

ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, Л.И. Фаерман
Российская электротехнологическая компания, г. Екатеринбург

Российской электротехнологической компанией («РЭЛТЕК») разработаны и освоены в производстве индукционные плавильные системы средней частоты (250 ÷ 10000 Гц) нового поколения с печами емкостью до 10 тонн. Разработка производилась специалистами НТЦ – РЭЛТЕК в сотрудничестве с рядом ведущих организаций России и с использованием мирового опыта проектирования подобных систем.

В литейном производстве наблюдается устойчивая тенденция в увеличении объемов использования индукционных тигельных печей (ИТП).

В настоящее время в чугунолитейном производстве России насчитывается порядка 2740 плавильных агрегатов, в том числе 76% вагранок, 23% - индукционных электропечей и миксеров и около 1% - электродуговых печей переменного и постоянного тока. На большинстве предприятий основные фонды амортизированы до 70-80%, поэтому выбор рациональной и экологичной технологии плавки различных металлов, а также типа плавильного агрегата является чрезвычайно актуальной задачей для многих предприятий, т.к. в рыночных условиях решающей становится технико-экономическая эффективность процесса плавки.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СРЕДНЕЧАСТОТНОЙ ПЛАВКИ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Для плавки чугуна и стали наибольшее распространение получили плавильные агрегаты, использующие огневые методы – печи-вагранки и электронагрев – индукционные и дуговые печи. Индукционные печи средней частоты (ИПСЧ) обладают несомненными техническими и экономическими преимуществами, обусловленными эффектом внутреннего нагрева шихты вихревыми токами и потерями на перемагничивание ферромагнетиков в сильных электромагнитных полях повышенной частоты. Индукционный метод обеспечивает выделение теплоты непосредственно в металле без теплопередачи излучением или конвекцией, сопровождаемых значительными потерями, поэтому индукционные печи имеют значительно более высокий технологический КПД, чем агрегаты, работающие на топливе.

Однако с учетом потерь при выработке и распределении энергии в сфере энергоснабжения индукционные печи расходуют первичной энергии 1500-1700 кВт·ч на тонну выплавляемого чугуна при потреблении электроэнергии 520-560 кВт·ч/т. По этому показателю ИПСЧ приближаются к вагранкам с холодным и горячим дутьем, которые потребляют 1250-1700 кВт·ч/т, причем, наименьший расход энергии достигается в газовых вагранках (ГВ) и составляет 60% от потребления первичной энергии ИПСЧ [1].

По сравнению с индукционными печами промышленной частоты (ИППЧ) плавка чугуна на средней частоте также имеет преимущества, состоящие в следующем:

- расход электроэнергии вдвое меньше, чем в ИППЧ, работающих в непрерывном цикле плавки с частичным сливом металла и периодической дозагрузки шихты;
- садочный режим плавки, т.е. без использования переходящего от плавки к плавке остатка жидкого металла («болота») позволяет исключить предварительную сушку шихты и связанные с ней затраты, кроме этого, сократить расходы на футеровку, т.к. долговечность футеровки при садочном режиме плавки возрастает, и, наконец, исключить непроизводительные затраты труда, электроэнергии и материалов, связанные с невозможностью отключения ИППЧ на время перерывов в работе литейного производства;
- допустимая удельная мощность, подводимая к металлу, в 3 раза выше, чем в ИППЧ (ИПСЧ - 1000 кВт·ч/т, ИППЧ - 300 кВт·ч/т), что обеспечивает короткие циклы плавки (40-45 минут), повышает теплотехнический КПД и позволяет оптимизировать процесс

образования центров кристаллизации, благодаря одноразовому нагреву металла и меньшей средней температуре в течение плавки, чем у ИППЧ, работающим с «болотом»;

- возможность работы в режиме стабилизации активной мощности на всем цикле плавки, начиная с «холодного» состояния шихты, при котором передача активной мощности на средних частотах происходит за счет ферромагнитных свойств шихты, и заканчивая расплавом металла, когда активная мощность подводится за счет протекания вихревых токов в узком слое ванны расплава, что позволяет повысить эффективность использования установленной мощности электрооборудования при высоких показателях качества потребляемой электроэнергии.

По сравнению с дуговыми печами переменного тока (ДСП) и дуговыми печами постоянного тока (ДППТ) индукционная плавка на средней частоте имеет более высокие показатели технико-экономической эффективности. Потребление электроэнергии на тонну выплавляемого чугуна в ДСП несколько выше, чем в ИПСЧ и составляет 600-800 кВт·ч/т. В ДППТ этот показатель лучше – 475-550 кВт·ч/т. Однако широко известные недостатки электродуговой плавки значительно снижают эффективность этого метода. К ним относятся:

- интенсивные пыле- и газовыбросы, что требует дополнительных затрат на устройство газоочистки, особенно в густонаселенных регионах;
- значительный расход графитовых электродов;
- угар металла и легирующих элементов;
- интенсивное воздействие на питающие энергосистемы, связанное с резконеверным характером нагрузки в цикле плавки, возникновением эксплуатационных коротких замыканий, низким качеством потребления электроэнергии, что требует значительных затрат на фильтро-компенсирующие устройства и устройства быстродействующей динамической компенсации фликеров.

В целом, технико-экономическая эффективность того или иного метода плавки может быть оценена относительной себестоимостью одной тонны жидкого чугуна, которая учитывает такие статьи затрат как стоимость шихтового материала, стоимость огнеупоров и электродов, стоимость энергозатрат, стоимость содержания и эксплуатации оборудования, удельные капиталовложения. В таблице 1 приведена себестоимость 1 т жидкого чугуна для различных плавильных агрегатов относительно себестоимости плавки в газовой вагранке, а также расход энергии на тонну выплавляемого чугуна [2].

Таблица 1

ТИП ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА	ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СТОИМОСТЬ 1 т ЧУГУНА	РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, кВт·ч/т
ГВ	1,0	50-70
ДСП	2,0	600-800
ДППТ	1,8	475-550
ИППЧ	2,0	1200-1300
ИПСЧ	1,4	500-600

Индукционные печи средней частоты получили широкое распространение не только в технологических процессах плавки, но и выдержки, а также разливки металла. Стремительно расширяется применение среднечастотных в производстве жаропрочных и высоколегированных сталей, прецизионных сплавов, в производстве цветных и драгоценных металлов. Это объясняется технологическими особенностями, которые делают применение ИПСЧ особенно эффективными.

Еще в большей степени технико-экономическая эффективность индукционной плавки на средней частоте проявляется при использовании ИПСЧ в «дуплекс-процессах». Особенность дуплексной плавки в том, что ИПСЧ служит в качестве печи ожидания, в которой производится выдержка металла и доведение его до нужных параметров, а плавка металла может осуществляться в печах другого типа.

