

The main tendencies of development of induction crucible furnaces are considered. Constructive differences of crucible furnaces in comparison with fuel furnaces are given. The area of their application is specified.

А. Н. САХАРЕВИЧ, БНТУ

Научный руководитель канд. техн. наук, доцент Н. Ф. НЕВАР, БНТУ

УДК 634.377.

ИНДУКЦИОННЫЕ ТИГЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОТЛИЧИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Индукционная плавильная тигельная печь (рис. 1) представляет собой цилиндрическую электромагнитную систему с многовитковым индуктором 1. Поскольку загрузка 2 нагревается до температуры, превышающей температуру плавления, обязательным элементом конструкции печи является тигель – сосуд, в который помещается расплавляемая шихта. В зависимости от электрических свойств материала тигля различают индукционные печи с непроводящим (рис. 1, а) и проводящим (рис. 1, б) тиглем. К первой группе относятся печи с диэлектрическим керамическим тиглем 3, предназначенные для плавления металлов. В таких печах загрузка (садка) нагревается индуктированным в ней током, тигель же эквивалентен воздушному зазору.

Ко второй группе относятся печи со стальным, графитовым или графито-шамотным тиглем 4, обладающим большей или меньшей электропроводностью. Если толщина стенки тигля более чем вдвое превышает глубину проникновения тока в материал тигля, то можно считать, что индуктированный ток сосредоточен в стенке тигля, загруз-

ка же прогревается только путем теплопередачи и может не обладать электропроводностью. При меньшей толщине стенки тигля электромагнитное поле проникает в загрузку и энергия выделяется как в стенке тигля, так и в самой загрузке, если она электропроводна. Печи с проводящим тиглем имеют теплоизоляцию 5.

По характеру рабочей среды индукционные тигельные печи можно разделить на открытые, работающие в атмосфере, и вакуумные. Конструкции вакуумных печей обеспечивают как плавку, так и разливку металла в вакууме, благодаря чему содержание растворенных в металле газов получается очень низким.

По частоте питающего тока индукционные тигельные печи можно классифицировать следующим образом:

- высокочастотные с питанием от ламповых генераторов;
- среднечастотные, работающие на частоте 500–10000 Гц с питанием от вентильных или машинных преобразователей частоты;
- работающие на частотах 150 и 250 Гц с питанием от статических умножителей частоты;
- работающие на частоте 50 Гц с питанием от сети; при значительной мощности оборудованные симметрирующими устройствами.

Существуют три конструкции, различные по способу проведения магнитного потока с внешней стороны индуктора (рис. 2): магнитный поток проходит по магнитопроводам из трансформаторной стали (закрытая конструкция); по воздуху, стальные конструктивные части защищаются от интенсивного нагрева с помощью медного листа, экранирующего магнитное поле (экранированная конструкция) и магнитный поток проходит по воздуху (открытая конструкция).

