

# ЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ

В.И. Лузгин, к.т.н, А.Ю. Петров, к.т.н. (РЭЛТЕК, г. Екатеринбург)

## 1. Перспективы развития систем индукционной плавки металлов

Индукционный метод нагрева и плавки металлов, пройдя более чем столетний путь развития, зарекомендовал себя как наиболее эффективный способ бесконтактного подвода тепла в электропроводящую среду. Индукционная плавка приобрела исключительно широкое распространение как по числу действующих установок, так и по разнообразию технологических применений в самых разных областях техники. По массе расплава они различаются от нескольких граммов в установках высокочастотной плавки до 250 т чугуна в канальном миксере. По методам индукционной плавки в зависимости от решаемых задач установки различаются по своим физическим основам, принципиальной технологической схеме и конструкции оборудования. Их можно разделить на две основные группы: плавка металлов в футерованной ванне и плавка без соприкосновения расплава с футеровкой. Методы первой группы реализуются в индукционных тигельных (ИТП) и канальных (ИКП) печах. Методы второй группы используются в печах ливитационной плавки во взвешенном состоянии металла, в печах бестигельной зонной плавки, а также в печах с холодным тиглем [1, 2].

В процессе плавки металла в ИТП наиболее полно проявляются преимущества и эффективность индукционного метода плавки: внутренний разогрев шихты, распределение выделяемой энергии по большей части периферии садки, интенсивное перемешивание металла, высокий к.п.д. и относительно малый расход электроэнергии на тонну выплавленного металла.

Широкое распространение в литейном производстве получили индукционные тигельные печи промышленной частоты (ИТППЧ) благодаря низкой удельной себестоимости и высокому качеству получаемого металла. При этом характер технологических процессов, выполняемых в ИТП, чрезвычайно разнообразен: от металлургического – приготовление сплава заданного состава до чисто литейного – раздача готового сплава в литейные формы [3, 4].

Одной из основных тенденций в развитии индукционного плавильного оборудования является повышение производительности в единице оборудования и необходимость получения больших количеств металла, что обусловило рост вместимости и мощности печей, достигших 63 т при мощности 18000 кВт для плавки карбида железа на промышленной частоте (фирма ASEA - Швеция освоила выпуск таких печей в 60-х годах). Однако для крупных ИТППЧ лимитируется удельная мощность до 300 кВт/т чрезмерно интенсивным движением металла под действием электродинамических сил [5, 6].

Дальнейшее повышение интенсивности плавки и производительности ИТП стало возможным при увеличении частоты тока в индукторе от 50 до 500 Гц для крупных печей, а по мере уменьшения размеров печи рациональная частота увеличивается и достигает 1,0 – 10,0 кГц для печей вместимостью 10-400 кг. Для малых печей вместимостью несколько десятков граммов оптимальная частота возрастает до 440 кГц.

Благодаря прогрессу в области производства мощных полупроводниковых приборов и развитию преобразовательной техники полупроводниковые преобразователи частоты становятся дешевле и эффективнее по сравнению с электромашинными генераторами в среднечастотном диапазоне [7, 8].

Индукционные тигельные печи средней частоты (ИТПСЧ) претерпели конструктивные изменения. Они стали высокими при соотношении внутреннего диаметра к высоте тигля 0,6-1,0 из условий минимальных тепловых потерь и максимального электрического к.п.д. [9]. Как правило, слив металла в ИТПСЧ осуществляется с помощью гидравлической системы поворота тигля, а загрузка шихты производится через горловину печи механизированным способом под поворотную теплоизолирующую крышку. На средней частоте удельная мощность в крупных печах достигает 1000 кВт/т, при этом интенсивность движения металла сохраняется, так как снижение электродинамических сил в ванне расплава металла при повышении частоты компенсируется увеличением настила тока при повышении удельной мощности.

Для компенсации реактивной мощности индуктора в системе электропитания печи используются блоки высокочастотных конденсаторов, стоимость которых составляет значительную часть в общей стоимости оборудования. Достижения в области технологии конденсаторостроения позволили наладить выпуск среднечастотных конденсаторов с высокими удельными показателями и большой реактивной мощностью в единице оборудования (2500 – 6000 кВАр), что способствовало существенному снижению стоимости блоков компенсирующих конденсаторов и открыло путь к созданию экономичных систем электропитания на основе тиристорных преобразователей частоты большой мощности для крупнотоннажных печей [10].

Ведущими фирмами мира (ABB, Otto Unker – Германия; Inductotherm, TOCCO Ajax, Pillar Industries – США; EGES – Турция; Electrotherm – Индия; ВНИИЭТО – СССР) в 70-80 годах освоено производство плавильных установок средней частоты с широким рядом сочетания параметров по вместимости и производительности печей, мощности и частоте источников питания. Наиболее крупные из них вместимостью 60 т чугуна и мощностью 21000 кВт на частоте 250 Гц производились фирмой ВВС в начале 70-х годов (см. рис. 1).

В установках среднечастотной плавки появилась возможность реализовать метод порционной плавки (плавки с полным сливом металла-ПСМ). Технология плавки чугуна и стали с остатком расплава металла ("болотом") практиковалась в установках промышленной частоты. В таком режиме работы удельный расход электроэнергии при плавке чугуна в ИТПСЧ составляет 720-800 кВт·ч/т. С учетом технологических производственных перегревов, когда печи не отключаются и работают в режиме теплосохранения, удельный расход электроэнергии достигает 1200-1300 кВт·ч/т.

Повышение удельной мощности в ИТПСЧ позволяет минимизировать время цикла плавки, повысить эффективность использования оборудования, а также снизить энергопотери на теплоотдачу и излучение.

Таким образом, скоростная энергонасыщенная порционная плавка металлов ПСМ в ИТПСЧ стала наиболее эффективным методом плавки черных и цветных металлов, а установки среднечастотной плавки получили широкое распространение особенно в литейных производствах машиностроительных и металлургических предприятиях. По технологической эффективности установки индукционной сред-

нечастотной плавки успешно конкурируют с традиционными плавильными агрегатами, использующими огневые методы плавки – коксовые (КВ) и газовые (ГВ) вагранки, а также с электродуговыми печами переменного (ДСП) и постоянного тока (ДППТ). Сравнение применяемых в литейном производстве плавильных агрегатов для плавки чугуна приведено в таблице 1 по удельному расходу электроэнергии (РЭ, кВт·ч/т) и топлива (РТ – газа, м<sup>3</sup>/т и кокса, кг/т), а также по относительной себестоимости (ОС), где за единицу принята себестоимость одной тонны расплава чугуна, полученной в ГВ [11].

Таблица 1

Удельный расход электроэнергии и топлива на тонну выплавленного чугуна в различных плавильных агрегатах

Тип плавильного агрегата	РЭ/РТ	ОС
ГВ	50-70/70	1
КВ	50-70/250	1,5-2
ДСП	500-800	2,0
ДППТ	480-650	1,8
ИТППЧ	1200-1300	2,0
ИТПСЧ	500-600	1,4

ИТПСЧ по себестоимости одной тонны расплава чугуна уступают только газовым вагранкам и значительно превосходят остальные типы плавильных агрегатов, а также имеют наименьший удельный расход электроэнергии среди электропечей. При этом по экологической безопасности ИТПСЧ остаются вне конкуренции и производят значительно меньше шума, выбросов пыли, угарного и сернистого газа. По мере развития систем электропитания и автоматики в установках индукционной плавки появилась возможность реализации метода многопостовой одновременной плавки металла в двух или нескольких печах с фазовым сдвигом процессов плавки в цикле работы установки.

Технико-экономическая эффективность среднечастотных индукционных плавильных систем еще более возросла с тех пор, когда в 1992 году фирма АВВ создала двухпостовой плавильный комплекс с двумя одновременно работающими ИТПСЧ от одного двухэнергоканального источника питания, осуществляющего перераспределение потока энергии между печами в цикле плавки плавильная система ("Twin-Power") [12]. На рис. 2 приведена схема двухэнергоканального плавильного комплекса с плавным перераспределением мощности на печах.