На рисунке 1 показана теплоэнергетическая эффективность печей разного типа на стадии плавки и выдержки чугуна в печах разного типа

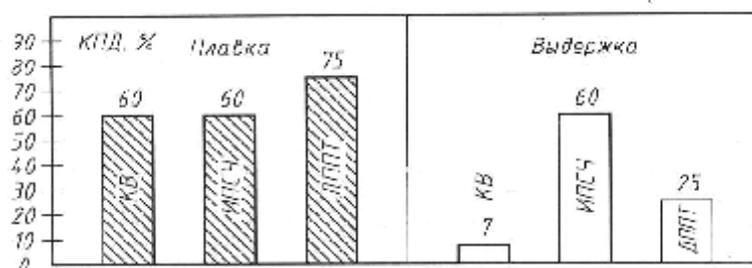


Рисунок 1

Как видно из приведенной гистограммы, на этапе плавки эффективность коксовой вагранки и индукционной печи (ИПСЧ) примерно одинакова и несколько ниже, чем в электродуговой печи постоянного типа (ДППТ). На этапе выдержки металла эффективность ИПСЧ намного выше, чем в вагранках и дуговых печах, поэтому в дулексных процессах наиболее экономичным является использование в качестве второго плавильного агрегата индукционных печей.

Дулекс-процесс плавки чугуна может быть организован комбинацией плавильных агрегатов различного типа.

На рисунке 2 приведена гистограмма энергетических расходов различных видов плавильных агрегатов относительно энергозатрат коксовой вагранки.

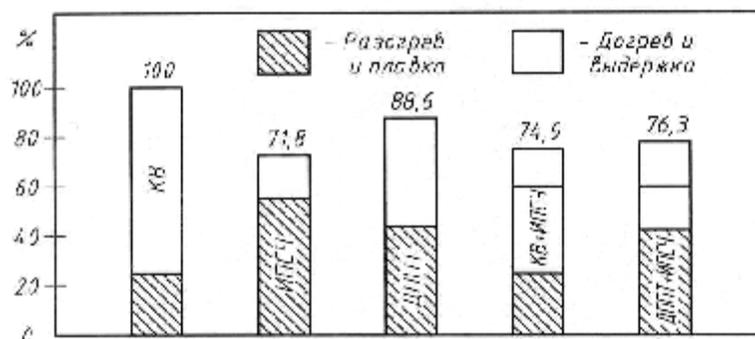


Рисунок 2

Как видно из рисунка 2, самой дешевой плавкой по энергозатратам является одиночная плавка в индукционной печи средней частоты со средним расходом электроэнергии 560 кВт·ч/т. Далее идет дулексная плавка KB + ИПСЧ. В коксовой вагранке производится разогрев и плавка чугуна до температуры 1370 °С с удельным расходом кокса 13,3%, а затем металл переливается в ИПСЧ и догревается в температурном диапазоне 1300 – 1550 °С с удельным расходом 106 кВт·ч/т. Энергозатраты при такой комбинации оборудования на 25% ниже, чем при одиночной плавке в KB. Примерно на том же уровне по энергозатратам находится дулексная плавка ДППТ + ИПСЧ. При этом дуговая печь расходует 544 кВт·ч/т для получения расплава чугуна с температурой 1370 °С, а в индукционной печи производится догрев и выдержка металла (1300 ÷ 1500 °С) с расходом энергии 106 кВт·ч/т [3].

В литейном производстве сегодня наиболее распространены коксовые вагранки, однако по экономическим соображениям, техническим возможностям и экологической безопасности KB не отвечают современным требованиям. Альтернативой KB является

газовая вагранка. Современные тенденции по ценам на газ (100 \$ за 1000 м³) и кокс (200 \$ за 1 тонну) во всем мире в пользу газа. Следовательно, ГВ по затратам на энергоносители более экономичны, чем КВ. К тому же, газ используется полностью, а кокс сгорает при образовании 10% СО и имеет меньшую теплотворную способность. Поэтому затраты на получение равного количества теплоты из газа почти вдвое ниже. Однако затраты на огнеупоры выше в ГВ, чем в КВ примерно в 1,6 раза, а приведенная себестоимость чугуна лишь на 10% ниже по сравнению с КВ. В связи с этим, совершенно очевидно, что наибольшую технико-экономическую эффективность и экологическую безопасность для организации дуплекс-процесса плавки и выдержки чугуна имеет комбинация плавильных агрегатов ГВ + ИПСЧ.

Комплекс плавильных агрегатов дуговая печь + индукционная печь реализует технологию дуплексной плавки металла, в котором дуговая печь используется в качестве плавильной, а индукционная печь – в качестве теплосохранивающей. Электродуговая печь позволяет плавить шихту низкого качества, плохо отсортированную, содержащую в больших количествах ржавый стальной лом большими кусками. Однако в электродуговой печи трудно регулировать химический состав металла и сочетать теплосодержание и непрерывную плавку. В дуплексной плавке при использовании индукционной печи в качестве второго агрегата решается задача уравнивания противоречия между количеством производимого металла и потребляемого литейными цехами, а также завершается процесс рафинирования и модификации чугуна.

Из всего вышеизложенного следует, что при организации дуплексной плавки любой комбинацией плавильных агрегатов самым экономичным является использование в качестве второго плавильного агрегата для догрева и теплосхранения металла индукционной печи средней частоты.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СРЕДНЕЧАСТОТНОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛА

Технология плавки чугуна

В индукционных печах возможно получение чугуна разнообразного состава, при этом использование в качестве шихты отходов кузнечного, прокатного листоштамповочного, токарно-фрезерного переделов существенно снижает производственные затраты при получении чугуна требуемых марок. В индукционных печах можно выплавлять чугун с содержанием стального скрапа и стружки (самого дешевого шихтового материала) вплоть до 100% благодаря хорошей возможности легирования. Напротив, в газовых вагранках применение стального лома ограничено 40-60%, т.к. управление процессом науглероживания бескоксовой плавки весьма затруднительно. А использование стальной и чугунной стружки вообще исключено из-за большого угара. Для получения серого чугуна и высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ), имеющим целый ряд преимуществ перед другими сплавами, необходимо точно управлять химическим составом по многим элементам и, прежде всего, по углероду, сере, марганцу, хрому, фосфору и др., поскольку в ИПСЧ плавка ведется с так называемым "холодным" шлаком, практически не участвующем в химических реакциях, управление химическим составом сплава по ходу плавки производится добавлением легирующих материалов и точным управлением температурой расплава. Сочетание этих возможностей позволяет реализовать технологию получения отливок, в которых значительно снижены внутренние напряжения и существенно повышены прочностные характеристики. По этой методике на стадии легирования расплава, полученного из шихты с содержанием 40-80% стального лома, при повышении температуры до 1450°С добавляется углерод, что позволяет достичь его содержания в расплаве 3,8-3,9%. Затем расплав догревается до температуры 1530-1550°С и выдерживается при этой температуре 10-30 минут. На стадии выдержки происходит процесс науглероживания расплава, скорость которого зависит от интенсивности электромагнитного перемешивания и способа организации циркуляционных потоков внутри ванны расплава. Кроме этого, на

стадии выдержки происходит очистка от неметаллических включений и дегазация расплава, а также протекает процесс "созревания" металла. При использовании этой методики в производстве отливок не только повышается прочность, но и уменьшается их сжатие, не превышающее 0,3%, что в конечном итоге приводит к снижению напряжения в отливках, а это позволяет избежать энергозатратной операции их отжига. Подобное производство отливок со сниженным напряжением невозможно организовать без использования индукционных печей.

