью вместо полной номинальной мощности 4000 кВт повышает потребление энергии с 260 кВт/час до 285 кВт/час на тонну, что означает напрасный расход энергии в 10%.



Рис. 39: Зависимость потребления энергии от номинальной мощности 60-тонной канальной печи

Следует отметить, что такой способ экономии энергии можно использовать, только если внешнее оборудование, а также технологическая последовательность позволяет использовать печь с максимальной мощностью.

Энергия расходуется дополнительно при работе печи с открытой крышкой дольше, чем это необходимо. Малые потери тепла в усовершенствованных печах, величина которых не превышает 275 кВт для 15-тонной установки, например, могут увеличиваться до 600 кВт в случае эксплуатации с открытой крышкой. Это приводит к росту потребления энергии в 6 кВт/мин времени, когда крышка открыта.

Расход энергии может расти при работе вытяжной системы на максимальной мощности, когда отработанные газы не вырабатываются, или вырабатываются в малом объёме. В неблагоприятных условиях это может увеличить потребление энергии более чем на 3%.

Ещё одной причиной расхода может быть ненужный максимальный нагрев расплавленной меди, учитывая, что повышение температуры на 50 К требует энергии 15 кВт/час на тонну. Процессор контроля плавки JOKS позволяет поддерживать конечную температуру с точностью до 5 К. Это исключает нецелесообразное выполнение максимального нагрева.

В случае плавки в тигельных индукционных печах дополнительной экономии энергии поможет соблюдение следующих рекомендаций:

- Использовать компактный шихтовый материал с высокой плотностью упаковки. По возможности – разрезать крупные сегменты на части.

- Загружать в печь чистый и сухой материал. Остаточный песок (из песочных форм), например, потребляет приблизительно 500 кВт.час/т во время плавки.
- Загружать шихтовый материал быстро, без простоев, и всегда стараться поддерживать высокий уровень ванны.
- По возможности применять полную номинальную мощность, предусмотренную для плавки. Избегать ненужного максимального нагрева и излишней эксплуатации вытяжной системы.
- Для расплавления стружки поддерживать плавильное «болото» выше 40% и обеспечивать непрерывную подачу стружки.

7.5 Сокращение расходов на энергию

Внедрение инновационной системы контроля потребления энергии, например, системы производства компании «Dr. Tanneberger GmbH», может существенно сократить расходы на энергию без каких-либо технологических или производственных потерь. Эта система основана на принципе предотвращения временных максимальных электрических нагрузок путём линейного снижения мощности отдельных потребителей под тщательным контролем посредством компьютерной системы.

В отличие от обычных схем сбрасывания нагрузки путём отключения, компьютер не отсоединяет отдельных потребителей полностью, а незначительно снижает входную мощность для нескольких агрегатов одновременно, на основе анализа процесса.

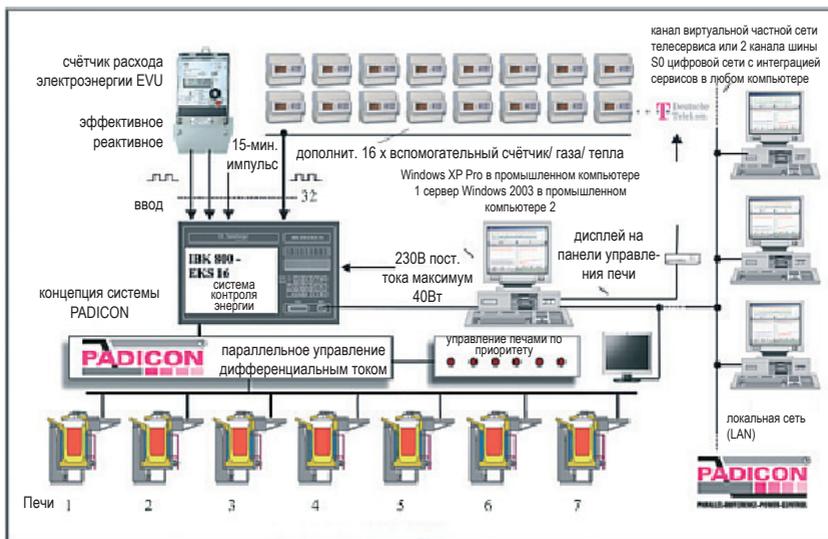


Рис. 40: Архитектура системы контроля потребления энергии (производства компании «Dr. Tanneberger GmbH»)

Сокращение расходов, достигнутое таким образом, может составлять более 20%. В случае новых капиталовложений в технологическое оборудование планирование изначально может быть основано на меньшей общей нагрузке подключения /26/.



Рис. 41: Система плавки и разливки бескислородной меди



Рис. 42: Печь с укороченной катушкой для выдержки и разливки

8 Стандартное применение

8.1 Печи и печные установки

8.1.1 Плавка и разливка

Печи канального типа для плавки и разливки бескислородной меди

Ведущий в Германии производитель меди эффективно использует индукционные печи канального типа для плавки/ разливки бескислородной меди /27/.

В состав установки входит плавильная печь барабанной конструкции ёмкостью 55 тонн и два индуктора высокой мощности 2050 кВт каждый, плюс печь разливки и выдержки ёмкостью 45 тонн с одним индуктором такой же конструкции.

Источник питания с бесступенчатым регулированием оборудован двумя системами преобразования частоты на базе тиристоров.

Шихтовый материал состоит исключительно из медных катодов, которые подаются в плавильную печь посредством загрузочного жёлоба.

Расплавленный металл перегружается из сифона плавильной печи в разливочную печь по керамической трубе. Таким образом, минимизируется риск поглощения газа.

Разливочная печь оборудована форкамерой с патрубками. Расплавленный металл поступает в машину непрерывной отливки при опрокидывании печи и открытии патрубков.

Очищение расплава осуществляется при помощи пропускания пузырьков газа.

Для очистки и технического обслуживания разливочная печь может перемещаться максимум на 6 метров под прямыми углами относительно линии изложницы.