Примерно в это же время фирма Inductotherm разрабатывает систему двухпостовой среднечастотной плавки "DUAL-TRAK". Создание таких систем позволило повысить эффективность использования установленной мощности оборудования системы электропитания печей, снизить ее стоимость на 30-40% и повысить производительность плавильных установок [13].

Фирма Otto Unker освоила в конце 90-х годов производство двухпостовых крупнотоннажных плавильных комплексов с распределительной системой электропитания печей DUOMELT [14]. На рис. 3 приведена конструктивная схема плавильного участка с печами 8 тонн.

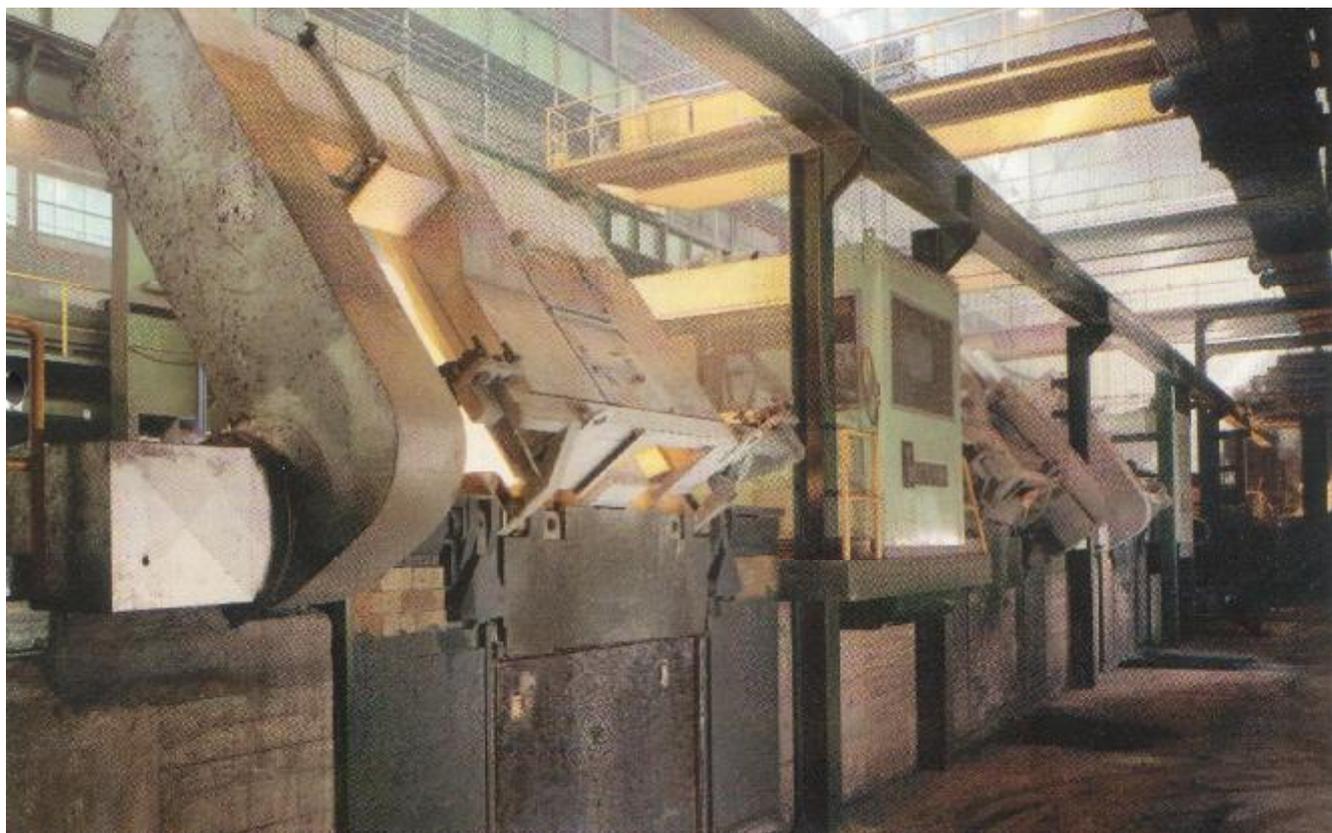


Рис. 1. Индукционная тигельная печь вместимостью 60 тонн

## Flexible Power Sharing With TWIN-POWER®

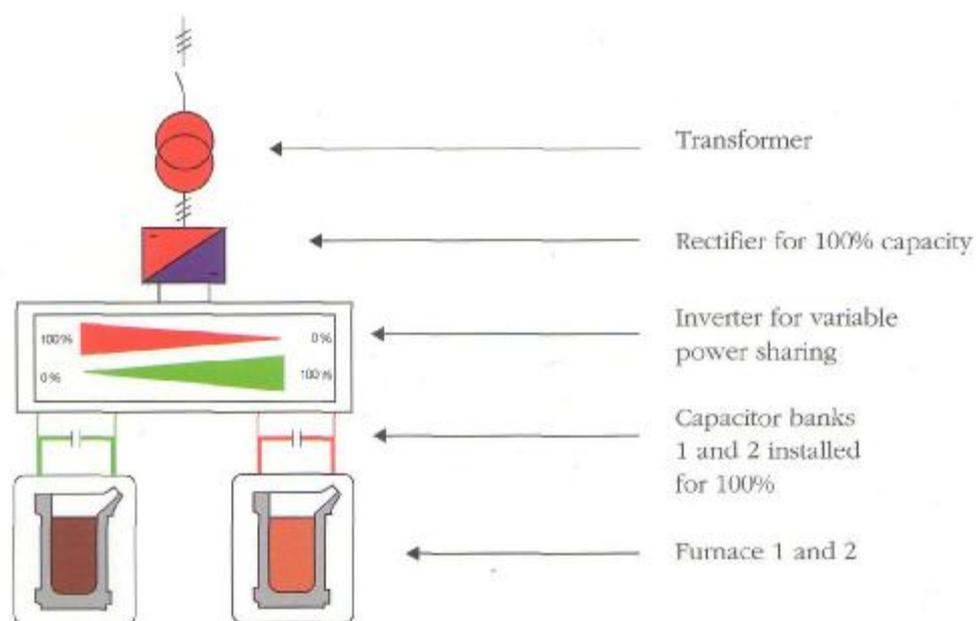


Рис. 2. Двухэнергоканальная распределительная система электропитания ИТП

## Индукционная печь средней частоты

- Пример установки -



- [1] Печь
- [2] Вытяжной зонт (опция: открываемый в двух направлениях)
- [3] Весы
- [4] Защита нижней части печи
- [5] Гидравлическая станция
- [6] Кабина оператора с пультом управления
- [7] Шкаф управления с процессором плавки JOKS
- [8] Система DUOMELT
- [9] Батарея конденсаторов
- [10] Трансформатор
- [11] Охладитель воды (цикл печи, цикл распределительного устройства)
- [12] Воздухоохладитель
- [13] Передвижная загрузочная система

Рис. 3. План размещения оборудования двухпостового плавильного участка с печами 8 т