Характеристики чугуна в значительной мере зависят от содержания вредных примесей и, прежде всего, серы. Для модификации на ЧШГ серый чугун должен иметь низкое содержание серы. В вагранках выплавить металл с низким содержанием серы невозможно, и требуется десульфуризация расплава. Известные способы десульфуризации чугуна требуют установки специальных устройств или индукционных миксеров. Поэтому при получении серого чугуна требуемых марок или для модификации на ЧШГ используются "дуплекс-процессы". В дуплекс-процессе плавка металла ведется в коксовых или газовых вагранках с возможным содержанием в шихте большой доли первичных материалов. Затем осуществляется перелив расплава в ИПСЧ, и вводятся добавки, позволяющие десульфурить чугун, точно вывести его химический состав. Кроме этого, в ИПСЧ обеспечивается выдержка металла при заданном температурном режиме. Однако себестоимость плавки чугуна в любом случае получается меньше при моно-процессе, и наиболее полно технологическим требованиям подготовки чугуна соответствует индукционный метод плавки в ИПСЧ.

Весьма существенным преимуществом плавки в ИПСЧ по сравнению с вагранками и дуговыми печами является пониженное на 25-30% содержание газа (азота, водорода, кислорода) в расплаве металла, а также значительное уменьшение содержания неметаллических примесей. Это повышает прочность отливок и уменьшает каверны на их поверхности, что позволяет снизить отходы металла при дальнейшей обработке на 20-25% и уменьшить металлоемкость оборудования.

Прочность и все другие свойства сплавов, в конечном счете, определяются их чистотой от примесей, формой, размером и распределением зерен, т.е. структурой. При этом в понятие структуры включается как микроструктура, так и макроструктура – наличие в металле газовых и усадочных раковин, пористости, трещин, неметаллических включений и т.д. Таким образом, задача повышения качества металла сводится к получению соответствующей структуры, свободной от каких-либо дефектов. Измельчение зерна кристаллической структуры достигается повышением скорости зарождения центров кристаллизации, которая регулируется вводом модификаторов. Эффектность действия модификаторов возрастает при максимально равномерном распределении в объеме металла, и чем больше энергия извне будет внесена в расплав для перемешивания, тем выше эффект модифицирования. В индукционных печах имеется возможность управления процессами электромагнитного перемешивания изменением частоты возбуждения тока в обмотках индуктора, организацией пульсирующего и бегущего электромагнитного поля в ванне расплава металла и управления удельным силовым давлением, а также перераспределением мощности по высоте индуктора.

Благодаря садовому режиму работы в ИПСЧ, при котором металл не подвергается многократному перегреву, и щадящему температурному режиму выдержки чугуна в период разлива, в расплаве сохраняются центры кристаллизации, что также способствует формированию мелкозернистой структуры в отливках.

Таким образом, с производственно технологической точки зрения для литейного производства ИПСЧ имеют существенные преимущества по сравнению с вагранками и дуговыми печами. Более высокая удельная мощность позволяет быстрее нагревать чугун (со скоростью 30-35 °С/мин.), а потери исходного материала из-за угара снижаются. Циркуляция расплава под действием электромагнитных сил в индукционной тигельной печи приводит к равномерному температурному распределению и хорошему перемешиванию. В сочетании с отсутствием загрязняющих веществ это обеспечивает высокую точность химического

состава металла, расплавленного индукционным методом. Перегрев расплава, труднодостижимый при использовании вагранок, можно успешно реализовать в индукционных печах. Эти технологические преимущества дают наибольшую гарантию качества чугуна и возможность получения высокопрочных специальных чугунов, а также обеспечивают более высокое качество литых изделий.

Технология плавки цветных металлов

В связи с быстрым развитием автомобилестроения, самолетостроения и других новейших направлений машиностроения в гражданских и оборонных отраслях значительно возросла выплавка сплавов цветных металлов. Мировая тенденция развития печных агрегатов для производства сплавов цветных металлов характеризуется следующими положениями:

- печи на коксе практически не используются из-за высокого загрязнения сплавов, трудности получения отливок высокого качества, низкой экологичности и высокого энергопотребления;
- сокращается использование пламенных отражательных печей ввиду повышения угара металла и насыщения его газами, особенно при использовании легковесной садки и существенного загрязнения продуктами сгорания топлива;
- по сути прекратилось применение электродуговых печей также по причине большого угара металла, трудности регулирования химсостава и гомогенности сплава, а также из-за больших затрат энергии при теплосохранении расплава;
- печи сопротивления используются только как теплосохраняющие и практически не применяются как плавильные агрегаты из-за низкой производительности;
- быстро расширяется сфера применения индукционных печей: тигельных и канальных на промышленной частоте, тигельных плавильных на средней частоте и тигельных с укороченным индуктором для выдержки металла, - которые используются во всех видах выплавки цветных металлов, процессах теплосохранения и разлива.

Тигельные печи средней частоты вытесняют индукционные печи промышленной частоты и применяются для скоростных плавов малыми партиями. Канальные индукционные печи промышленной частоты наиболее эффективны как теплосохраняющие и разливочные. Крупные канальные индукционные печи используются для выплавки и накопления отдельных марок цветного металла в ночное время, когда стоимость электроэнергии самая низкая, а в дневное время обеспечивается непрерывная разливка или литье в крупные формы.

При выплавке сплавов цветных металлов на заводах часто используются современные типы дуплекс-процесса. В качестве первого плавильного агрегата, например, может быть индукционная тигельная печь средней частоты для проведения скоростной плавки, а в качестве второго агрегата используется канальная индукционная печь промышленной частоты или тигельная с укороченным индуктором для накопления металла, регулирования его химсостава и теплосохранения.

В некоторых случаях применяется триплекс-процесс выплавки цветных металлов. Он объединяет три связанных процесса - выплавку, теплосохранение, разливку, что позволяет точно контролировать состав и температуру сплава и в полной мере использовать производительность литейного участка.

Обобщая результаты сравнения различных плавильных агрегатов для плавки цветных металлов с точки зрения технико-экономической эффективности, экологической безопасности и технологическим возможностям, можно сделать вывод, что индукционный метод плавки наиболее полно отвечает требованиям современного производства. Методы пламенного и электродугового нагрева по многим критериям уступают индукционной плавке. Только возможность использования в качестве загрузки с высоким содержанием примесей является технологическим преимуществом пламенных и электродуговых плавильных агрегатов. Однако в качестве главного аргумента в пользу плавильных установок с топливным нагревом обычно приводится низкая стоимость энергии. Но если

принять во внимание не только прямые расходы, но и расходы на обслуживающий персонал, накладные расходы и затраты на достижение высокого качества продукции, затраты на утилизацию и обогащение ядовитых в известной степени солевых шлаков, образующихся при использовании флюсов во время плавки цветных металлов, то во многих случаях практически исчезает и это преимущество методов пламенного нагрева.