Печь выдержки и разливки с укороченной катушкой

Если применение требует частой смены сплавов в печи разливки и выдержки, целесообразно будет использование печи с укороченной катушкой (Рис. 42), что подтверждается следующим примером.

В данном случае печи с укороченной катушкой ёмкостью 50 тонн и номинальной мощностью 1200 кВт, с частотой 70 Гц предназначены для выдержки и раз-

ливки, с подачей медных сплавов в машину непрерывного вертикального литья. Прецизионная система опрокидывания печи с компьютерным управлением поддерживает постоянный уровень металла в разливочной воронке машины непрерывного литья. При планировании новых инвестиций такой тип печи обеспечивает достижение отличных результатов, что стимулирует оператора сделать выбор в пользу двух печей с укороченной катушкой.

Несмотря на то, что электрическая эффективность печи с укороченной катушкой ниже этого показателя установки канального типа, в процессе выдержки она потребляет энергии не на много больше, чем канальная печь, благодаря низким тепловым потерям. Более того, смена сплавов происходит очень быстро, и печь может быть перезапущена в незагруженном состоянии.

Тигельная индукционная печь с системой горячей смены

В данном случае требования к применению могут быть описаны следующим образом:

Для выплавки различных медных сплавов с быстрой сменой циклов гибкость должна сочетаться с точным контролем анализа плавки. Необходимо обеспечить меры, предотвращающие попадание в расплав загрязнений из футеровки печи в процессе смены сплава.

Решение заключается в оборудовании печи системой горячей смены, которая позволяет осуществлять замену горячего корпуса печи в течение приблизительно 2 часов. Для этих целей печь оснащается специальными муфтами в каналах подачи воды, а также передвижной системой повторного охлаждения воды (Рис. 43). Передвижной блок повторного охлаждения воды используется для охлаждения снятого корпуса печи до полного устранения риска повреждения катушки и футеровки печи. На заводе используется несколько таких корпусов печи, которые хранятся в специальных станциях подогрева и обслуживания. Для каждой группы сплавов предназначен отдельный корпус печи.

Тигельные печи с возможностью выбора особой конструкции разливочной системы

Ещё одно особое требование к тигельным индукционным печам с подачей в машину непрерывной отливки состоит в предотвращении возникновения свободно падающего разливочного потока, если это возможно. Эта проблема была решена путём направления разливки непосредственно через качающуюся опору печи в разливочную воронку машины непрерывной отливки. За счёт малой высоты падения разливочного потока минимизируется поглощение газа (Рис. 44).

Такой же результат достигается путём перегрузки расплавленного металла в разливочную воронку через керамическую трубу сифонного типа в сливную трубу печи.



Рис. 43: Устройство горячей смены

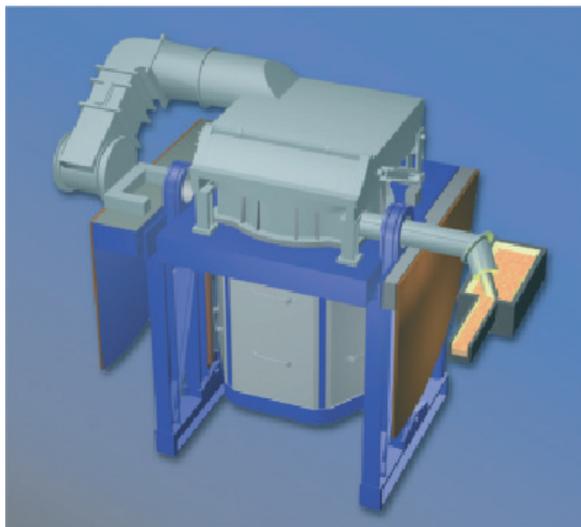


Рис. 44: Тигельная индукционная печь с разгрузкой металла через качающуюся опору

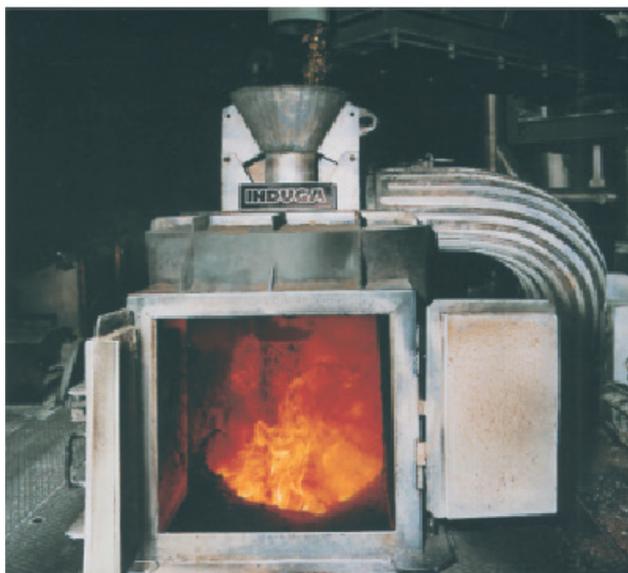


Рис. 45: Установка для плавки стружки

Печь для плавки стружки

Учитывая преимущества тигельной индукционной печи (например, регулируемое перемешивание и повышенная пропускная способность по сравнению с канальной печью идентичной ёмкости), такой тип оборудования сегодня широко применяется для переработки стружки, и практически полностью заменил свой аналог канального типа. Однако даже в обычных тигельных системах, как правило, требуется сушка влажной стружки перед загрузкой в печь. Этап сушки означает дополнительные расходы. По этой причине была разработана концепция оборудования /28/, которая позволяет экономично перерабатывать влажную латунную стружку (Рис. 45). Для этого в общий технологический процесс необходимо интегрировать систему загрузки стружки, печной колпак и управление отведением газов и ввести режим управления процессами и систему автоматизации, в зависимости от качества стружки и пропускной способности.

