

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ И МЕТОДОВ СРЕДНЕЧАСТОТНОЙ ПЛАВКИ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

В.И. Лузгин, кандидат технических наук
Российская электротехнологическая компания, г. Екатеринбург

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 на 8-10 порядков: 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.

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 выплавляемого 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.

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.

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.

Индукционные тигельные печи средней частоты (ИТПСЧ) претерпели конструктивные изменения. Они стали высокими при соотношении высоты к диаметру индуктора примерно 2:1. 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 удельной стоимости блоков компенсирующих конденсаторов и открыло путь к созданию экономичных систем электропитания на основе тиристорных преобразователей частоты большой мощности для крупнотоннажных печей.

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 BBC в начале 70-х годов.

В установках среднечастотной плавки появилась возможность реализовать метод порционной плавки (плавки с полным сливом расплава). Технология плавки чугуна и стали с остатком расплава металла ("болотом") практиковалась в установках промышленной частоты. 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 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 среднечастотной 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 по относительной себестоимости (ОС), где за единицу принята себестоимость одной тонны расплава чугуна, полученной в ГВ.

Таблица 1

ТИП ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА	РЭ	ОС
ГВ	50-70	1
КВ	50-70	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" [1].

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 [2].

Аналогичные системы среднечастотной плавки разработаны Российской электротехнологической компанией ("РЭЛТЕК"), которая производит, начиная с 2001 г., модельный ряд крупнотоннажных среднечастотных плавильных установок. 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 двухэнергетической распределительной системой электропитания, которая обеспечивает режим одновременной плавки металла в двух печах (ДЭКРИПС – двухэнергетическая распределительная индукционная плавильная система) и позволяет осуществлять независимое регулирование мощности на каждой печи при постоянной мощности на входе системы электропитания [3]. В этом случае производительность УИПД возрастает на 20-25% по сравнению с УИПТ при той же мощности источника питания.

Параметры и производительность двухпостовых плавильных установок УИПТ и УИПД приведены в таблице 2.

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ УИПТ/УИПД	ВМЕСТИМОСТЬ ПЕЧИ, т							
	1	2	3	4	6	8	10	16
Почасовой темп плавки чугуна при технологических перерывах 20%, т/час	1,2/1,65	1,72/2,6	2,82/3,8	4,0/5,2	5,75/7,1	8,62/10,5	8,9/12,6	16,6/20
Мощность источника питания, кВт	800	1200	1800	2600	3600	5400	7000	10000
Расход электроэнергии на 1 т чугуна, кВт ч/т	550	540	530	530	520	520	510	500

По данным таблицы 2 видно, что наибольшую производительность развивают УИПД с 16-ти тонными печами (до 20 т/час), при этом они становятся конкурентными с мощными коксовыми и газовыми вагранками, мартеновскими печами и могут служить основой для технического перевооружения литейных цехов, как более эффективное и экологически безопасное оборудование.

Современные установки индукционной среднечастотной плавки представляют собой сложный комплекс оборудования и агрегатов, в которых осуществляется автоматический контроль и управление всеми процессами от подачи шихты до разлива металла.

В состав УИПД, как правило, входят две индукционные печи, два блока компенсирующих конденсаторов, комплектное распределительное устройство с защитным выключателем для ввода высокого напряжения, понижающий сетевой трансформатор, нагрузочные вибротележки, система охлаждения, гидравлическая система управления печами, пульта управления установкой. На рисунке 1 представлены фотографии агрегатов и блоков УИПД с 6-ти тонными печами.



Рис.1. Комплекс оборудования УИПД 3600-0,25-6,0



Рис.2. Плавильный участок литейного цеха с печами бт.