Среди известных конструкций индукционных печей наиболее эффективны тигельные индукционные печи средней частоты. Они не имеют недостатков, свойственных канальным индукционным печам, связанных с необходимостью систематической очистки каналов, затрудненным переходом с плавки одной марки металла на другую, а также с необходимостью заполнения рабочих каналов горячим расплавом даже при длительных остановках. Тигельные печи допускают быстрый переход с одной марки на другую. Тигель менее чувствителен к охлаждению, а его состояние можно визуальнo контролировать. Тигельная печь работает в садочном режиме с холодной завалкой шихты и обеспечивает интенсивное перемешивание металла, что позволяет ускорить плавление твердых кусков и усреднить температуру и химсостав ванны расплава металла.

КОНСТРУКЦИИ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Российской электротехнологической компанией разработан ряд индукционных тигельных печей средней частоты для скоростных плавок черных и цветных металлов, отвечающих современным требованиям металлургического и литейного производства. Наилучшие показатели эффективности ИПСЧ во многом определяются оптимальным выбором геометрических параметров индуктора частоты тока возбуждения и удельной активной мощности для плавки определенного металла, а также физическими характеристиками и толщиной футеровки.

Для плавки черных металлов заводом "РЭЛТЕК" производятся тигельные печи серии ИПП емкостью от 60 до 400 кг, работающие на частоте 2400 Гц. Технические характеристики этих печей приведены в таблице 2.

Таблица 2

ТИП ОБОРУДОВА НИЯ	ЕМКОС ТЬ ТИГЛЯ, т	НОМИНАЛЬН АЯ ЧАСТОТА ТОКА ИНДУКТОРА, Гц	НОМИНАЛЬН АЯ АКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ, кВт	ВРЕМЯ ПЛАВКИ ЧУГУНА, мин.	УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЭЛЕКТРОЭ НЕРГИИ, кВт ч/т
ИПП-0,06-2,4	0,06	2400	100	45	540
ИПП-0,16-2,4	0,16	2400	160	55	550
ИПП-0,25-2,4	0,25	2400	250	55	550
ИПП-0,40-2,4	0,40	2400	320	75	560

При высоких удельных мощностях 800-1000 кВт/т обеспечивается высокая скорость подъема температуры металла (оптимальные ее значения 30÷35 °С/мин), что позволяет сократить циклы плавки чугуна до 45 минут при удельном расходе электроэнергии примерно 560 кВт ч/т.

Печи данной серии имеют прочную конструкцию, каркас которой выполнен из нержавеющей стали. Индуктор изготавливается из прямоугольной медной трубки. Толщина стенки трубки выбрана, исходя из условий прочности и минимизации электротехнических потерь. Витки индуктора фиксируются на вертикальных изоляционных стойках. Изоляция индуктора выполнена так, чтобы обеспечивался выход влаги наружу при просушивании "мокрых" футеровок. Подиумная часть печи выполняется из литого армированного жаропрочного бетона. Расположение индуктора относительно тигля выбрано так, чтобы

максимально уменьшить износ футеровки в верхней зоне при сохранении гарантированного перемешивания металла.

Для данных объемов и рабочей частоты в конструкции печей не предусмотрена установка магнитопроводов, поэтому для уменьшения нагрева полями рассеяния корпусные элементы выполнены из немагнитных металлов.

Индукционные печи серии ИППМ рассчитаны на объемы плавки черных металлов от 1 до 10 тонн. Печи этой серии работают на частотах 200÷1000 Гц, их технические характеристики приведены в таблице 3.

Таблица 3

ТИП ОБОРУДОВАНИ Я	ЕМКОСТ Ь ТИГЛЯ, т	НОМИНАЛЬН АЯ ЧАСТОТА ТОКА ИНДУКТОРА, Гц	НОМИНАЛЬН АЯ АКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ, кВт	ВРЕМЯ ПЛАВК И ЧУГУНА , мин.	УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЭЛЕКТРОЭ НЕРГИИ, кВт ч/т
ИППМ-1,0-1,0	1,0	1000	750	60	540
ИППМ -2,5-0,5	2,5	500	1100	80	560
ИППМ -6,0-0,25	6,0	250	3200	75	550
ИППМ -10,0-0,25	10,0	250	7000	60	530

Отличительной особенностью конструкции этих печей является то, что по внешней стороне индуктора устанавливаются магнитопроводы, позволяющие повысить напряженность магнитного поля в зоне расплава металла и увеличить КПД печи и, как следствие, снизить расход электроэнергии до 500÷520 кВт ч/т. Для снижения тепловых потерь в печах этой серии установлена над тиглем крышка с гидравлическим механизмом поворота.

Важное значение для обеспечения надежности и необходимого ресурса работы индукционных печей имеет технология выполнения и выбор огнеупорной футеровки. Условия работы футеровки в индукционных тигельных печах очень сложные. Она подвергается большим механическим воздействиям, особенно в печах большого объема. Из-за активного перемешивания наблюдается большой абразивный износ.

Поэтому толщина футеровки существенно влияет на показатели эффективной работы печи, ее стремятся сделать, по возможности, более тонкой, следовательно, она работает при больших температурных градиентах. Кроме этого, футеровка должна быть шлакоустойчивой, т.к. индукционные печи работают с "холодным" шлаком, активно взаимодействующим с материалом футеровки.

Для плавки черных металлов футеровку индукционных печей выполняют из кварцевой набивной массы. К достоинствам этого материала следует отнести высокую абразивную стойкость, малое изменение объема при разогреве, низкую стоимость. Однако известные недостатки: низкая термическая стойкость, образование довольно легкоплавких соединений при взаимодействии с расплавом, относительно низкая предельная температура (1640°C) – вызывают необходимость поиска материалов с более высокими характеристиками. Особый интерес среди огнеупоров нового поколения вызывают низкоцементные и керамические огнеупорные бетоны.

Низкоцементные бетоны обладают высокими показателями, которые превосходят прочие огнеупорные материалы по плотности, пористости, огнеупорности, термостойкости, шлакоустойчивости, не теряют своей механической прочности с повышением температуры.

Низкоцементные бетоны подразделяются на три класса – это низкоцементные огнеупорные бетоны, наливные вибрационные тиксотропные огнеупорные массы и керамические бетоны. Керамические бетоны по ряду показателей значительно превосходят прочие бетоны, прежде всего, по прочностным характеристикам (максимальные $\sigma_{изг.} = 90 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_{сж.} = 550 \text{ Н/мм}^2$).

Применение керамобетонов в виде фасонных изделий для футеровки индукционных печей показало, что стойкость футеровки возрастает более, чем в 10 раз по сравнению с аналогичными изделиями, полученными другими способами.

Предприятием "РЭЛТЕК" освоена технология механизированной вибронабивки керамобетона в индукционных печах серии ИТП емкостью 1-10 тонн, и разработан комплекс механизмов для реализации этого метода в производственных условиях заказчика.

Для контроля состояния тигля в процессе эксплуатации печи при набивке футеровки устанавливаются датчики прогара, которые позволяют определить место нахождения дефектов, пор и трещин, а также оценить общее состояние и степень износа футеровки по электрическим параметрам.