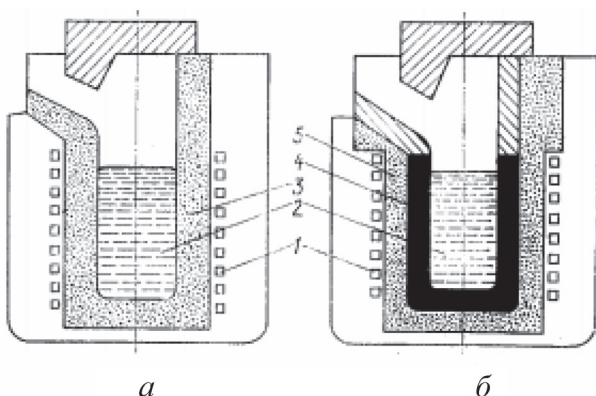


Рис. 1. Устройство индукционной тигельной печи

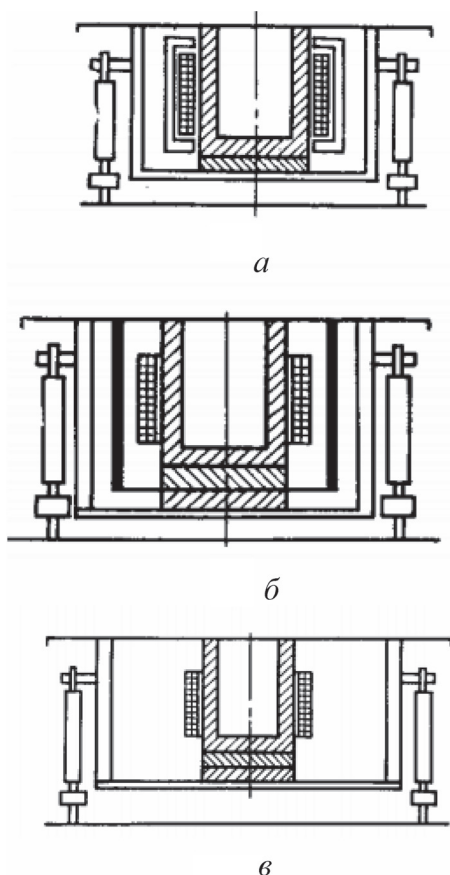


Рис. 2. Варианты проведения магнитного потока вне тигля: *a* – магнитный поток проходит по магнитопроводам; *б* – по воздуху, стальные конструктивные элементы защищены медным экраном; *в* – магнитный поток проходит по воздуху

Рассмотрим приведенные варианты конструкций.

Открытая конструкция. Вне тигля магнитное поле проходит по воздуху. Эта конструкция в основном целесообразна для малых печей.

Закрытая конструкция. В такой конструкции магнитный поток вне катушки проходит по радиально расположенным пакетам трансформаторной стали – магнитопроводам. Число магнитопроводов, их параметры зависят от габаритов печи, мощности и частоты. Закрытые конструкции используют почти исключительно в печах промышленной частоты и индукционных печах повышенной частоты большой емкости.

Экранированная конструкция. Компактная, что однако достигается ценой дополнительных затрат. Кроме того, замкнутый экранирующий кожух не позволяет осуществить удобное и всестороннее наблюдение за индуктором. В связи с этим конструкция не может получить широкого применения.

Особенности плавки. В основе работы тигельной печи лежит трансформаторный принцип передачи энергии индукцией от первичной цепи ко вторичной. Подводимая к первичной цепи электрическая энергия переменного тока превращается

в электромагнитную, которая во вторичной цепи переходит снова в электрическую, а затем в тепловую. Индукционные тигельные печи также называют индукционными печами без сердечника. Печь представляет собой плавильный тигель, как правило, цилиндрической формы, выполненный из огнеупорного материала и помещенный в полость индуктора, подключенного к источнику переменного тока (рис. 3). Металлическая шихта (материал, подлежащий плавлению) загружается в тигель и, поглощая электрическую энергию, плавится. В тигельной печи первичной обмоткой служит индуктор, обтекаемый переменным током, а вторичной обмоткой и одновременно нагрузкой – сам расплавляемый металл, загруженный в тигель и помещенный внутри индуктора.

Магнитный поток в тигельной печи проходит в той или иной степени по самой шихте. Поэтому для работы печи без сердечника имеют большое значение магнитные свойства, а также размеры и форма кусков шихты.

Когда в качестве шихты применяют ферромагнитные металлы, то до того момента, пока их температура еще не достигла точки Кюри, т. е. 740–770° С, их магнитная проницаемость сохраняет свою величину. В этом случае шихта будет играть роль не только вторичной обмотки и нагрузки, но и незамкнутого сердечника. Иначе говоря, при плавке в тигельной печи ферромагнитных металлов разогрев шихты в первый период (до точки Кюри) произойдет не только за счет тепла, выделяемого от циркуляции в ней вихревых токов, но и за счет потерь на ее перемагничивание, которое в этот период наблюдается в шихте. После точки Кюри ферромагнитные тела теряют свои магнитные свойства и работа индукционной печи становится такой же, как работа воздушного трансформатора, т. е. трансформатора без сердечника.

Тигельная печь по принципу действия подобна воздушному трансформатору.

Мощность, а следовательно, и тепло, выделяемое вихревыми токами, которые наводятся и цир-

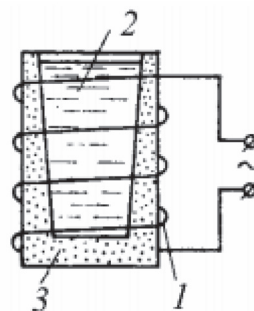


Рис. 3. Индукционная плавка металлов в тигельной печи: 1 – индуктор; 2 – расплав; 3 – огнеупорный тигель

кулируют в садке, зависят от частоты переменного магнитного поля. При промышленной частоте 50 Гц концентрация энергии, выделяемой вихревыми токами, незначительна и не превышает несколько ватт на 1 см поверхности. Поэтому для эффективной работы печей без сердечника приходится питать их токами повышенной, а в отдельных случаях и высокой частоты, что достигается установкой специальных генераторов частоты.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования печей без сердечника, частота питающего тока может быть соответственно понижена в зависимости от диаметра садки, т. е. емкости печи, и удельного сопротивления расплавленного металла.