Рис 4. Плавильный участок литейного цеха с двумя печами 6 т

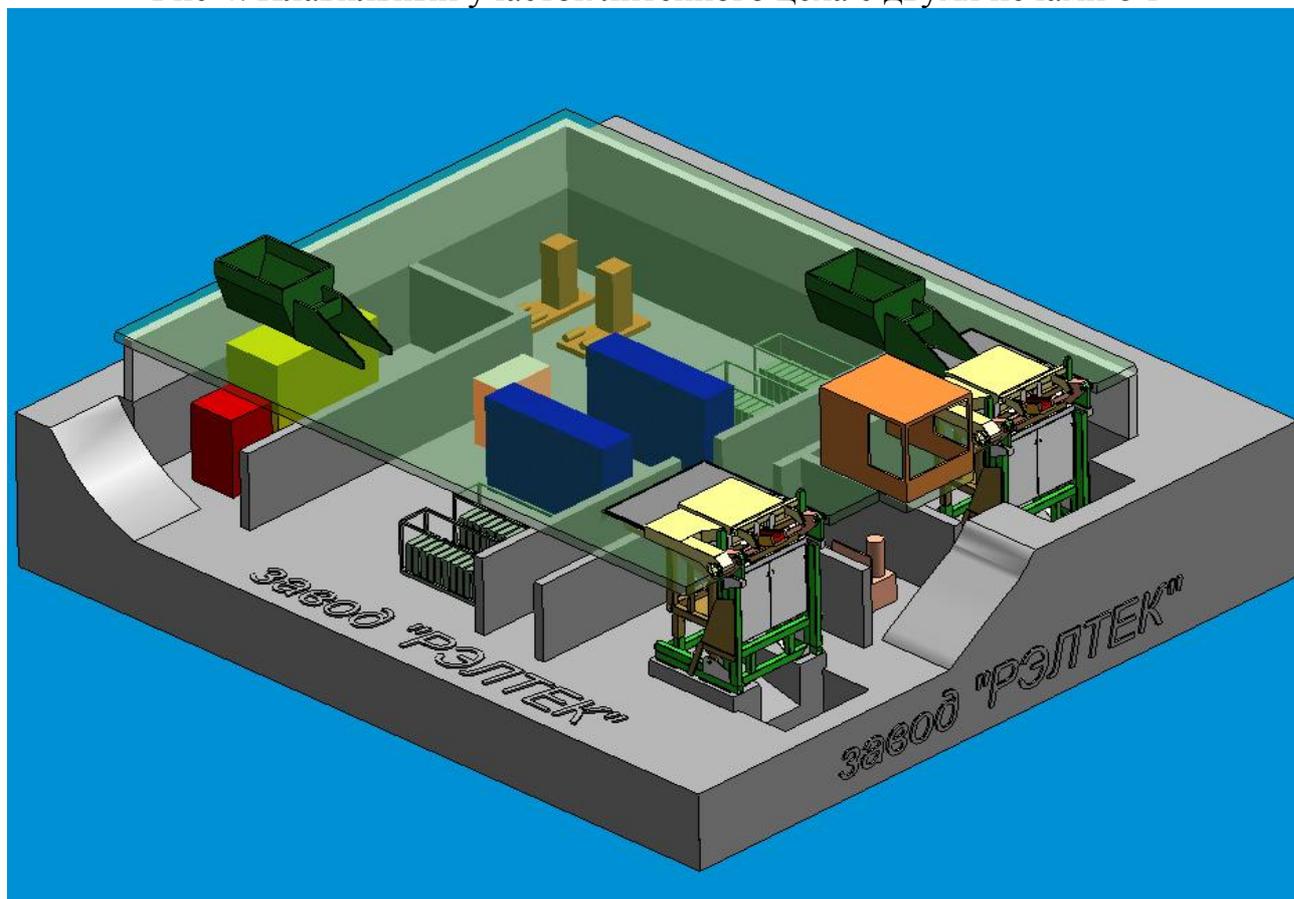


Рис. 5. Двухуровневая схема размещения оборудования двухпостового индукционного плавильного комплекса

Аналогичные системы среднечастотной плавки разработаны Российской электротехнологической компанией ("РЭЛТЕК"), которая производит, начиная с 2001 года, модельный ряд крупнотоннажных среднечастотных плавильных установок. На рис. 4 изображен индукционный плавильный комплекс с печами 6 тонн, а на рис. 5 приведена конструктивная схема двухуровневого размещения оборудования [15] на плавильном участке литейного цеха.

Двухпостовые установки индукционной плавки типа УИПТ реализуют тандемный способ плавки, когда плавка ведется последовательно в одной печи до ее завершения, а затем продолжается во второй печи. При этом источник питания переключается с одной печи на другую. Такой метод позволяет примерно на 20% повысить производительность плавильной установки по сравнению с однопостовой плавильной системой за счет сокращения технологических перерывов и более интенсивного использования оборудования системы электропитания.

Двухпостовые плавильные установки типа УИПД снабжены двухэнергоканальной распределительной системой электропитания, которая обеспечивает режим одновременной плавки металла в двух печах (ДЭКРИПС – двухэнергоканальная распределительная индукционная плавильная система) и позволяет осуществлять независимое регулирование мощности на каждой печи при постоянной мощности на входе системы электропитания [16]. В этом случае производительность УИПД возрастает на 20-25% по сравнению с УИПТ при той же мощности обогрева. Таким образом, индукционные тигельные печи средней частоты – это быстро прогрессирующий вид металлургического оборудования, наиболее полно отвечающий современным требованиям техники по качеству получаемых металлов и сплавов, по производительности и функциональным возможностям. Они обладают высокой технико-экономической эффективностью, экологической безопасностью и адаптивностью в современном металлургическом производстве и являются наиболее перспективным видом печей в литейном производстве на ближайшие десятилетия.

## **2. Индукционные тигельные печи средней частоты**

### **2.1. Конструкции ИТП средней частоты**

Одной из основных характеристик индукционных тигельных печей (ИТП) является их емкость, которая традиционно выражается в тоннах, хотя емкость тигля самых маленьких печей составляет несколько грамм, например, печи для плавки драгоценных металлов и печей с электромагнитным тиглем, а самых крупных – достигает 150 тонн. Очевидно, что при таком диапазоне емкостей конструкции печей, функционально в общем-то одинаковых, различаются достаточно сильно.

Весь диапазон емкостей ИТП из соображений удобства дальнейшего описания конструкции печей можно разбить на три группы: печи малой (от нескольких грамм до нескольких килограмм), средней (до 1000 кг) и большой емкости (>1000 кг).

Вне зависимости от типов печей, их емкости и конструктивных особенностей, основным элементом этих печей является плавильный узел, который состоит из индуктора и тигля. Плавильный узел изображен на рис. 6. Однако столь широкий диапазон емкостей ИТП влияет на особенности конструкции и плавильного узла, и печи, и плавильного комплекса в целом.

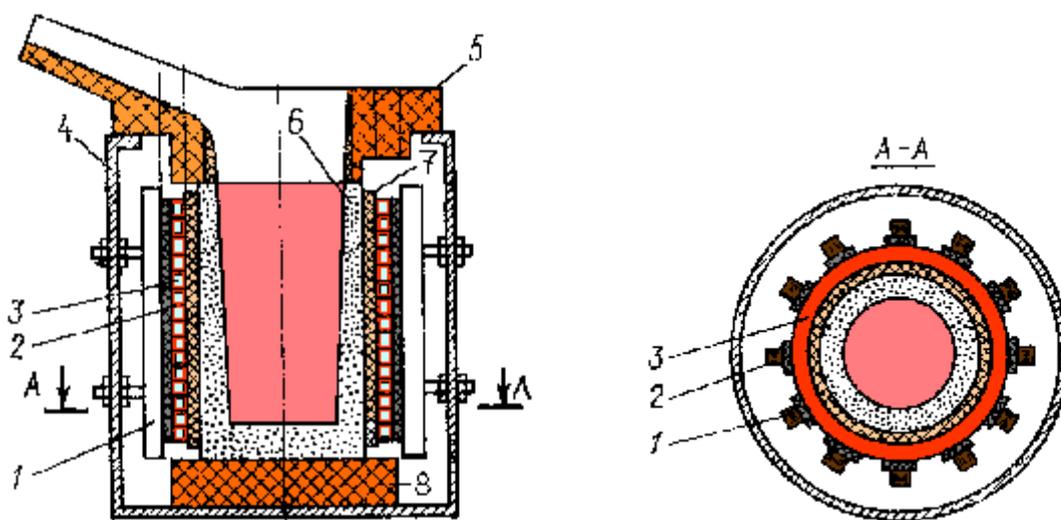


Рис 6. Плавильный узел индукционной тигельной печи:

1 – магнитопроводы; 2 – изолирующая прокладка; 3 – индуктор; 4 – корпус печи; 5 – ленточная керамика; 6 – тигель; 7 – обмазка индуктора; 8 - подина