Автоматизация процесса загрузки и слива металла в индукционных печах большого объема обеспечивается применением специальных механизмов. В конструкции печей серии ИПП и ИППМ предусмотрена установка гидравлического механизма наклона печи, который позволяет осуществить подъем-переворот печного агрегата на угол 90-110° и обеспечить полное опоражнивание тигля от металла и шлаков. Для предотвращения аварийных ситуаций гидропривод снабжен резервным насосом и гидравлическим тормозом, предотвращающим падение печи на опоры при прорыве шлангов гидросистемы.

Все эти мероприятия позволяют резко увеличить межремонтный срок службы индукционной печи, значительно снизить количество аварий в процессе эксплуатации и максимально облегчить интеграцию этих агрегатов в существующую оснастку литейных цехов.

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ

Система электропитания для моно-процесса плавки

Система электропитания средней частоты (СЭПСЧ) строится, как правило, на основе статических преобразователей частоты, осуществляющих преобразование энергии трехфазной сети переменного тока промышленной частоты в энергию однофазного тока средней частоты.

Функционально преобразователи строятся по двухзвенной схеме и включают выпрямитель и автономный инвертор. В зависимости от мощности выпрямитель строится по 6-пульсной, 12-пульсной или 24-пульсной мостовой схеме с соответствующим соединением обмоток силового питающего трансформатора. При этом обеспечивается снижение гармонических составляющих входного тока до требуемого уровня.

Автономные инверторы строятся по схеме инвертора тока с параллельной компенсацией индуктора печи, инвертора напряжения с последовательной компенсацией индуктора печи или резонансного инвертора, в котором последовательно с нагрузочным контуром, образованным индуктором печи и параллельно соединенным блоком компенсирующих конденсаторов, включается коммутирующий колебательный контур [3]. Схемы инвертора тока и инвертора напряжения по сути дуальны, поэтому предпочтение той или иной схемы следует отдавать в зависимости от типа используемого полупроводникового прибора. В последние годы наблюдается значительный прогресс в создании силовых полупроводниковых приборов. Наряду с развитием по параметрам быстродействующих тиристоров, появились мощные IGBT транзисторы, что позволяет создавать мощные среднечастотные преобразователи на полностью управляемых полупроводниковых приборах.

Тиристоры наиболее эффективны в схемах с параллельной компенсацией нагрузки, поскольку имеют высокий класс напряжения и допускают последовательное соединение при относительно низкой мощности шунтирующих цепей, обеспечивающих равномерное распределение напряжения, что позволяет осуществлять преобразование энергии на высоких напряжениях и относительно небольших токах. Напротив, IGBT транзисторы более эффективны в схемах инверторов с последовательной компенсацией нагрузки, т.к.

допускают параллельное соединение модулей без применения делителей тока и требуют значительных затрат для обеспечения распределения напряжения при их последовательном соединении.

Транзисторные инверторы обеспечивают глубокое регулирование выходных параметров электрической энергии при высоких показателях качества потребляемой энергии. В них отсутствует проблема коммутационной устойчивости. Однако при создании преобразователей большой мощности до 10 МВт и выше тиристорные инверторы все же более предпочтительны ввиду значительно возросшей единичной мощности и динамических характеристик современных быстродействующих тиристоров. Проблема повышения надежности работы тиристорных преобразователей и диапазона регулирования выходных параметров энергии более успешно решается при использовании запираемых тиристоров или IGCT структур, которые только появились на мировом рынке силовых полупроводниковых приборов.

Предприятием "РЭЛТЕК" освоено производство тиристорных преобразователей частоты на основе инвертора типа серии ТПЧП, характеристики которых приведены в таблице 4

Таблица 4

ТИП ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	Упит., В	U _{вых.} , В	P _{вых.} , кВт	F _{вых.} , кГц	ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ, мм	МАССА, кг
ТПЧП-320-2,4	3x380	800	400	2,4	1200x800x2000	650
ТПЧП-400-1,0	3x380	800	400	1,0	1200x800x2000	650
ТПЧП-500-1,0	3x380	800	500	1,0	1330x800x2340	1100
ТПЧП-630-0,5	3x380	800	630	0,5	1330x800x2340	1100
ТПЧП-630-2,4	3x570	1000	630	2,4	1330x800x2340	1100
ТПЧП-800-1,0	3x570	1000	800	1,0	1330x800x2340	1200
ТПЧП-1000-0,5	3x570	1000	1000	0,5	1330x800x2340	1200
ТПЧП-1200-1,2	3x720	1600	1200	1,0	2440x870x2405	1400
ТПЧП-1600-0,5	3x720	1500	1600	0,5	2440x870x2405	1400
ТПЧП-1800-0,25	3x720	1400	1800	0,25	2440x870x2405	1400
ТПЧП-3600-0,25	3x900	1800	3600	0,25	3480x870x2405	2400
ТПЧП-7200-0,25	3x900	1800	7200	0,25	4000x1100x2405	4500

Самый мощный из них 7200 МВт имеет 12-пульсный выпрямитель и однофазный инвертор тока, который предназначен для питания печей емкостью 10 тонн. На рисунке 3 представлена схема системы электропитания индукционной печи большой емкости с трехсекционным индуктором и блоком компенсирующих конденсаторов, также состоящим из трех секций С_{Н1}, С_{Н2}, С_{Н3} и дополнительных секций С_{Д1}, С_{Д2}. Кроме этого в блоке компенсирующих конденсаторов установлены силовые коммутаторы К₁÷К₆. Данная схема СЭПСЧ позволяет реализовать несколько режимов плавки.

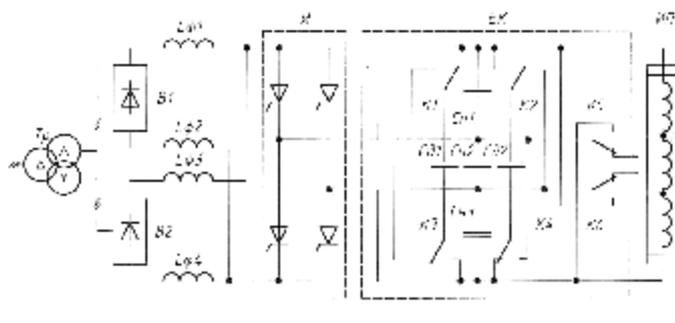


Рис. 3

На первой стадии разогрева и плавления шихты коммутаторы K_5 и K_6 соединяют отводы индукционной печи со средними выводами блока коммутирующих конденсаторов (БК), а коммутаторы K_1 ÷ K_4 подключают дополнительные секции конденсаторов параллельно секциям C_{H1} и C_{H2} . При этом $C_{H2} = C_{H1} + C_{Д1} = C_{H3} + C_{Д2}$ и напряжение на секциях индуктора примерно одинаково вследствие проявления эффекта резонанса тока высокодобротного нагрузочного контура, поскольку ток инвертора в 5-7 раз ниже контурного тока.