При дозированном добавлении стружки очень важно обеспечить надлежащее высушивание и сгорания всех остатков масла, прежде чем стружка достигнет поверхности ванны. Таким образом, скорость загрузки согласовывается с мощностью печи и контролируется с целью предотвращения перегрузки или перегрева печи в случае недостаточного количества стружки, вследствие чего происходит испарение цинка в большом объёме (в случае латунной стружки). Оптимальный рабочий режим определяется путём постоянного контроля веса загрузки в печь и входной мощности печи при помощи процессора контроля плавки. Сгорание остатков масла или эмульсии на стружке обуславливает высокую температуру отработанных газов в колпаке печи. В некоторых случаях

эти температуры могут превышать 1000°C. Керамическая футеровка печного колпака плюс водяное охлаждение первой секции вытяжного воздуховода предупреждают образование токсичных веществ и обеспечивают надёжное функционирование системы фильтрации.

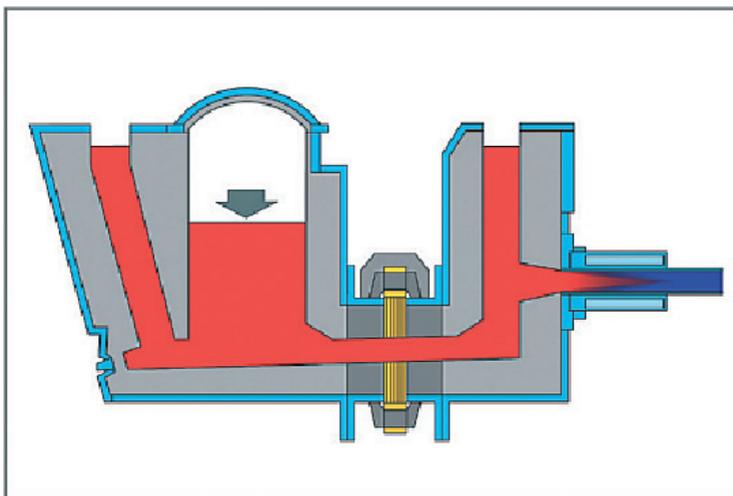


Рис. 46: Разливочная печь для машины горизонтальной непрерывной отливки

Разливочная печь для машины горизонтальной непрерывной отливки

Разливочная печь, описываемая ниже, включает в себя всего три камеры, которые нагреваются индуктором, встроенным в кожух печи (Рис. 46).

- камера наполнения,
- камера давления,
- камера разливки с формой, связанной с печью,

Давление газа в центральной камере автоматически контролируется для поддержания постоянного уровня металла в разливочной камере. Интервалы, с которыми металл перегружается из плавильной печи в разливочную установку, могут быть увеличены, если это позволяет ёмкость разливочной печи. Это делает печь менее зависимой от циклов разливки. При этом достигается более высокая гибкость, и снижаются капитальные затраты /29/.

К наиболее важным функциям печи относятся:

- постоянный определённый уровень ванны в камере разливки, обеспечивающий неизменное статическое давление на поверхность непрерывной заготовки;
- высокий уровень ванны в камере наполнения, повышающий качество плавки за счёт уменьшения высоты падения разливочного потока во время заливки;

- закрытое исполнение, снижающее окисляющее воздействие на расплав;
- альтернативное использование индуктора без сердечника, расширяющее диапазон применения, включая специальные сплавы;
- существенное сокращение количества шлака и потерь металла;
- простая и быстрая замена форм;
- разделение операций дозагрузки и разливки.

Печь разливки под давлением для литья в песчаные формы (заполнение полости снизу)

Эта печь предназначена для использования в высокоэффективных машинах автоматической формовки. В конфигурациях с двумя печами такого типа, попеременно выполняющих приём и разливку металла, отливается в целом 180 опок в час с высокой точностью и надёжностью.

Печь спроектирована специально для данной технологии. В её состав входит камера давления и камера наполнения, в дополнение к секции подъёма и участку патрубка (Рис. 47). Нагревание осуществляется индуктором канального типа, устанавливаемым на днище печи.

Для заполнения изложницы робот снимает опоку с линии пресс-формы и укладывает её на проходное отверстие патрубка печи. В печи создаётся давление, и металл нагнетается через патрубок в полость. Процесс заполнения полости занимает приблизительно 20 секунд. Затем робот возвращает опоку на линию пресс-формы. Поскольку скорость разливки зависит исключительно от режима давления, но не от скорости заполнения полости, имеется возможность применять любые требуемые профили разливки.

Эта технология отличается высоким качеством литья и сокращением брака /20/.

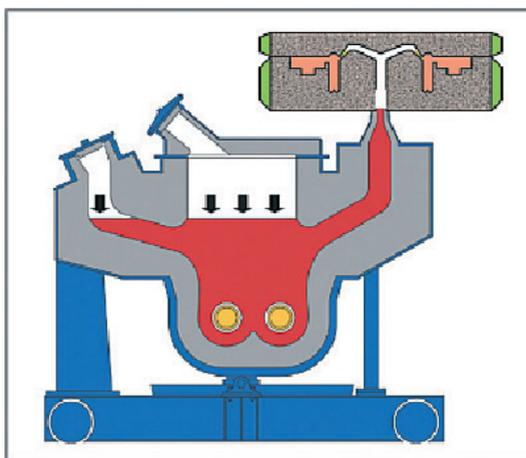


Рис. 47: Печь разливки под давлением для линии литья в песчаные формы

8.1.2 Печи для специальной обработки

Печь для легирования

Метод восстановления с использованием фосфорной меди для снижения уровня кислорода требует точной дозировки добавляемых восстановителей. Этого можно добиться только путём непрерывного контроля концентрации кислорода и остаточного фосфора.

Метод простого добавления фосфорной меди в перегрузочный жёлоб между печью выдержки и машиной непрерывной отливки, который широко применялся ранее, сегодня зачастую уже не отвечает требованиям к точности состава плавки. В качестве альтернативы внедряется более предпочтительный способ использования отдельной печи для легирования, которая позволяет добиваться точной дозировки и контролировать температуру, в дополнение к полной гомогенизации плавки.

Печь для легирования отличается разделением на камеру легирования и камеру гомогенизации. Между ними устанавливается индуктор, так что эти камеры соединяются тремя участками канала (Рис. 48). Подвод индукционного тепла не только обеспечивает полное соответствие заданной температуре, но и создаёт интенсивное перемешивание ванны. Легирующие присадки вводятся в камеру легирования с точной дозировкой, где сначала происходит их расплавление, затем смешивание с основным металлом. Посредством каналов индуктора поток металла поступает в камеру гомогенизации.