## 2.2. Конструкция открытых ИТП малой емкости

Тигель в печах малой емкости может вообще отсутствовать. Такая печь выполняет плавку особо чистых сплавов, крайне критичных к содержанию примесей, которые могут быть внесены футеровкой тигля. В этом случае плавка осуществляется в электромагнитном поле, которое создает в расплавляемом металле электродинамические усилия, направленные по нормали к оси индуктора, и заставляющие металл "висеть" в воздухе (ливитационная плавка). Кроме электродинамических усилий на металл в электромагнитном тигле воздействует, естественно, сила тяжести и сила поверхностного натяжения на поверхности капли расплавляемого металла. Последняя обуславливает объем расплавляемого металла или емкость ИТП с электромагнитным тиглем (ЭМТ). На рис. 7 приведены высокочастотные печи для плавки металлов в керамическом тигле и плавильной плавки особо чистых сплавов применяется водоохлаждаемый тигель. В такой печи осуществляется так называемая "плавка в гарнисаже" при которой внутренней стенкой футеровки тигля является сам кристаллизовавшийся расплавленный металл, что также обеспечивает высокую чистоту расплавляемого металла. В отличие от предыдущего метода (плавка в ЭМТ) не накладываемся принципиальных ограничений на емкость расплавляемого металла, однако, как было рассмотрено выше, вследствие эффекта близости, вихревые токи, наведенные в загрузке, протекают по внешней ее стенке, ближайшей к индуктору и, соответственно, к водяной "рубашке" тигля. В связи с этим львиная доля тепла, выделяемая в металле, уносится с охлаждающей водой, и КПД такой печи редко достигает 20%. Водоохлаждаемый тигель изготавливается из немагнитной, т.е. высоколегированной стали (как правило – это хромоникеливая нержавеющая сталь, обладающая низкой электропроводностью, что обеспечивает малую величину наводимых в тигле вихревых токов).



Рис. 7. Индукционные печи малой емкости

### 2.3. Конструкции открытых индукционных тигельных печей средней и большой емкости

Конструкции ИТП подразделяются по способу замыкания магнитного потока с внешней стороны индуктора [17]:

- магнитный поток проходит по воздуху;
- магнитный поток проходит по воздуху, стальные конструктивные части защищаются от интенсивного нагрева с помощью медного листа, экранирующего медного листа;
- магнитный поток проходит по магнитопроводам из трансформаторной стали.

Соответственно печи имеют названия:

1. ИТП с открытой конструкцией, используются в печах вместимостью до 0,4 тонны;
2. ИТП с экранированной конструкцией, используется в печах вместимостью до 2 тонн;
3. ИТП с закрытой конструкцией, используются в печах вместимостью больше 1 тонны.



Рис. 8. ИТП с открытой конструкцией

На рис. 8 приведена конструкция открытой ИТП вместимостью 0,4 т фирмы "РЭЛТЕК" [15]. Отличительной особенностью этих печей является простота конструкции, относительно низкая материалоемкость и себестоимость.

Печи серии Duraline фирмы Inductotherm (см. рис. 9) имеют экранированную конструкцию, которая позволяет уменьшить габаритные размеры и уменьшить нагрев элементов конструкции при высокой удельной мощности и скорости плавки.

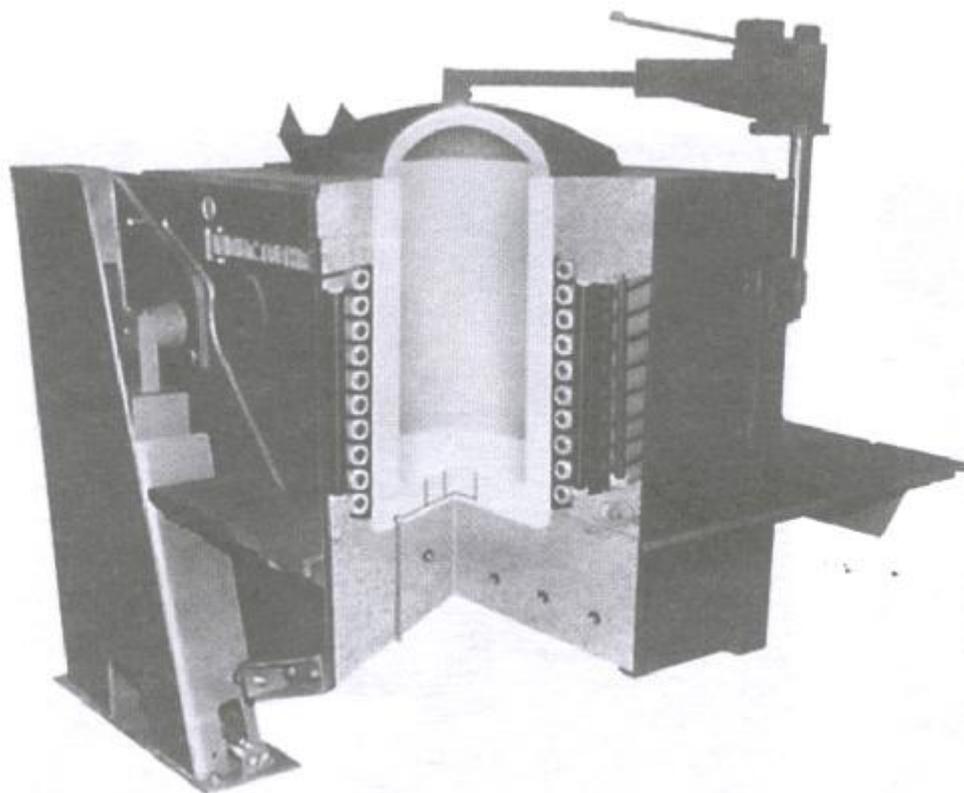


Рис. 9. ИТП с экранированной конструкцией

Крупнотоннажные печи, как правило, имеют закрытую конструкцию, в которых плавка ведется с высокой удельной мощностью, достигающей 0,7-1,0 МВт/т при плавке чугуна и стали. На рис. 10 приведена конструкция печи вместимостью