На этой стадии ведется быстрый разогрев шихты в режиме стабилизации мощности, подводимой к нагрузке. В процессе плавки периодически осуществляется подвал шихты, значительно изменяются эквивалентные параметры индуктора, поскольку в больших пределах изменяется удельное сопротивление материала шихты, теряются его ферромагнитные свойства при переходе точки Кюри, образуется жидкая фаза металла. Для поддержания постоянной мощности системами регулирования производится коррекция рабочей частоты инвертора. На рисунке 4 приведена диаграмма активной мощности, подводимой к нагрузке и массы металла в тигле. Процесс плавки ведется на повышенной частоте при допустимой удельной мощности (в 3-4 раза выше, чем в ИППЧ) по условию отсутствия выбросов металла из индуктора.

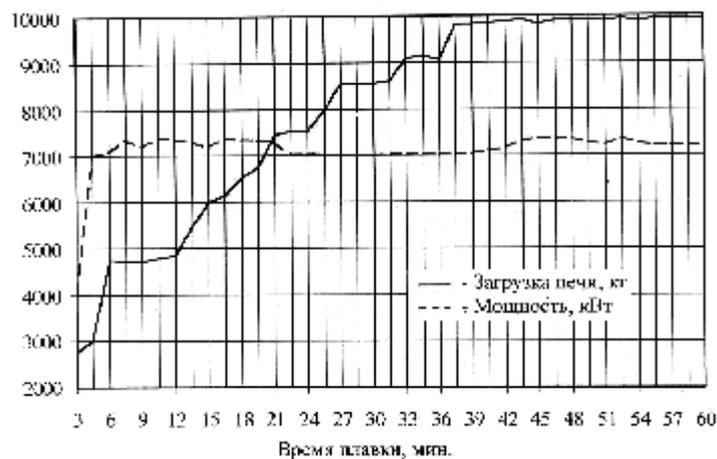


Рис. 4

На второй стадии, когда получен расплав металла, начинается этап легирования и коррекции химического состава металла. Рассматриваемая СЭПСЧ позволяет осуществить перераспределение мощности по секциям индуктора, иными словами, произвести фокусировку мощности в отдельных зонах тигля печи и обеспечить различные виды активного перемешивания металла.

Технология фокусирования мощности в индукторе представляет собой интерес для предприятий, производящих прецизионные сплавы. В этом случае возможно "включение" различных режимов передачи среднечастотной энергии в ванну расплава металла.

На рисунке 5 показаны различные режимы фокусирования мощности. Так режим фокусирования мощности в верхней части тигля (рис. 5а) может быть рекомендован при необходимости активного взаимодействия расплавленного металла со шлаком в режиме выдержки металла. В режиме плавки фокусирование мощности в верхней части индуктора полезно при введении легирующих добавок. Реализация этого режима фокусирования мощности достигается переключением дополнительной секции компенсирующих конденсаторов $C_{Д1}$, $C_{Д2}$ ключами K_1 , K_3 . При этом емкость нижней секции конденсаторов равна

$C_{H3} + C_{Д1} + C_{Д2}$, средней секции - C_{H2} , а верхней - C_{H1} . В результате такого перераспределения

емкости конденсаторов уменьшается напряжение на нижней секции и повышается на верхней секции индуктора.

Режим, изображенный на рис. 5б, способствует активному перемешиванию металла, как в верхней части печи, так и в нижней части, что удобно использовать как в режиме плавки, так и при его выдержке для получения гомогенной структуры металла. Он реализуется при равномерном распределении напряжения по секциям индуктора при положении ключей K_1 - K_4 , когда

$$C_{H2} = C_{H1} + C_{D1} = C_{H3} + C_{D2}$$

Режим, представленный на рисунке 5в, при котором фокусирование мощности осуществляется у основания индуктора, полезен в начальной стадии процесса плавки, когда быстрый разогрев металла в нижней части печи способствует скорейшему появлению жидкой фазы металла и ускорению процесса плавки.

В режиме выдержки металла фокусирование мощности у основания индуктора позволяет не вовлекать шлаки в ванну расплава металла, а также способствует более активному перемешиванию расплава вблизи дна печи, что весьма полезно для сплавов, имеющих состав металлов с резко дифференцированной плотностью. Данный режим реализуется в рассматриваемой СЭПСЧ переключением ключей K_2 , K_4 в положение, когда дополнительная секция конденсаторов C_{D2} подключается параллельно секции C_{H1} . В этом случае емкость компенсирующих конденсаторов верхней секции индуктора равна $C_{H1} + C_{D1} + C_{D2}$, емкость средней секции - C_{H2} , а емкость нижней секции - C_{H3} .

За счет перераспределения емкости компенсирующих конденсаторов обеспечивается повышение напряжения на нижней секции индуктора печи.

Кроме рассмотренных режимов работы данная СЭПСЧ позволяет реализовать двухчастотный режим плавки. Идея этого метода состоит в том, что на стадии плавки металла этот процесс более эффективен при питании печи на повышенных частотах, а на стадии догрева металла, когда идет процесс науглероживания, требуется активное перемешивание по всему объему ванны расплава металла. Повышение интенсивности перемешивания достигается значительным снижением частоты питающего тока. В схеме СЭПСЧ на рисунке 3 путем переключения ключей K_5 и K_6 все секции компенсирующих конденсаторов подключаются параллельно индуктору печи, что позволяет снизить резонансную частоту нагрузочного контура примерно вдвое.

Данный метод дает ощутимое ускорение процесса науглероживания металла, что подтверждается графиками на рисунке 6, характеризующими скорость насыщения углеродом металла при работе печи на частоте 250 Гц и на частоте 125 Гц.

Метод двухчастотной плавки весьма эффективен при получении нержавеющей и инструментальных сталей. Для предотвращения выжигания легирующих добавок на первом этапе выгодно как можно быстрее достичь заданной температуры расплава, а на втором этапе ввести легирующие добавки и "включить" режим активного перемешивания.

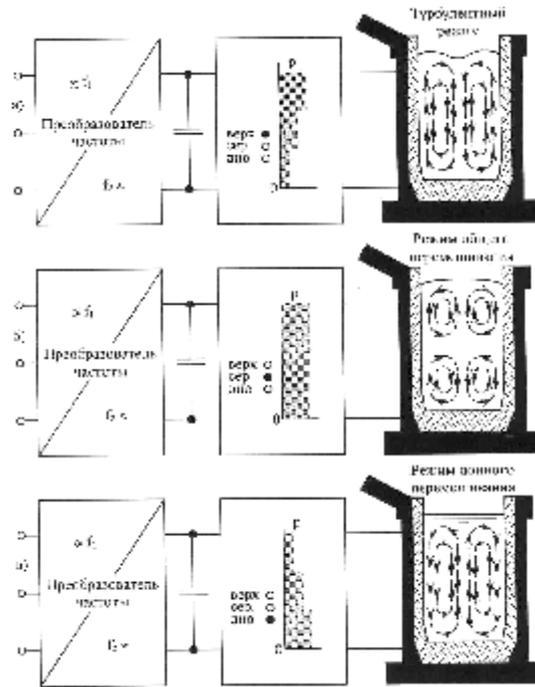


Рис. 5

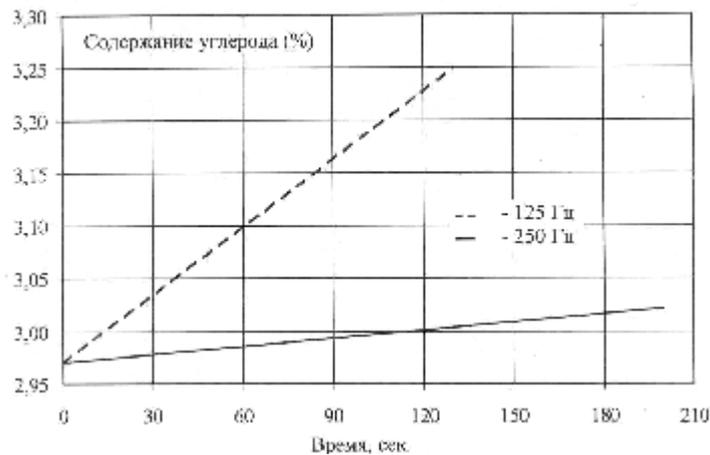


Рис. 6

Приведенные примеры доказывают, что только среднечастотные печи способны обеспечить высокое качество металлургических процессов при высокой энергетической эффективности оборудования, создавая уникальные новые возможности технологам металлургам для получения современных сплавов.