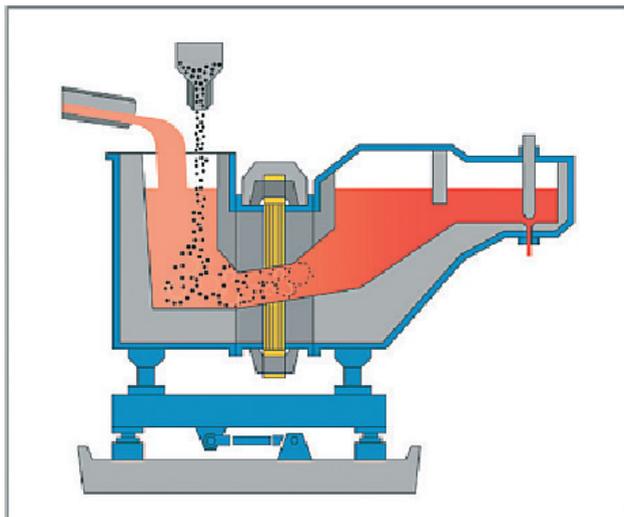


Рис. 48: Печь для легирования

Размеры камеры гомогенизации подобраны таким образом, чтобы обеспечить надлежащее уравнивание состава плавки во время выдержки металла.

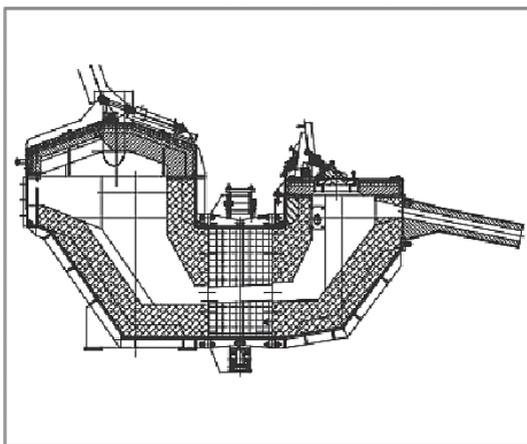


Рис. 49: Печь для удаления шлака

Печь легирования оборудована форкамерой, из которой расплав направляется в форму машины непрерывной отливки посредством регулируемого стопорного устройства. Для достижения воспроизводимых результатов разливки рекомендуется поддерживать постоянный уровень ванны печи, насколько это возможно.

Постоянный уровень металла, независимо от положения стопорного устройства, может быть обеспечен путём определения веса печи с использованием датчиков нагрузки.

Подача расплава из печи выдержки, расположенной выше в технологической линии, контролируется в процессе наклона этой печи для поддержания неизменного веса печи для легирования /30/.

Печь для удаления шлака

При плавке шихтовых материалов на основе меди, в частности тех, которые были предварительно расплавлены в шахтной печи, неизбежно образуется шлак, который необходимо удалять.

Далее перечислены функции такой печи:

- полное разделение шлака и меди;
- прецизионный контроль температуры и компенсация тепловых потерь;
- минимизация воздействия воздуха на расплав.

Эти задачи успешно решаются с использованием отдельной печи для удаления шлака с индукционным нагревом, которая обладает более четкими преимуществами по сравнению с обычным блоком удаления шлака /31/.

Конструкция печи для удаления шлака, описываемая ниже, подтвердила свою эффективность в течение многих лет успешной эксплуатации.

Установка имеет ёмкость 6 тонн, и оборудована двумя камерами (камера удаления шлака, и перегрузочная камера), а также интегрированным индуктором. Две камеры соединяются между собой участками канала индуктора (Рис. 49). Жидкая медь из печи плавки, расположенной выше в технологической линии, поступает в первую камеру печи для удаления шлака посредством перегрузочного жёлоба. Крышка с гидравлическим приводом в задней части камеры позволяет удалять шлак даже в процессе работы печной системы. Операции удаления шлака необходимо проводить два – три раза в смену, в зависимости от качества шихтового материала. Из камеры удаления шлака расплав подаётся через участки канала индуктора, в котором осуществляется подогрев жидкого металла, в перегрузочную камеру. Номинальная мощность индуктора составляет 250 кВт. Поэтому он способен не только компенсировать тепловые потери, но и разогревать медь до температуры приблизительно от 1100°С до 1120°С. Температура меди измеряется с помощью термопары в перегрузочной камере, и соответствующим образом осуществляется контроль входной мощности печи.

Из перегрузочной камеры максимально нагретая медь после удаления шлака поступает в печь выдержки или разливки посредством перегрузочной трубы.

Дополнительные преимущества печи для удаления шлака:

- скорость потока металла в камере удаления шлака значительно снижается, что обеспечивает надлежащее отделение шлака от металла;
- перегрузка металла через каналы происходит ниже уровня ванны, за счёт чего чистая и гомогенизированная медь поступает в перегрузочную камеру;
- перегрузочная труба имеет только один открытый выпуск из перегрузочной камеры, таким образом, минимизируется воздействие воздуха на расплав.

8.2 Комплектные производственные линии

8.2.1 Производство отливок

Линия плавки и разливки для машины литья в песчаную форму

Современные формовочные машины, способные выпускать свыше 200 опок в час, успешно используются для экономически эффективного производства отливок по форме, близкой к окончательной. Они могут применяться для изготовления санитарных приборов из медных сплавов.

В состав общей линии входит плавильная печь, печь выдержки и печь разливки в конфигурации с расширением по высоте на четыре уровня (Рис. 50). В результате расплавленная медь может поступать непосредственно из одной печи в другую посредством закрытых жёлобов.

На первом уровне шихта расплавляется в индукционной печи, способной также переплавлять стружку и лом. Из этой плавильной печи расплавленный металл направляется в печь накопления и выдержки посредством жёлоба.