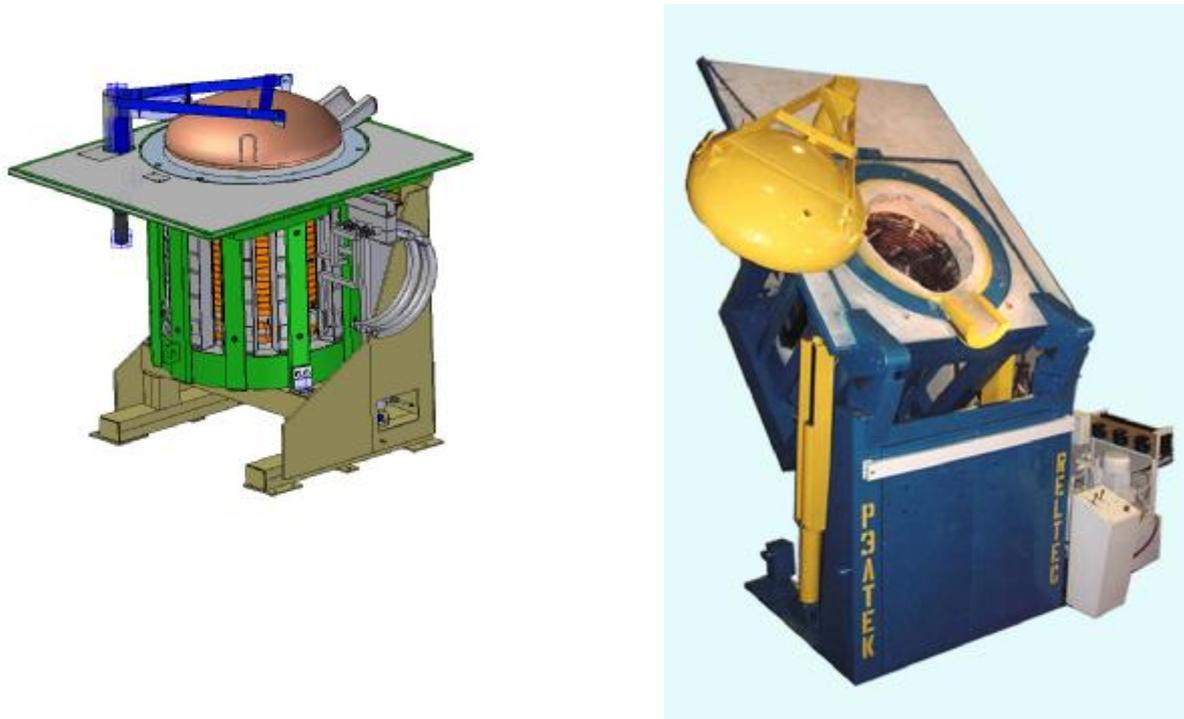


Рис. 10. ИТП с закрытой конструкцией

#### 2.4. Элементы конструкции ИТП

##### *Индуктор*

Индуктор печей малой емкости, как правило, питается малым по величине напряжением высокой ( $>10$  кГц) или средней (0,25 – 10 кГц) частоты, что обуславливает его конструкцию. Малое питающее напряжение определяет число витков индуктора (один или несколько), а высокая частота – эффективную толщину токопроводящей стенки индуктора (не более 1 мм). Одновитковый индуктор изготавливается из листовой меди при помощи пайки отдельных деталей, а многovitковый – из медной профилированной равностенной трубки круглого сечения. Индуктор крупных печей выполняется из стандартной медной профилированной трубки с внутренним отверстием для водяного охлаждения. Некоторые виды стандартных медных профилей показаны на рис. 11.

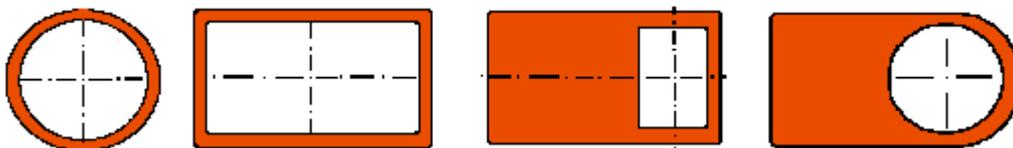


Рис. 11. Стандартные профили медной трубы для намотки индукторов

Индуктор индукционной тигельной печи всегда выполняют с высоким коэффициентом заполнения медью ввиду того, что индуктор играет двойную роль – ис-

точника электромагнитного поля и элемента охлаждения футеровки. Если индуктор лишить водяного охлаждения, то в течение длительного времени эксплуатации при плавке, например, стали температура индуктора может превысить температуру плавления материала из которого он изготовлен. Если же тигель выполнить достаточно толстым, чтобы обеспечить температуру индуктора без водяного охлаждения в установившемся режиме не более 180 градусов, то при имеющихся материалах футеровки стенка тигля будет настолько толстой, что электрический КПД печи снизится до недопустимого уровня, а  $\cos j$  будет настолько низок, что стоимость компенсирующего устройства (батареи конденсаторов) может превысить стоимость всего плавильного комплекса.

В том случае, если расчетная высота витка индуктора оказывается большей, чем максимальный размер стандартного медного профиля, часто обмотку индуктора для уменьшения плотности тока в нем секционируют, причем витки в секциях наматывают, как правило, встречно для исключения случая, когда к двум соседним виткам может быть приложено напряжение, подаваемое на индуктор. Эта ситуация приводит к дополнительным расходам на изоляцию и усложняет конструкцию индуктора.

Толщина стенки индуктора выбирается исходя из частоты питающего напряжения. Поэтому индукторы печей промышленной частоты изготавливаются из неравностенной трубки с толщиной стенки, обращенной к загрузке  $\approx 10$  мм, а среднечастотные печи имеют индуктор, выполненный из равностенной трубки с толщиной стенки 3-8 мм. В последнем случае толщина стенки зависит скорее от размера профиля – чем больше профиль, тем толще стенка, из которой он изготовлен, так как индуктор должен выдерживать, не деформируясь, значительные электродинамические усилия и, кроме того, напор охлаждающей воды.

Как упомянуто выше, индуктор подвергается воздействию значительных электродинамических усилий, поэтому витки индуктора следует фиксировать в радиальном направлении, т.е. направлении воздействия этих усилий.

В малых печах электродинамические усилия малы и индуктор таких печей обладает достаточной прочностью для того, чтобы длительно работать под такой нагрузкой, кроме того, малые печи работают, как правило, на высокой или средней частоте питающего напряжения, а электродинамические усилия, имеют обратную зависимость от частоты питающего напряжения.

Индуктор средних и крупных печей подвергается более серьезным воздействиям. Кроме того, в последнее время строятся печи с высокой удельной плотностью энергии, подводимой к поверхности загрузки, что предъявляет дополнительные требования к плотности тока, протекающего в индукторе, а следовательно, и к увеличению интенсивности охлаждения проводников, а также увеличению допустимых усилий, воздействующих на индуктор. Поэтому витки индуктора средних и крупных печей должны фиксироваться в пространстве. Крепление витков выполняют, как правило, одним из двух способов:

1. Стягиванием витков индуктора (в этом случае сила трения между поверхностями двух соседних витков должна быть больше, чем электродинамические усилия, возникающие в индукторе). Такой тип крепления витков (рис 12) применяется, как правило, на сравнительно небольших печах, работающих на средней частоте питающего напряжения, так как с увеличением габаритов печи возрастают требования,

предъявляемые к элементам конструкции стяжного устройства – шпилькам и стяжным кольцам, которые должны выполняться из немагнитного и по возможности непроводящего материала. Шпильки выполняются из непроводящего материала, так как в противном случае в них будут наводиться вихревые токи, вызванные магнитным потоком, замыкающимся за пределами индуктора, что может значительно снизить КПД печи. Такая конструкция индуктора проста в изготовлении, кроме того, индуктор печи малой емкости достаточно просто выполнить с транспозицией витков, однако ее недостатком можно отметить повышенные требования к витковой изоляции трубки индуктора. При достижении определенных габаритов, стеклотекстолит, из которого обычно изготавливаются эти элементы конструкции, будет просто разрушаться под воздействием приложенной к нему необходимой нагрузки, а применение хромоникелевой нержавеющей стали в этих элементах неоправданно из-за высокой стоимости самого материала и его механической обработки. При креплении витков стяжным способом увеличиваются требования к изоляции витков индуктора.

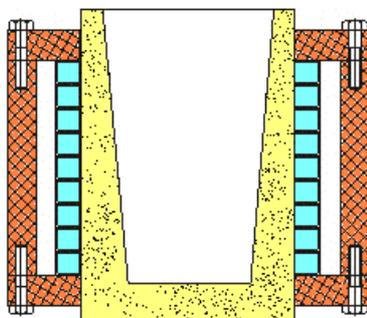


Рис 12. Конструкция индуктора с аксиальным стягиванием витков

2. Индивидуальное крепление витков индуктора (рис 13). Этот способ крепления витков применяется на печах средней и большой емкости. К виткам индуктора привариваются или припаиваются шпильки, которые затем скрепляются при помощи гаек стеклотекстолитовой рейкой. После установки индуктора на раму, крепежные рейки фиксируются на ней при помощи болтов или шпилек. Число реек в зависимости от емкости печи варьируется от 4-х на печах средней емкости до 16-ти и более – на самых крупных. Индивидуальное крепление витков индуктора более эффективно, но в то же время требует больше затрат по сравнению с первым способом крепления.