Системы электропитания средней частоты для многопостовой плавки металлов

Повышение эффективности систем среднечастотной плавки металлов достигается при организации групповой плавки металла одновременно в нескольких печах или, так называемого, многопостового метода плавки. Сущность этого метода состоит в том, что процесс плавки в разных печах сдвинут по фазе технологического цикла плавки – одна печь работает в режиме нагрева и расплавления металла с большим потреблением активной энергии, вторая печь находится в режиме выдержки и теплосохранения металла с малым потреблением энергии (10-20% от энергопотребления в режиме плавки), а третья печь – в

режиме разливки металла и загрузки шихтой без потребления энергии. Метод многопостовой плавки требует нового подхода к организации энергоснабжения.

В последние годы получили развитие системы электропитания двух или нескольких одновременно работающих печей от одного источника, в которых имеется возможность гибкого перераспределения подводимой энергии от одной печи к другим [4]. Основой такой системы является статический многоинверторный преобразователь частоты, в котором питание инверторов постоянным током осуществляется от общего выпрямителя, а выход каждого инвертора подключается к колебательному контуру каждой печи. Отличие в исполнении таких систем заключается в типе используемых схем инверторов и способе компенсации реактивной мощности нагрузки. На рисунке 7 приведена схема двухмостового тиристорного преобразователя частоты, состоящего из 12-пульсного выпрямителя и двухмостового параллельного инвертора тока. Каждый мост инвертора нагружен параллельным колебательным контуром печи. При обтекании общим постоянным током выпрямителя каждый мост инвертора управляет потоком энергии, подводимой к печи за счет коррекции частоты выходного тока изменением угла опережения моментов коммутации тиристоров относительно кривой напряжения нагрузки. Работа полупроводниковых приборов в этой схеме характеризуется жесткими условиями коммутации, когда переключение тиристоров происходит при высоких скоростях изменения тока и напряжения, а к тиристорам прикладывается полное напряжение индуктора. Поэтому для среднечастотных печей большой мощности требуется применение полупроводниковых приборов с высоким классом напряжения и высокими динамическими характеристиками. Этим требованиям в большей мере соответствуют современные быстродействующие тиристоры.

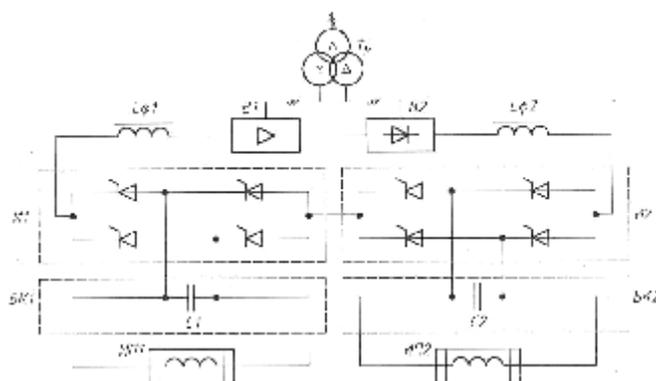


Рис. 7

При использовании в силовой схеме преобразователя в качестве второго преобразовательного звена инверторов напряжения необходимо применение схем с последовательной компенсацией реактивной мощности нагрузки. На рисунке 8 изображена схема двухинверторного преобразователя, собранного на IGBT-модулях, в которой питание инверторов осуществляется параллельно от общего выпрямителя, а индукторы печей скомплектованы блоками проходных конденсаторов [5]. В данной схеме транзисторы работают при относительно низких напряжениях (равных примерно половине питающего напряжения), но уровень токов значительно выше (в 5-7 раз), чем в схеме инвертора тока с параллельной компенсацией нагрузки. Регулирование потока энергии каждой печи осуществляется частотным методом при индуктивной расстройке последовательного колебательного контура нагрузки. Рассматриваемая схема преобразователя перспективна при использовании мощных IGBT-модулей, выпускаемых с рабочим напряжением до 1600 В и током до 1200 А, которые не требуют дополнительных средств распределения тока при параллельном соединении большого числа модулей в преобразователях большой мощности.

Преимущества систем электропитания для многопостовой плавки металлов на основе многоинверторных преобразователей частоты состоят в следующем:

1. Мощность источника питания, подводимая к каждой печи, может изменяться от 0 до 100%, при этом каждая печь может быть настроена на свой режим работы. В этом их существенное отличие от систем электропитания дуговых печей и печей промышленной частоты.
2. Отсутствуют переключатели механического типа и второй источник питания для выдержки металла. Источник питания загружен на 100% в ходе технологического процесса плавки, что позволяет снизить его установленную мощность на 40% и выровнять график суточного потребления энергии.
3. Можно одновременно на двух печах выполнять сушку футеровки и сушку шихты, либо осуществлять на одной печи сушку футеровки, на другой - плавку металла, уменьшая время межремонтных простоев печей.
4. Обеспечивается высокая эффективность работы оборудования, увеличивается производительность печей на 20-30%.
5. Снижаются массогабаритные показатели.

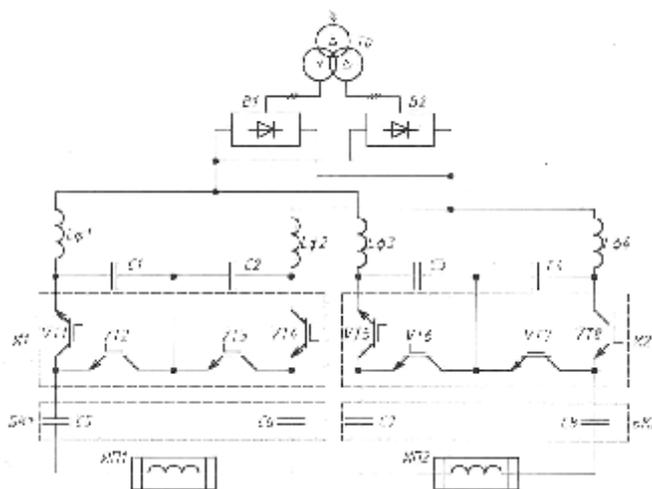


Рис. 8

На рисунке 9 приведена циклограмма работы двух 10-тонных печей питание, которых осуществляется от источника питания с двумя выходами. В режиме теплосахранения источник выдает для одной печи мощность 200 кВт, а для другой – 7000 кВт и обеспечивает режим скоростной плавки металла во второй печи. Этот метод плавки позволяет либо подстраиваться под необходимый темп потребления металла литейным цехам, который, например, в течение производственного цикла 8 часов требует общее количество расплава 80 тонн со средней производительностью 10 тонн/час. Но в действительности требуемое ежечасное количество расплава колеблется от 5 до 15 тонн/час. Из рисунка 9 видно, что источник попеременно питает печи ИП1 и ИП2 мощностью плавки 7000 кВт и мощностью теплосахранения 200 кВт, что удовлетворяет требованию ежечасного количества расплава 5-15 тонн при средней производительности 10 тонн/час. При этом коэффициент использования установленной мощности оборудования источника питания близок к 100%.