Вследствие поверхностного эффекта эти наведенные в садке токи достигают максимальной величины на внешней поверхности последней и значительно уменьшаются от краев к середине. Такое уменьшение плотности тока по мере удаления от поверхности к центру происходит по сложному закону (комбинация функций Бесселя). При большом сечении проводника или при большой частоте тока уменьшение плотности тока по мере удаления от поверхности к центру проводника происходит по экспоненциальному закону.

Расплавленный металл в индукционной тигельной печи обжимается электромагнитным полем. В средней по высоте части цилиндрического тигля, где не сказывается краевой эффект, силы электродинамического взаимодействия индуцированного тока и магнитного поля индуктора направлены радиально к оси цилиндра и убывают от максимального значения на поверхности до нуля на оси. Создаваемое этими силами давление сжатия возрастает от поверхности к оси.

Тигельная печь представляет собой относительно короткую электромагнитную систему (отношение высоты загрузки к диаметру редко превосходит 1,5), поэтому электродинамические силы направлены строго радиально только в средней по высоте части тигля. Ближе к верхнему и нижнему краям тигля, где магнитное поле искажается и ли-

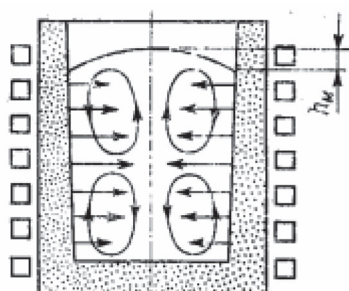


Рис. 4. Двухконтурная циркуляция металла в индукционной тигельной печи

нии его не идут параллельно оси, радиальная составляющая электродинамических сил уменьшается, как показано горизонтальными стрелками на рис. 4.

Под действием такой системы сил металл в средней части тигля перетекает от периферии к оси, затем по оси тигля выжимается вверх к зеркалу ванны и вниз ко дну тигля. Вверху и внизу он перетекает к стенкам и вдоль стенок возвращается к средней части тигля, совершая так называемую двухконтурную циркуляцию. Сам факт электродинамической циркуляции металла, которая может быть весьма интенсивной, является достоинством индукционной тигельной печи, выгодно отличающим ее от дуговой печи. Циркуляция ускоряет расплавление, выравнивает температуру и химический состав ванны, способствует взаимодействию металла со шлаком. Однако описанная двухконтурная циркуляция имеет и серьезные недостатки. Во-первых, в каждом из контуров, т. е. в верхней и нижней половинах ванны, металл циркулирует отдельно, слабо смешиваясь. Во-вторых, на поверхности ванны образуется выпуклый мениск, с возрастанием высоты которого приходится увеличивать количество шлака, поскольку он должен полностью покрывать поверхность металла. При этом шлак взаимодействует с огнеупором тигля в широком поясе, разъедая его и способствуя загрязнению ванны. Кроме того, при увеличении количества шлака он получается более холодным, поскольку в индукционной печи шлак нагревается только путем теплопередачи от металла. Понижение температуры шлака замедляет протекание химических реакций и увеличивает продолжительность плавки. Как правило, высота мениска (рис. 4) не должна превышать 15 % полной высоты металла по оси тигля.

Выводы

Сочетание таких качеств, как достаточно высокая стоимость электрооборудования и низкий КПД, определяет область применения индукционных тигельных печей — плавка легированных сталей и синтетического чугуна, цветных тяжелых и легких сплавов, редких и благородных металлов. Поскольку область применения этих печей ограничивается не техническими, а экономическими факторами, то по мере увеличения производства электроэнергии она будет непрерывно расширяться, распространяясь на все более дешевые металлы и сплавы.

Основной тенденцией развития индукционных тигельных печей является рост как единичной, так и суммарной емкости парка печей, связанный, прежде всего, с потребностью в больших количествах высококачественного металла. Кроме того, при увеличении

емкости повышается КПД печи и снижаются удельные расходы на ее изготовление и эксплуатацию.

По сравнению с топливными печами производительность тигельных индукционных печей выше; кроме того, плавка в тигельных индукционных печах дает металл более высокого качества и потери выплавляемых сплавов меньше.

Тигельные печи все чаще стали использовать в комплексе с другими плавильными агрегатами (вагранками, дуговыми печами). В этих случаях металл, предварительно расплавленный в указанных печах, поступает в индукционную электропечь для рафинирования и доведения до заданного химического состава.