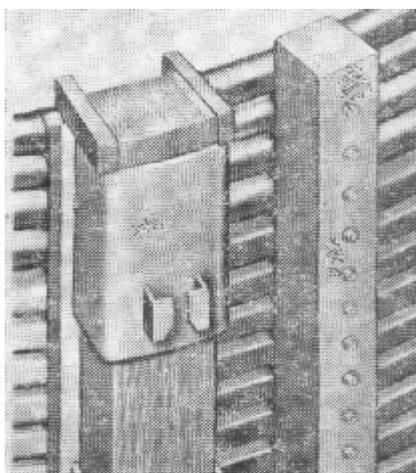


Рис. 13. Конструкция индуктора с индивидуальным креплением витков

## Тигель

Тигель печи является самым ответственным элементом, так как должен выдерживать большие температурные напряжения (градиент температуры в стенке тигля достигает 200 К/см), а также гидростатическое давление столба расплава и механические нагрузки, возникающие при загрузке и осаживании шихты. Кроме того, тигель должен быть химически стоек по отношению к расплавленному металлу и шлаку и неэлектропроводен при рабочей температуре. Стойкостью тигля определяется продолжительность эксплуатации печи, т.е. суммарное время плавки между сменами футеровки. При сливе металла печь наклоняется и, вследствие этого, происходит перераспределение механической нагрузки между подиной, имеющей относительно большую толщину, а, следовательно, и прочность, и тонкой стенкой тигля. Поэтому стенка тигля должна выдерживать дополнительную нагрузку, возникающую при наклоне печи при сливе металла.

Тигли изготавливают обычно методом набивки в печи, и реже – формовкой вне печи. Существует большое число рецептов футеровок для индукционных тигельных печей. Выбор рецептуры и гранулометрического состава футеровочных материалов определяется свойствами выплавляемого металла или сплава.

Тигель должен выполнять двойную функцию – как огнеупор и как теплоизолирующий материал, как и в любой другой плавильной печи. При изготовлении тигля способом набивки, тигель получается практически однородным по своему составу и физическим свойствам. Однако после первой плавки свойства и состав футеровки значительно меняется. Внутренний слой тигля сплавляется и обладает практически нулевой пористостью, однако, внешний слой тигля, охлаждаемый водой, своих свойств практически не меняет и его пористость остается практически той же, что и при набивке. Таким образом, после первой плавки формируются два характерных слоя – огнеупорный (обладает высокой прочностью и огнеупорностью, образуется в том слое, где температура во время первой плавки превысила температуру спекания/плавления материала футеровки) и теплоизоляционный (обладает меньшей прочностью, но более низкой теплопроводностью). Для предотвращения образования трещин металла во время плавки на средних и крупных печах часто выполняют еще один слой футеровки – бетонную обмазку индуктора, которая кроме выполнения своей основной функции придает жесткость конструкции. На малых же печах, обычно с выемным тиглем, устанавливают дополнительный теплоизолирующий асбестовый слой между индуктором и футеровкой. Для контроля за состоянием футеровки в донную часть тигля закладывают тонкие медные проводники, концы которых выводят через подину наружу, и подключают к устройству контроля за сопротивлением изоляции между индуктором и расплавленным металлом, находящимся в тигле. При снижении уровня сопротивления изоляции ниже допустимого, печь отключают и производят аварийный слив металла.

В подовую часть футеровки печей средней и большой емкости устанавливается плита из плотного материала, способная длительно выдерживать вес загружаемого металла. На рис. 14 приведены три варианта исполнения подины: а - подина из бетонных блоков; б - подина из шамотных блоков; в – подина из текстолитовых или асбоцементных плит. Подина придает жесткость всей конструкции печи и является

крепежным элементом для фиксации крепежных балок индуктора. Подовая часть тигля лишена водяного охлаждения и подина выполняет роль теплоизолятора.

### Магнитопроводы

Печи средней величины и крупные печи часто оборудуют магнитопроводами, служащими для уменьшения сопротивления обратного замыкания (что благоприятно влияет на  $\cos j$  печи) и ограничения магнитного потока вне печи для защиты внешних металлоконструкций плавильного комплекса от воздействия электромагнитного поля (что благоприятно влияет на КПД печи). Малые и средние печи магнитопроводами, как правило, не оборудуются, так как применение электротехнической стали на частотах, на которых они работают экономически невыгодно.

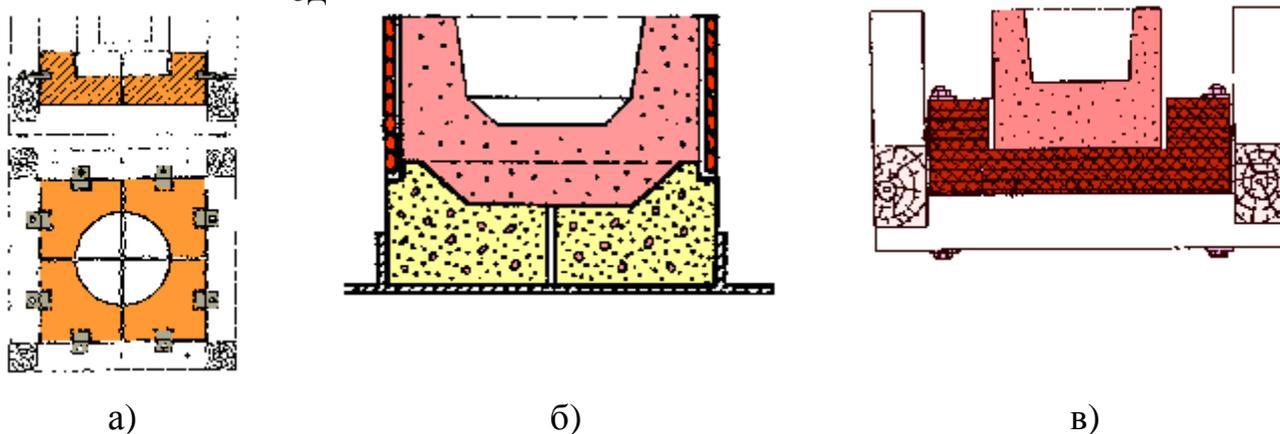


Рис. 14. Варианты выполнения подины:

- а) подина из бетонных блоков; б) подина из шамотных блоков;
- в) подина из текстолитовых или асбоцементных плит

Стальной лист, из которого изготавливается магнитопровод, должен иметь толщину, которая обеспечивает допустимый уровень вихревых токов, наводимых в магнитопроводе. Оптимальная толщина листа стали магнитопровода выбирается исходя из частоты питающего напряжения, и при частотах  $>2400$  Гц применение магнитопровода, как правило, не имеет смысла. Потери в магнитопроводе, составленном из листа стандартной толщины (0,2; 0,35; 0,5 мм), становятся настолько велики, что последний разогревается также интенсивно, как и загрузка. Магнитопроводы помимо своей основной функции (проведение внешнего магнитного поля внутри каркаса) выполняют функцию конструктивного элемента, обеспечивающего жесткость индуктора и печи в целом. Это достигается благодаря тому, что фиксацию и радиальную стяжку индуктор осуществляет пакетами магнитопроводов, прижимаемых к индуктору специальными нажимными болтами, вмонтированными в корпус печи (рис. 13). Усилие нажатия может регулироваться. Фиксация индуктора в осевом направлении может осуществляться с помощью кронштейнов, приваренных к боковым щекам магнитопроводов и шпилек, притягивающих пакеты магнитопроводов к днищу печи. При такой конструкции все усилия, возникающие в индукторе, через магнитопровод передаются на каркас печи.

Вместо магнитопроводов малые и средние печи оборудуются электромагнитными экранами, которые выполняют лишь защитную функцию по отношению к внешним металлоконструкциям. Экран изготавливают из хорошо проводящего ма-

териала, например, меди или алюминия; толщину экранирующего листа выбирают из соображения полного гашения электромагнитной волны вне экрана, и должна составлять не менее двукратного значения глубины проникновения вихревых токов. Кроме того, электромагнитные экраны часто выполняют роль жесткого элемента конструкции печи или каркаса, в котором закрепляются подина, тигель и индуктор.

#### *Токопроводы*

Особый интерес представляют устройства токоподвода к печи. Поскольку печи выполняются, как правило, наклонными, токоподводящие устройства должны иметь либо разъем, отключающий индуктор от неподвижных шинопроводов при наклоне, либо гибкие элементы.

*Разъемы* (рис. 15) в индукционных печах применяются относительно редко и на печах относительно малой мощности, вследствие роста стоимости и сложности конструкции с ростом мощности печи.