Расплав, поступающий из печи выдержки, распределяется по разливочным печам, размещённым на линии формования (уровень 3). Уровень 4 состоит из формовочной машины, рабочий цикл которой составляет приблизительно 30 секунд.



Рис. 50: Линия по производству санитарных приборов

Основной частью этой комплексной линии плавки и разливки является разливочная печь. Она состоит из трёх печных камер, соединённых между собой сифонами. В центральной камере создаётся давление, и эта камера служит для накопления расплава. В дополнение к этому предусмотрена форкамера и камера наполнения.

По мере нагнетания давления в главной камере уровень ванны в форкамере остаётся неизменным, поскольку она пополняется металлом после каждой операции разливки.

Уровень ванны в форкамере контролируется датчиками для поддержания постоянного металлостатического напора на участке стопорного устройства. Разливка в формы и регулировка потока жидкой меди обеспечивается системой стопорного устройства в форкамере. Точность системы управления стопорного устройства гарантирует строгое соответствие графику разливки, предварительно определяемому при помощи функции обучения. Благодаря цинку, содержащемуся в разливаемых медных сплавах, образование испарений с окисью цинка предотвращается оптической системой измерения.

Точность дозирования до 1% (относительно уставки веса разливки) подтверждает пригодность выбранной системы /32/.

Линия для литья под низким давлением

Этот метод рекомендуется для производства коррозионно-стойких полых латунных отливок сложных форм, например:

- санитарные приборы;
- клапанные коробки;
- корпуса для счётчиков воды;
- спринклеры.

Литьё под низким давлением представляет собой экономически эффективный способ производства выше перечисленных компонентов.

В состав всей системы входит индукционная печь плавки и разливки, блок манипулятора для формы многократного использования, ванна формовочной краски и электронная система управления с пультом оператора /19/.

На начальном этапе цикла литья манипулятор в рабочей зоне оператора устанавливается в положении литейного стержня. Песчаный литейный стержень позиционируется вручную. Затем запускается процесс литья, и манипулятор возвращается в зону литья. В это время в индукционной печи создаётся требуемое давление разливки. После установки пресс-формы на трубу подъёмника расплав снизу нагнетается в пресс-форму с контролируемой скоростью повышения давления. Этот способ обеспечивает плавный безвихревой процесс заполнения полости.

По завершении цикла разливки и отверждения металла пресс-форма автоматически снимается с подъёмника и перемещается в положение разгрузки. После снятия отливки пресс-форма покрывается формовочной краской. Для этого две половины пресс-формы погружаются в ванну формовочной краски определённой температуры, где они охлаждаются до требуемой температуры и при этом покрываются формовочной краской. Отсюда манипулятор возвращает половины пресс-формы в исходное положение, после чего можно устанавливать новый литейный стержень.

После закрытия пресс-формы в разливочной печи создаётся давление. На основе программы обработки отливки повышение давления и режим давления в ходе цикла разливки можно регулировать в соответствии с формой отливки для достижения оптимального качества. Разливочная печь имеет ёмкость 1800 кг, и её нагрев осуществляется при помощи трёх индукторов.

Печь поддерживает и ручную, и автоматическую загрузку расплавленным металлом или твёрдым сырьём. Пропускная способность составляет около 300 кг/час, что позволяет выпускать 500 – 900 отливок за смену, в зависимости от конфигурации оборудования.



Рис. 51: Современная линия литья под низким давлением для материалов на основе меди



Рис. 52: Индукционная печь



Рис. 53: Манипулятор

8.2.2 Литьё полуфабрикатов

Машина горизонтального непрерывного литья для производства медных заготовок труб

Система, описанная далее, предназначена для производства грубых перфорированных заготовок из фосфористой бескислородной меди, которые затем раскатываются в трубы на планетарном прошивном прокатном стане.

К основным компонентам относятся следующее оборудование:

- система загрузки катодов;
- система загрузки лома;
- две плавильные печи канального типа;
- разливочная индукционная печь;
- машина непрерывного литья;
- отрезное и разгрузочное оборудование.

Шихтовый материал может состоять из медных катодов и лома из материалов на основе меди. Катоды устанавливаются в печь через люк в колпаке при помощи захвата, который полностью погружает их в ванну плавильной печи. Лом загружается посредством вибрационных желобов.

Ёмкость каждой плавильной печи канального типа составляет 7 тонн.

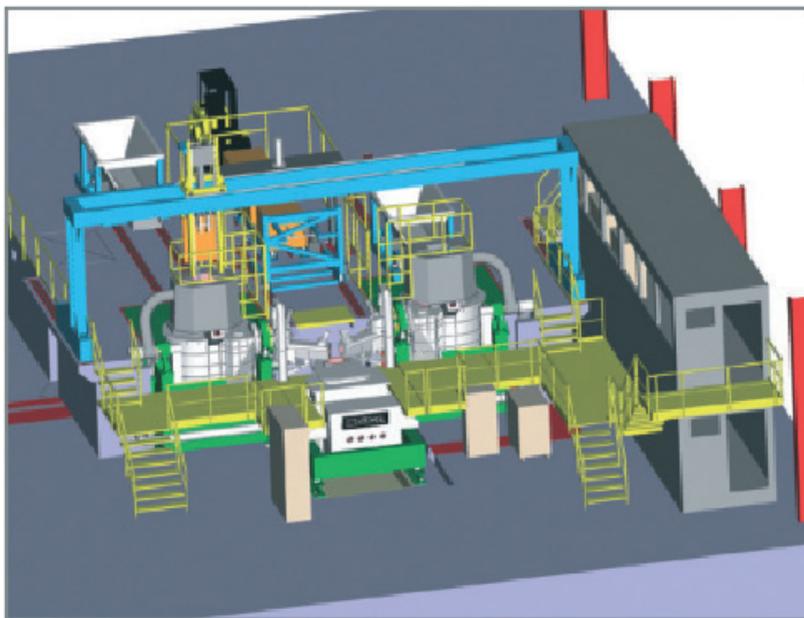


Рис. 54: Линия по производству заготовок труб

Номинальная мощность индуктора в каждой печи составляет 900 кВт. Для восстановления плавки в печь добавляется фосфор. Жидкая медь перегружается в разливочную печь партиями посредством сифона и подогреваемого жёлоба.