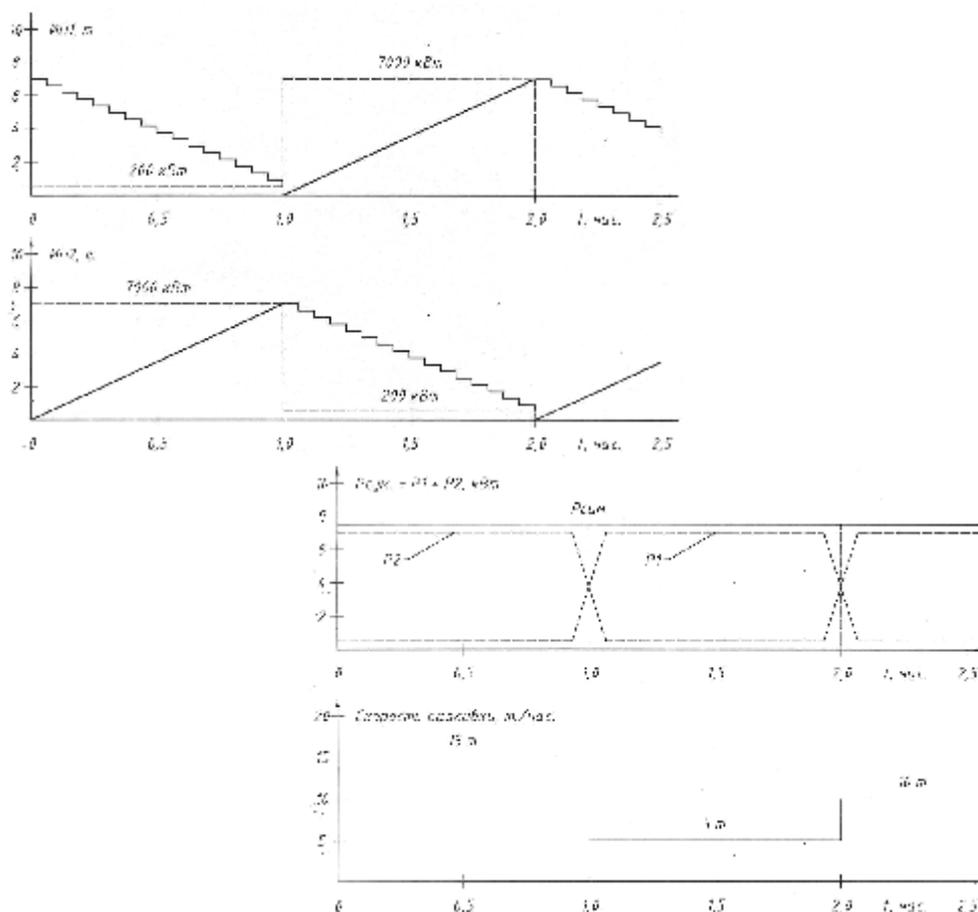


Рис. 9

Благодаря преимуществам и экономичности данного способа плавки ведущие мировые производители выпускают подобные системы. Компания АВВ (Швеция) предлагает систему "Twin Power System" с двумя печами. Компания "AJAX" (США) запатентовала систему "Pacer Power Share System". Компания "JUNKER" (Германия) предлагает на мировом рынке систему "DUOMELI TANDEM OPERATION SISTEM". Компания "INDUCTOTHERM" (США) разработала системы "DUAL TRAK" и "TRY TRAK", позволяющие вести плавку одновременно в двух или в трех печах.

Компанией "РЭЛТЕК" разработаны системы двухпостовой среднечастотной плавки металлов с печами емкостью 2,5, 6,0 и 10 тонн. Для питания таких печей производятся двухинверторные тиристорные преобразователи частоты типа ТПЧД, технические характеристики которых приведены в таблице 5.

Таблица 5

ТИП ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	ТИП ПИТАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА	МОЩНОСТЬ ВЫПРЯМИТЕЛЯ, кВт	МОЩНОСТЬ ИНВЕРТОРОВ, кВт	НОМИНАЛЬНАЯ ЧАСТОТА, кГц
ТПЧД-2200-0,25	ТСЗП-2500-10У2	2200	1800/1800	0,25
ТПЧД-3600-0,25	ТСЗП-4000-10У2	3600	3600/3600	0,25
ТПЧД-7200-0,25	ТСЗП-8000-10У2	7200	7200/7200	0,25

Общая тенденция к автоматизации процессов нашла свое развитие и в электроннагреве. В современных системах индукционной плавки с помощью компьютерных и микропроцессорных устройств информация от датчиков передается открытым или замкнутым управляющим системам с искусственным интеллектом. В этих системах

сгруппированные параметры используются для правильного ведения процесса плавки и его оптимизации. Эти параметры рассчитываются компьютером, передаются на экран дисплея и протоколируются.

Контроль плавильного производства на основе электронной вычислительной техники, реализует рациональную стыковку всех видов технологических операций, составляющих совокупный процесс плавки металла. Система управления процессом плавки должна решать следующие задачи:

- сырьевой контроль (расчеты сырьевых компонентов, контроль складских запасов, регулировка химического состава и др.);
- контроль и управление плавильным процессом (регулирование подводимой энергии, контроль температуры, осуществление операций взвешивания, автоматическая сушка печной футеровки и шихты и т.д.);
- диагностика печей (контроль за температурой охлаждающей воды, состояния футеровки, исправление возникающих неполадок и сообщение о них);
- сохранение, анализ и оценка всех параметров печи.

Применение компьютерных систем управления позволяет снизить напряженность труда и повысить производственную надежность систем индукционной плавки металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные энергосберегающие электротехнологии. Сборник статей. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2000 г.
2. Бобряков Г.И. Развитие чугунолитейного производства в автомобилестроении России // Литейное производство, 1999. -№ 8.
3. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Сабитов А.К. и др. Система электропитания для многопостовой среднечастотной плавки металла // Техническая электродинамика, - 2000, - ч. 6, - С. 68-71.
4. Викиер Х. автоматизация плавки в литейном производстве ISSN0024. Литейное производство, 1994, № 6.
5. Заявка на патент "Инвертор" № 2001123549/09(025031) от 22.08.2001.