Поэтому в крупных и средних печах с высокой плотностью подводимой энергии применяются *гибкие водоохлаждаемые шинопроводы* (рис. 16). Конструкция шинопровода должна обеспечивать высокую пропускную способность при наименьших массогабаритных параметрах. Поэтому при питании среднечастотных печей не имеет смысла использовать сплошную медную гибкую шину, достаточно использовать оплетку, толщиной  $1,5-2 \Delta$  ( $\Delta$  - глубина проникновения в медь шины на данной частоте) одетую на гибкую трубку. Эту трубку для увеличения площади теплообмена воды с проводником шинопровода желательно выполнить перфорированной, обеспечивающей, однако, жесткость шины при рабочем радиусе искривления токоподвода для исключения его "перелома" на радиусе

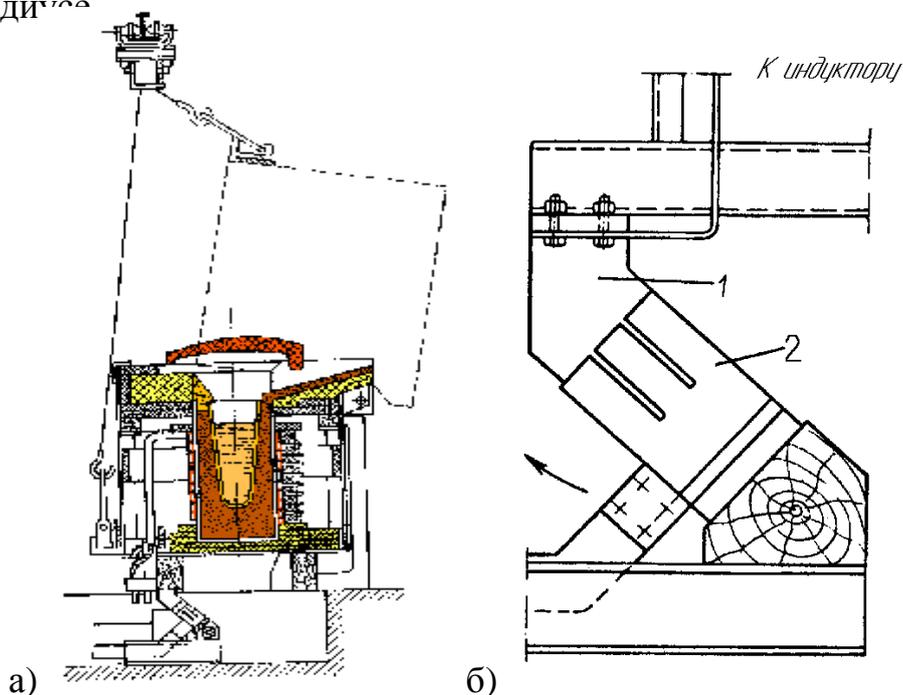
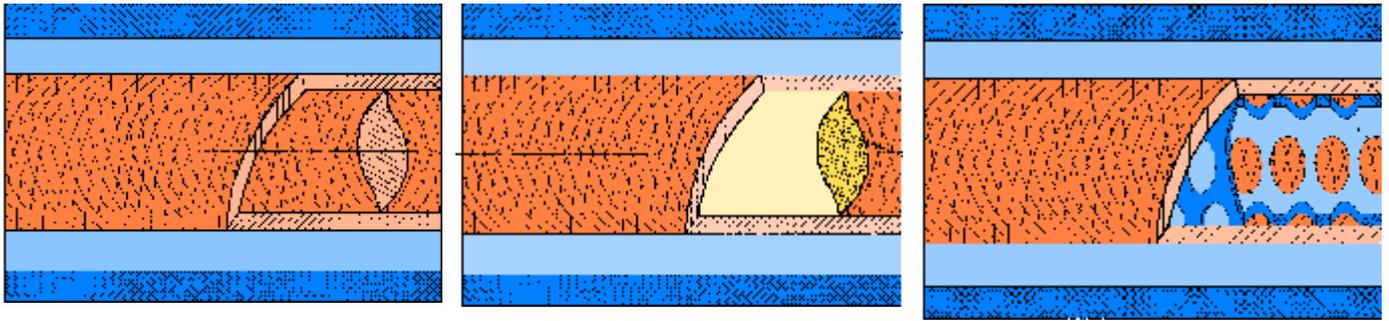


Рис. 15. Разъемное соединение печи с короткой сетью:

а) общий вид печи;

б) контактное устройство (1 – подвижный контакт; 2 – неподвижный контакт)



- |  |   |  |
|--|---|--|
| а)                                     | б)  | в)   |
| а) сплошной шинопровод                 | б) шина с непроводящей сердцевиной            | в) шина с увеличенной поверхностью теплообмена |
| 1. Внешняя герметичная стенка (шланг)  | 1. Шланг                                      | 1. Внешняя герметичная стенка                  |
| 2. Активная часть гибкого проводника   | 2. Активный токопроводящий слой               | 2. Активный токопроводящий слой                |
| 3. Неактивная часть гибкого проводника | 3. Неактивная гофрированная гибкая сердцевина | 3. Перфорированная внутренняя стенка           |

Рис. 16. Гибкие водоохлаждаемые шинопроводы

*Жесткие шинопроводы*, соединяющие печь с батареей конденсаторов и с преобразователем, выполняются, как правило, из соображения экономии достаточно дорогой меди также водоохлаждаемыми, т.е. из стандартного медного профиля, причем рабочее сечение шинопровода, соединяющего батарею конденсаторов с печью должно быть в несколько раз больше сечения шинопровода, соединяющего батарею конденсаторов с преобразователем вследствие того, что в первом участке шинопровода протекает значительный реактивный ток. Кроме того, рабочее сечение проводников жесткого шинопровода будет зависеть от взаимного расположения проводников прямого и обратного направления, что необходимо учитывать при проектировании индукционного плавильного комплекса.

#### *Механизм наклона*

Существуют три варианта расположения оси поворота при наклоне печи для слива металла (см. рис. 17):

- а - у сливного носка;
- б - комбинированное расположение;
- в - у центра тяжести.

Для того чтобы разливочной ковш не требовалось перемещать во время разливки металла, ось наклона необходимо располагать вблизи сливного носка, однако нагрузка на привод наклона в этом случае будет максимальной. Минимальную нагрузку на привод обеспечивает расположение оси поворота у центра тяжести, такое расположение можно применять для крупных печей-копильников, разгружаемых малыми порциями. Комбинированное расположение применяется, как правило, для малых печей с ручным приводом наклона или с приводом механизма наклона от тельфера. Вначале печь наклоняется вокруг оси *1* вблизи центра тяжести, до того

момента, когда металл приближается к носку. В этот момент вторая ось 2, укрепленная вблизи носка, своими цапфами ложится в подшипники 3, после чего разливка металла осуществляется при наклоне печи вокруг оси 2.