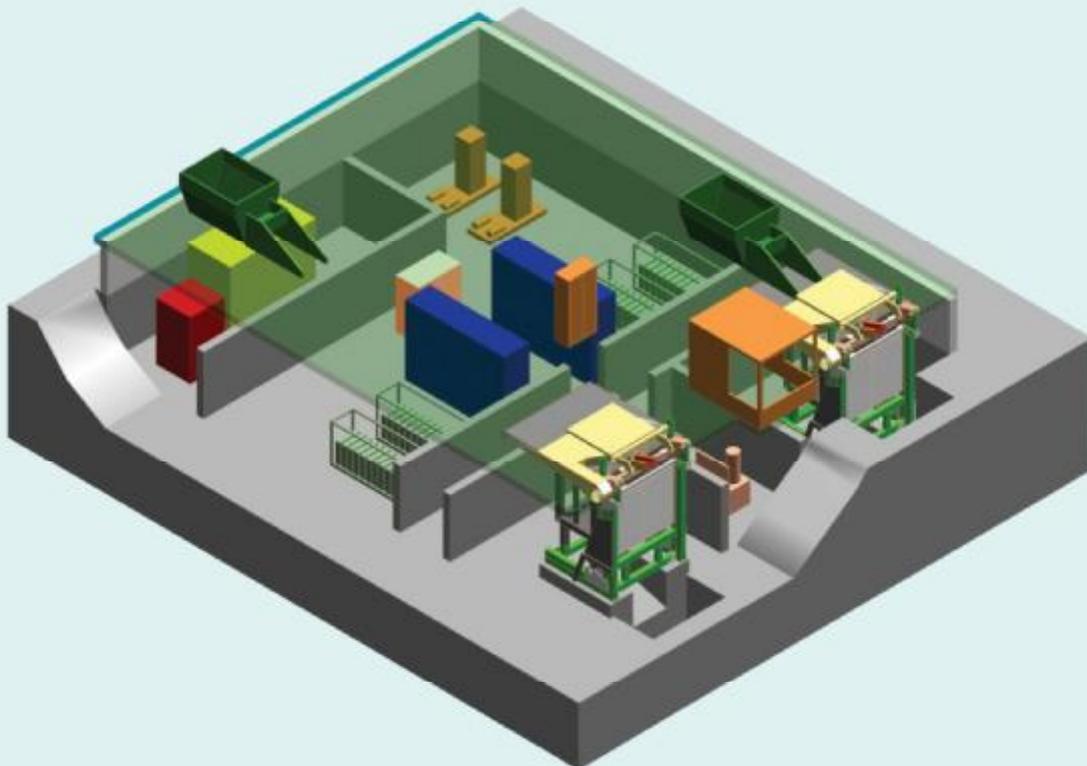


Рис.3. Типовая планировка размещения оборудования плавильных установок УИПД

Установка УИПД-3600-0,25-6,0×2 внедрена в 2006 г. в литейном цехе Рязанского станкостроительного завода. На рисунке 2 приведена фотография плавильного участка литейного цеха этого завода. Плавильный участок сконструирован так, чтобы обеспечивалось максимальное удобство выполнения всех технологических операций при плавке металла, что позволяет сократить технологические перерывы в работе установки и улучшить условия труда персонала.

Для всего модельного ряда установок УИПД разработана типовая планировка размещения оборудования, которая представлена на рисунке 3.

Наиболее рациональной является двухуровневая схема размещения оборудования, в которой основные агрегаты размещены на первом уровне в закрытых помещениях с искусственным климатом, а рабочая площадка, кабины с пультами управления и механизмы завалки шихты расположены на втором уровне. Такая компоновка оборудования позволяет свести к минимуму потери электроэнергии, обеспечить надежность и долговечность работы оборудования, сделать удобным и безопасным выполнение всех технологических операций.

Возрастающие требования к качеству выплавляемого металла и необходимость расширения технологических возможностей установок индукционной плавки способствуют развитию методов управления параметрами электромагнитного поля в рабочих объемах ИТП на всех стадиях плавки. Для совместного электротермического и электромеханического воздействия на расплав металла в ИТП применяются специальные многофазные секционированные индукторы. Посредством многофазного индуктора возможно более гибкое управление силовым воздействием на металл путем изменения токов и чередования фаз. Специальные многофазные системы электропитания позволяют управлять потоками энергии в секциях индуктора ИТП. Метод фокусирования мощности в различных зонах тигля на разных стадиях плавки позволяет интенсифицировать металлургические процессы приготовления сплавов [4]. Концентрация мощности в верхней части тигля вызывает интенсивный нагрев и турбулентность потоков металла в подшлаковом слое и одноконтурную циркуляцию металла по всему объему ванны расплава, что позволяет быстро вводить гранулированные легирующие материалы и создает условия точной корректировки химического состава и гомогенизации расплава. Если мощность концентрируется в нижней части тигля, то достигается эффект быстрого расплавления металла в данной части печи и образование жидкой ванны металла, в которой происходит расплавление мелкодисперсной шихты, стружки, отходов листообработки. Кроме этого, при фокусировании мощности в нижней части тигля на стадии перегрева расплава металла создается обратная одноконтурная циркуляция металла по всему объему ванны расплава, что способствует дегазации расплава, уменьшению приплавления шихты к футеровке.