Разливочная печь представляет собой многокамерную индукционную установку с подогревом, работающую под давлением. В её состав входят три камеры: камера загрузки, камера давления и камера разливки. Разливочная камера подогревается при помощи канального индуктора мощностью 350 кВт трёхслойной конструкции. Камера давления оборудована пористой пробкой, через которую пропускаются пузырьки газа. Давление в печи создаётся с использованием азота. Общая ёмкость печи составляет около 10 тонн, полезная ёмкость составляет 6 тонн /33/.

Особая конструкция этой печи предлагает следующие преимущества:

- быстрая смена форм;
- постоянный металлостатический напор;
- разделение операций разливки и дозагрузки;
- малые потери металла.

Линия сочетает в себе пассивные меры предотвращения нежелательного поглощения кислорода расплавом с активными способами, направленными на минимизацию остаточного содержания кислорода. За счёт использования применимого шихтового материала с низким содержанием кислорода и требуемого восстановления путём добавления фосфора и пропускания пузырьков газа в разливочной печи непосредственно перед разливкой достигаются уровни концентрации кислорода в расплаве менее 20 ppm.

Машина вертикального непрерывного литья для производства плоских заготовок из бескислородной меди

Плоские заготовки, изготавливаемые на этой комплексной линии, впоследствии перерабатываются в медные листы с высокой проводимостью. Шихтовый материал состоит исключительно из медных катодов Сорта А.

К основным компонентам относятся следующее оборудование:

- система загрузки катодов;
- печь разогрева катодов;
- система загрузки катодов;
- плавильная индукционная печь барабанного типа;
- разливочная индукционная печь;
- индукционная разливочная печь;
- машина непрерывного литья.

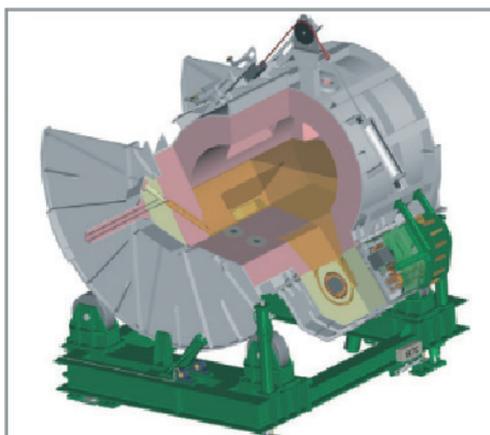


Рис. 55: Индукционная печь канального типа для плавки катодов

Катоды помещаются на ленточный конвейер в пачках, затем разделяются посредством вакуумного подъёмника и подогреваются до температуры 200°C в газовой печи. Туннельная печь состоит из трёх камер с мощными горелками и вентиляторами для равномерного распределения горячего воздуха. На выходе из печи предварительного нагрева катоды извлекаются за-хватами и погружаются в индукционную печь барабанного типа во избежание окисления. Ванна накрывается толстым слоем древесного угля, который предотвращает дополнительное поглощение кислорода и выводит кислород, попадающий в ванну с катодами. Пропускание через расплав пузырьков активного или инертного газа снижает содержание в нём кислорода до 10 ppm. Для этого в днище печи предусмотрены две пористые керамические пробки, через которые нагнетается газ в расплав. Такая плавильная печь имеет общую ёмкость 30 тонн и оснащена двумя индукторами канального типа 1200 кВт, обеспечивающими выпуск плавки 10 т/час.

Расплавленная медь непрерывно перегружается в разливочную печь, с предотвращением воздействия воздуха, посредством сифона и трубы, заканчивающейся в полый качающейся опоре печи с форкамерой. Разливочная печь такого типа ёмкостью 15 тонн оборудована индуктором с номинальной мощностью 500 кВт. Питание обеих печей подводится системой преобразования частоты, индукторы обеспечены водяным охлаждением. По достижении температуры разливки меди она перегружается в формовочную машину непрерывного литья через стопорное устройство в форкамере разливочной печи. Скорость разливки регулируется на основе данных из системы контроля пресс-форм. Воздействие на расплавленный металл окружающего воздуха и в результате поглощение расплавом кислорода предотвращается слоем пластинчатого графита на поверхности ванны, благодаря закрытой конструкции печи и за счёт того, что разливочный патрубок погружается в пресс-форму ниже уровня металла. Как и плавильная печь, разливочная печь оснащена пористыми пробками в днище для минимизации содержания кислорода в меди /34/.

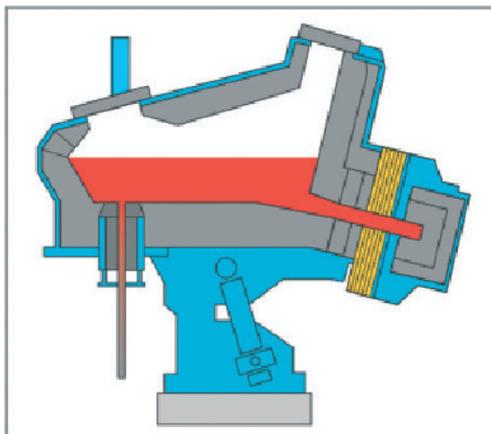


Рис. 56: Разливочная печь с встроенной пресс-формой

Линия непрерывного вертикального литья для производства высокопрецизионных труб

Эта линия предназначена для производства труб из различных медных сплавов с допуском 0,1 мм. Как правило, обрабатываются подшипниковые сплавы, такие как латунь специальной марки или высокопрочные сплавы CuSnNi. Трубы должны быть отлиты таким способом, который предусматривает дальнейшую обработку в технологической линии. Центральной частью системы является специальная разливочная печь канального типа. В отличие от стандартных линий непрерывного литья вертикального типа система использует форму, интегрированную непосредственно в печь. Такая конструкция устраняет необходимость применения стопорного устройства или системы контроля уровня разливки. Таким образом, повышается надёжность системы.