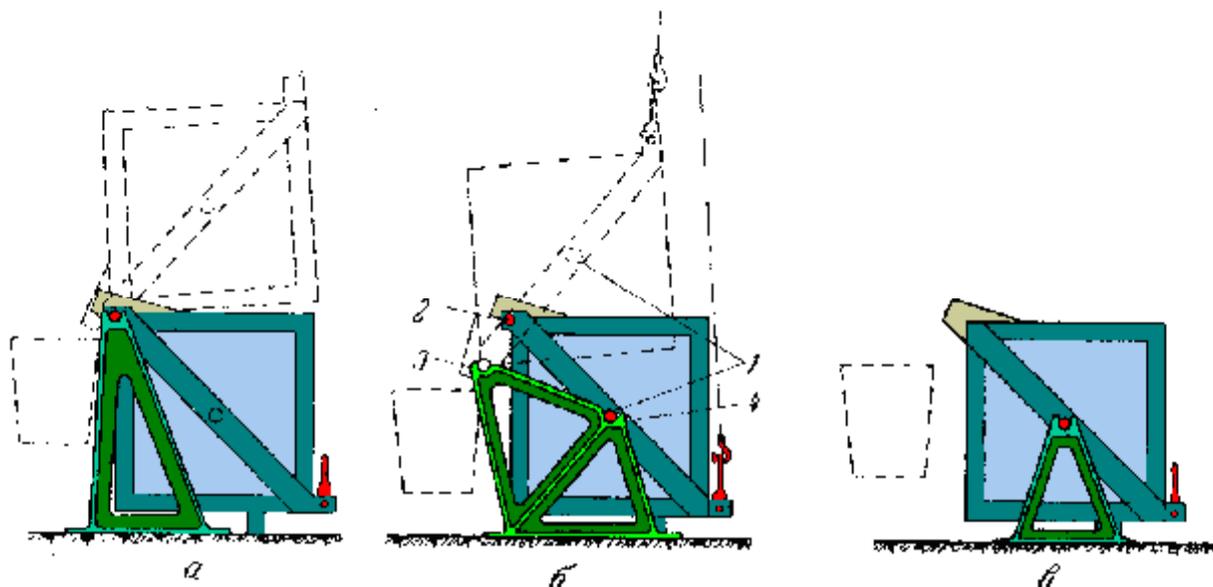


Рис. 17. Варианты расположения оси поворота печи

Типы и конструкции механизмов наклона весьма разнообразны (см. рис. 18). Для наклона печей малой емкости часто применяется тельфер. Достоинством такого способа наклона является возможность использовать тельфер для доставки шихты к печам; один тельфер, кроме того, может обслуживать несколько печей. Печи малой емкости оборудуются также ручными механизмами наклона в виде лебедки с ручным приводом.

Широкое распространение получил гидравлический механизм наклона, достоинствами которого являются конструктивная простота и плавность наклона. Однако для приведения в движение гидравлических цилиндров требуется напорная установка. Основной частью гидравлического механизма наклона являются рабочие цилиндры 1 (по одному с каждой стороны печи), плунжеры 2 (или поршни) которых шарнирно соединены с каркасом печи, давлением рабочей жидкости (масла) перемещаются вверх и наклоняют печь. Гидравлические цилиндры устанавливаются на шарнирах 3. Недостатком гидравлического механизма наклона является необходимость довольно значительного пространства под печью для установки гидравлических цилиндров.

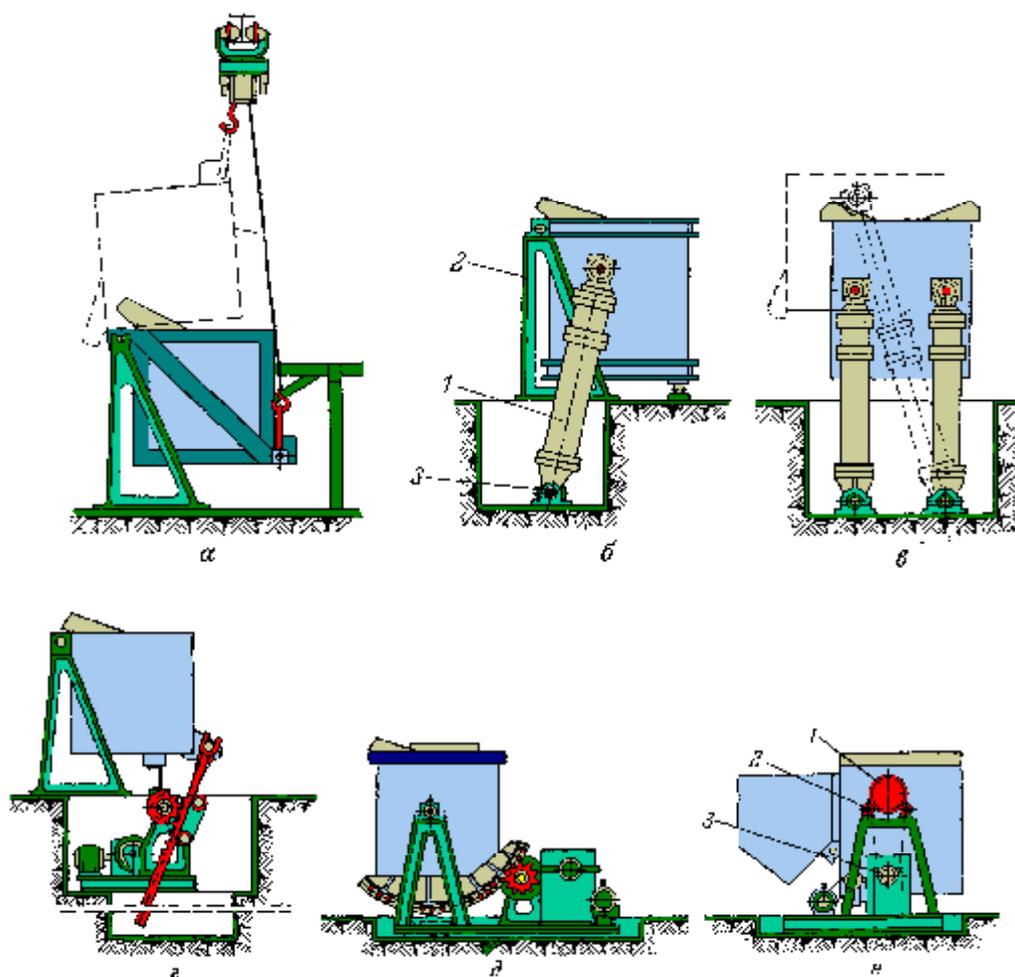


Рис. 18. Механизмы наклона индукционных печей:

а - тельферный; б - гидравлический; в - гидравлический с наклоном в обе стороны;  
 г - с зубчатой рейкой; д - с цевочным сектором; е - с цепной передачей

На рис. 19 приведены различные положения тигля печи при работе гидропривода. Тигель должен поворачиваться на угол не менее  $95^\circ$  при сливе металла

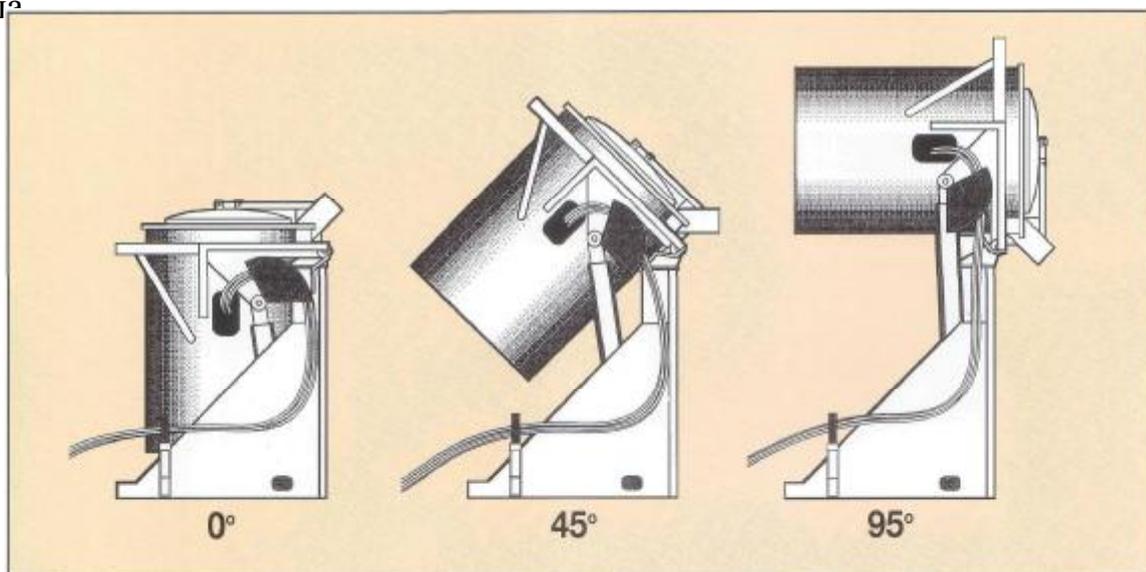


Рис. 19. Положения печи при работе гидропривода