Одноконтурная циркуляция расплава металла по всему объему тигля может быть интенсифицирована при питании секций индуктора токами средней частоты, модулированными низкочастотной составляющей. При сдвиге низкочастотных составляющих тока в секциях индуктора на 120 град. эл. соз-

даются дополнительные тяговые усилия в глубинных слоях ванны расплава вдоль стенок тигля, направленные вниз или вверх в зависимости от чередования фаз низкочастотных составляющих тока в секциях индуктора [5].

Таким образом, применение многофазных модуляционных систем электропитания секционированных индукторов ИТПСЧ позволяет расширить круг реализуемых специальных технологических и металлургических процессов и повысить эффективность работы установок индукционной плавки.

Приоритетным направлением дальнейшего повышения эффективности индукционных плавильных систем является создание печей непрерывного действия, в которых достигаются постоянные во времени условия работы всех элементов конструкции. Эти агрегаты должны быть выполнены в виде проходных конструкций с несколькими рабочими зонами, различающимися по параметрам режимов, в которых осуществляется изменение температуры и состояние садки по мере продвижения шихты и расплава по рабочим каналам. При создании проходных печей становится возможным устранить ряд технических проблем, свойственных ИТП садочного типа циклического действия. К таким проблемам относятся тяжелые условия работы футеровки, которая подвергается тепловому, коррозионному и эрозийному воздействию жидкого металла, химической коррозии шлака, статическому давлению столба жидкого металла, механическим усилиям при загрузке шихты и, особенно, при осаждении образующихся в процессе плавки "мостов".

Примером конструкции проходной индукционной печи может служить горизонтальная печь, разработанная фирмой Аякс Магнетермик (США) [6]. Эта печь представляет собой керамический туннель, расположенный внутри горизонтального цилиндрического индуктора и снабженный по концам загрузочной и разгрузочной ваннами. Полость туннеля постоянно заполнена жидким металлом. Шихта загружается с одного конца печи, а жидкий металл постоянно сливается с другого. В печах такого типа обеспечивается высокая производительность, легкость поддержания стабильного химического состава и температуры расплава, а также достигается большой срок службы футеровки.

Другим направлением разработки индукционных плавильных установок непрерывного действия является комплексное использование индукционных нагревательных и магнитогидродинамических агрегатов. Для обеспечения более интенсивной циркуляции расплава, а также придания расплаву других, не свойственных обычным ИТП, видов движения металла целесообразно совмещение ИТП с линейными асинхронными двигателями, которые могут обеспечить бесконтактное силовое воздействие на расплав, придавая ему поступательное, вращательное или любое другое движение в рабочем объеме тигля.

В настоящее время сотрудниками Российской электротехнологической компании ведутся разработки нового типа индукционных плавильных систем – турбоиндукционных тигельных печей (ТИТП) непрерывного и полунепрерывного действия.

Конструкция таких печей базируется на конструкциях традиционных ИТП, которые дополняются магнитодинамическим вращателем металла вокруг оси тигля [7]. При осевом вращении металла поверхность расплава становится

вогнутой и образуется лунка, в которую загружается мелкая шихта. В этом случае шлак сдвигается к центру и отсекается от стенок тигля, что существенно уменьшает разъедающее действие шлака на футеровку. Кроме этого, активизируются химические реакции в подшлаковом слое за счет турбулентного движения металла. Под действием сил инерции вращающегося металла может быть реализован постоянный слив металла через боковую стенку тигля и обеспечен непрерывный режим работы печи без поворота тигля.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викиер Х. Автоматизация плавки в литейном производстве ISSN0024 // Литейное производство. 1994. № 6. С. 26-32.
2. Мортимер Джон Х. Завтрашние технологии индукционной плавки существуют уже сегодня // Литейщик России. 2002. № 1. С. 32-37.
3. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Шипицын В.В., Якушев К.В. Многоинверторные среднечастотные преобразователи в системах электропитания индукционных установок // Электротехника. 2002. № 9. С. 57-63.
4. Траузель Д., Шлюкабер., Донбах Ф. Реализация секционных технологических и металлургических задач в индукционных печах средней частоты // Литейщик России. 2003. № 5. С. 20-23.
5. Патент 2231904 Российской Федерации. Устройство для индукционного нагрева и способ его управления / Лузгин В.И., Петров А.Ю., Черных И.В., Шипицын В.В., Якушев К.В. Опубл. 27.03.04, Бюл. № 9.
6. Continuous melting in horizontal induction furnace // Electrical Review. 1971. vol. 188. № 9. P. 273-274.
7. Сарапулов Ф.Н., Лузгин В.И., Петров А.Ю. и др. Многофункциональный плавильный агрегат для реализации новых технологий в условиях мини металлургических предприятий и литейных цехов крупных машиностроительных заводов // Литейщик России. 2004. № 10. С. 23-29.