Для обеспечения быстрой и простой смены форм предусмотрена возможность обратного наклона всей печи, благодаря чему форма освобождается от металла и может быть демонтирована (Рис. 56). Быстрое отклонение печи позволяет также предотвращать серьёзные повреждения в случае прорыва плавки /35/.

Такой тип разливочной печи установлен в одной из крупнейших действующих линий по производству прецизионных труб на основе вертикального непрерывного литья (Рис. 57).

В ряду расположено всего 12 разливочных печей (и, следовательно, станций разливки), расплавленный металл в которые подаётся из канальной печи с подвижным подом. Медь расплавляется в центральной плавильной установке.



Рис. 57: Линия для производства прецизионных труб

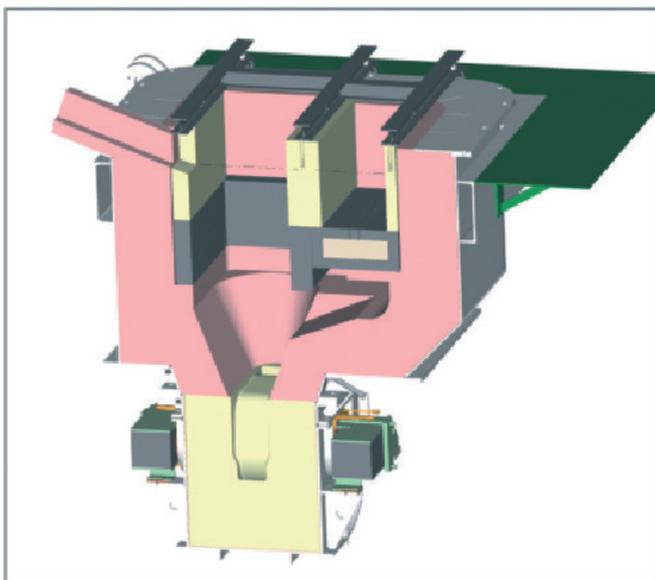


Рис. 58: Комбинированная печь плавки/разливки

Производство заготовок круглого сечения по технологии заливки снизу вверх

Эта технология приобретает всё большее распространение для эффективного производства медных заготовок круглого сечения из бескислородной меди эта технология, в частности в линиях невысокой пропускной способности.

В крышку разливочной печи в этой линии встроена графитовая пресс-форма с водяным охлаждением, погружаемая в расплав. Заготовка вытягивается снизу вверх из расплава и формуется исключительно путём отверждения жидкого металла при прохождении через форму.

Необходимость в строгом соответствии спецификации материала и параметрам процесса устанавливает чёткие требования к технологии печи.

Применение графитовых форм объясняется не поддающимся определению количеством кислорода, присутствующего в меди. Поэтому печь оснащена графитовой огнеупорной футеровкой. В дополнение к этому (или в качестве альтернативы), поверхность плавки защищается пластинчатым графитом. Более того, в качестве шихтовых материалов используются катоды из меди Сорта А.

Катоды, подаваемые в пачках, разделяются и загружаются в печь при помощи наклонного стола.

Для меньших объёмов выпуска используется комбинированная печь плавки/разливки (Рис. 58). Установка состоит из двух отдельных камер: камеры плавки и камеры разливки. Нагревание осуществляется посредством двухконтурного индуктора.

Отдельная плавильная печь рекомендуется для более высоких уровней производительности. Это может быть канальная печь тигельного типа с системой сифонной разгрузки или канальная печь барабанного типа со стационарным выпуском в качающейся опоре.

Канальные печи барабанного типа со скоростью плавки до 3,5 тонн/час предлагают множество преимуществ, таких как отличное уплотнение и защита от поглощения кислорода. Кроме того, в них предусмотрена возможность пропускание пузырьков газа через пористые пробки в днище печи. Благодаря этому достигается высокая степень чистоты меди и низкая концентрация кислорода.

Поскольку производительность станции заливки снизу вверх составляет около 120 кг/час, более высокая производительность требует использования нескольких таких установок в соответствующей разливочной печи. Комбинированная печь плавки/ разливки недостаточно просторна для такой конфигурации, поэтому для этих целей потребуется отдельная разливочная печь /36/.

На Рис. 59 представлена 16-рядная система для высокой производительности. Разливочная печь разделена на две секции разливки и центральную камеру загрузки. Каждая секция разливки оборудована собственным индуктором и от-

деляется от секции загрузки перегородкой. Конструкция печи предусматривает удобный доступ к отдельным станциям разливки, расположенным по бокам печи.



Рис. 59: Общая линия с 16 рядами



9 Заключение

Несмотря на разнообразие медных сплавов и применяемых технологий производства, универсальность и гибкость конструкций современных индукционных печей обеспечивают возможность выбора оптимального индивидуального решения для плавки или разливки.

Развитие технологии печей формируется, главным образом, на основе потребностей медной промышленности в усовершенствованных высококачественных продуктах.

Соответствие постоянно растущим требованиям к чистоте, точности состава и надёжности процесса обработки уже невозможно обеспечить без внедрения инновационных технологий индукционных печей в современное производство меди и медных сплавов.

Сегодня технические разработки индукционных печей предлагают широчайшие возможности выбора конструкций и рационального потенциала для оптимизации существующих процессов и творческого вклада в развитие и внедрение новых технологий.

Справочная литература

- /1/ Филиппс, Г.: Практическое руководство по технологии термической обработки, том II, гл. 4.2 Порядок работы с медью и сплавами на основе меди, «Vulkan-Verlag» (2003 г.), стр. 157 – 185
- /2/ Шмидт, Ж.: Медь для специального применения, 11/2006 г, стр. 698 – 700
- /3/ Лекция по литейному делу, Рейнско-Вестфальский технический университет г. Ахена, 5 издание, 1998 г.
- /4/ Оельманн, К., Архивы компании «КМЕ», Оснабрюк, 2007 г.
- /5/ Роеттгес, Д.; Шлифер Х.; Якобсен Ж.: журнал «Metall» 4/98, стр. 219 – 224
- /6/ Петерс, К.; Фрей, Т.; Трауцэддель, Д.: журнал «Elektrowärme international» 02 (2005 г.), стр. 69 – 73
- /7/ Донсбах Ф.; Шмитц, В.; Трауцэддель, Д.: Безопасный и энергосберегающий расплав в среднечастотной тигельной печи, компания «OTTO JUNKER GmbH» (ответственный редактор), 2005 г.
- /8/ В. Шмитц; Ф. Донсбах; Д. Трауцэддель: Оптимизация индукционной плавки посредством универсального применения информационных технологий, Технический форум WFO 2003, VDG, Дюссельдорф
- /9/ Донсбах Ф.; Шмитц В.; Хофф Х.: Журнал «Giesserei» 90 (2004 г.) № 8, стр. 52 – 54
- /10/ К. Шюринг: Электромагнитные поля в рабочей зоне современных промышленных печей – измерения на производственном участке, InternaМеждународный конгресс «Электромагнитная обработка материалов» CFF, Париж 1997 г.
- /11/ Границк, Е.: Auswertung der Umfrageaktion der Fachausschüsse Kupfer-Werkstoffe des VDG und Stranggießen, AK Ofenabhängige Kokille des DGM Königswinter, 1998
- /12/ Детш, Е.: Выплавка меди и медных сплавов в индукционных тигельных печах с конвертерами питания, 41. Международный симпозиум по огнеупорам, Ахен, 1998 г.
- /13/ Границки, Е., Шлукебиер, Д.: Журнал «Stahl und Eisen», сентябрь 1998 г., стр. 31 – 38
- /14/ Жеш, Е.; Портиш Х.Х.: Журнал «Metall» 55 (2001 г.) 718

- /15/ Ньюманн, К.: Возникновение пузырьков водорода в полосах из Северного золота, Диссертация, Рейнско-Вестфальский технический университет г. Ахена, 2002 г.
- /16/ Вайланд П.: Опыт плавки монетного сплава для производства евро, 14 Международная выставка и конференция стальной индустрии, Дортмунд, 2001 г.
- /17/ Профессиональный навыки работы с медью, брошюра компании «OTTO JUNKER GmbH», 2004 г.
- /18/ Донсбах, Ф.; Трауцэддель, Д.; Шмитц, В.: Журнал «Giesserei Rundschau» 12 (2005 г.), стр. 25 – 29
- /19/ Машины литья под давлением для латуни, брошюра «INDUGA-KWC», 2004 г.
- /20/ «HWS – INDUGA»: Низкая линия литья тяжелых металлов под давлением, журнал «METALL» 59 (2005 г.) издание 5, стр. 281
- /21/ Дж. Филлипс; Х. Беббер: Печи для выдержки и разливки для непрерывного литья, «CPT-Casting Plant + Technology Intl.» (1996 г.) № 2, стр. 22 – 28
- /22/ С. Даппен; В. Йохен; Д. Трауцэддель; Г. Восвинкель: Технология производства труб большого и малого диаметра, 01/02 (2002), стр. 38 – 43
- /23/ Ф. Нойманн: «CPT-Casting Plant + Technology Intl.» (2005) № 2, стр. 55
- /24/ В. Шмитц; Д. Трауцэддель: «Мир металлургии – ERZMETALL 58» (2005 г.), № 5, стр.. 281 - 284
- /25/ Шмитц В.; Трауцэддель, Д.: Журнал «Elektrowärme international», выпуск 01 (2008 г.), стр. 19 – 23
- /26/ Таннебергер, Р.; Вайгольд, Х.: Журнал «Elektrowärme international», выпуск 02 (2007 г.), стр. 33 – 35
- /27/ В. Шмитц; Г. Фрингс; Ф. Донсбах; Х. Шлифер: Установки для плавки и разливки меди под заказ, адаптируемые для металлургических требований, Европейская конференция металлургов EMC 2001, Фридрихсхафен, «GDMB Clausthal-Zellerfeld»
- /28/ Х. Беббер; В. Шмитц: «Furnaces International» (январь – февраль 2004 г.), стр. 13 – 16
- /29/ Х. Беббер; Дж. Филлипс: «Metallurgia» (1998 г.) № 11, стр.. 349 – 351

- /30/ Дж. Филлипс; Х. Беббер: Североамериканская конференция по современным технологиям производства меди, сентябрь 1998 г., Сент-Луис, Миссури Missouri, США
- /31/ Беббер Х.; Филлиппс Г: Журнал «Giesserei 88» (2001 г.), издание 2, стр. 38 – 41
- /32/ Филлиппс, Г.: Практическое руководство по технологии термической обработки, том II, гл. 4.2.3.8, «Vulkan-Verlag» (2003 г.), стр. 182
- /33/ Беббер, Х.: Энергосберегающие и экологически чистые технологии плавки для литья медных труб, журнал «Metall» 62 (2008 г.) выпуск 6, стр. 370 – 371
- /34/ В Шпитц; Х. Беббер: Новые разработки в обработке меди, 64-ое Собрание технического комитета GDMB по меди, апрель 2005 г., Гамбург
- /35/ Бентген, Х.В.: Вертикальная плавка прецизионных труб, Симпозиум компании «INDUGA», октябрь 1996 г.
- /36/ М. Нэйрн: Технология на основе графита для непрерывного литья повторно тянутых заготовок круглого сечения в многорядных машинах волочения проволоки, «EuroWire», ноябрь 2001 г.

OTTO JUNKER Group

Global and Close to the Customer

 **OTTO JUNKER**

Компания «OTTO JUNKER GmbH»

А/я 11 80 • D-52147 Зиммерат

Тел.: +49 2473 601-0

Факс: +49 2473 601-600

Эл. почта: info@otto-junker.de

www.otto-junker.de

GUSS-EX

www.guss-ex.ru

Официальный представитель
в России и СНГ

РУС  **ЛИТМАШ**

622034, г. Нижний Тагил,

ул. Ленина, 67

Тел.: +7 (3435) 499-338

Факс: +7 (3435) 499-414

E-Mail: office@ruslitmash.com

www.ruslitmash.com

www.otto-junker-group.com