



*The offered by authors method of the multiple-operator dual-frequency melting of metals allows to expand the technical-economic figures and to provide its higher flexibility and universality as the basic module of foundry production.*

**В. И. ЛУЗГИН, А. Ю. ПЕТРОВ, С. А. РАЧКОВ, К. В. ЯКУШЕВ,**  
УГТУ-УПИ, Российская электротехнологическая компания «РЭЛТЕК», г. Екатеринбург

УДК 621.74

## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПЕЧНЫЕ АГРЕГАТЫ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Современные машиностроительные предприятия, как правило, имеют в структуре технологических переделов литейное производство. Тенденции развития рыночного производства таковы, что наибольшей рентабельностью обладают малые и средние предприятия, не обремененные сложной инфраструктурой и наиболее эффективно использующие основные фонды. В условиях меняющейся конъюнктуры рынка требуются относительно недорогие быстроперестраиваемые литейные производства.

Литейное производство состоит из технологических модулей: плавильного, формовочно-заливочного, финишной обработки и т. д. Эти модули имеют между собой множественные связи, поэтому при переходе на производство новых изделий из разных металлов и сплавов необходимо менять всю производственную структуру, что не позволяет гибко реагировать на требования рынка. Для решения этой задачи литейные производства должны иметь совмещаемые модули. Основным модулем в комплексе литейного оборудования является плавильный, так как на него приходится основная доля затрат. Он должен быть несменным при изменении производственной структуры, а значит, универсальным для реализации технологий получения различных сплавов металлов. Из всех известных на сегодня печных агрегатов наиболее полно требованиям универсальности отвечают индукционные тигельные печи (ИТП). В них можно получать практически любые сплавы с высокой точностью химического состава и однородностью, так как они имеют крайне низкий угар элементов и обеспечивают интенсивное перемешивание металла. В индукционных печах можно получить сплавы металлов со специальными свойствами (с высокой прочностью, высокой коррозионной стойкостью, со специальными физическими свойствами). Индукционные печные агрегаты — наиболее экологически чистые за счет минимальных пылевых и газовых выбросов, низкого шума. Они имеют высокий КПД и относительно низкий расход электроэнергии на тонну

выплавляемого металла при высоких показателях качества потребляемой электроэнергии.

Однако некоторые недостатки ИТП ограничивают их возможности при реализации металлургических процессов, так как плавка ведется с «холодным» шлаком, практически не участвующем в химических реакциях. К ним можно отнести отсутствие эффективных технологий рафинирования расплава в ИТП, что не позволяет использовать низкокачественную, дешевую шихту. Для управления химическим составом сплава необходимо использовать легирующие материалы в сочетании с точным управлением температуры расплава.

В последние годы достигнут значительный прогресс в развитии индукционных плавильных агрегатов за счет создания энергонасыщенных ИТП, работающих на средних частотах (150–2400 Гц). Если в печах промышленной частоты удельная мощность составляет 350–400 кВт/т, то на средних частотах этот показатель возрастает в 2–3 раза и достигает 700–1000 кВт/т, что дает возможность сократить циклы плавки до 40–45 мин и снизить расход электроэнергии до 500–520 кВт/т. Однако с ростом частоты падает силовое воздействие электромагнитного поля и становится недостаточным для создания конвективных потоков металла.

Технологические возможности и эффективность индукционной плавки в тигельных печах в значительной мере определяются способом управления электромагнитными полями в рабочих объемах ИТП. На разных стадиях технологического процесса плавки необходимо осуществлять интенсивный нагрев металла, иметь возможность концентрировать тепловыделение в разных зонах рабочего объема ИТП, производить глубокое регулирование частоты электромагнитного поля, управляя силовым воздействием на расплав металла и активизируя конвективные потоки металла. Перечисленные режимы работы ИТП могут быть обеспечены специальными системами электропитания, которые строятся на основе много-

энергоканальных полупроводниковых преобразователей частоты, работающих в режиме формирования двухчастотного тока в обмотках ИТП [1].

На рис. 1 приведена структурная схема системы электропитания токами двух частот. Из рисунка видно, что трехэнергоканальный преобразователь частоты нагружен секциями обмоток индуктора, скомпенсированными на средней частоте блоками конденсаторов ( $C_{н1}$ - $C_{н3}$ ). Каждый инвертор ( $I_1$ - $I_3$ ) работает автономно и формирует ток высокой частоты на резонансной частоте параллельно нагрузочного контура, а также ток низкой частоты методом фазовой модуляции. Кроме того, получая питание на постоянном токе от общего выпрямителя, каждый инвертор осуществляет управление потоком энергии, подводимой к каждой секции индуктора ИТП. При этом выпрямитель (В) обеспечивает симметричное потребление электроэнергии по фазам питающей сети и низкий уровень гармонических составляющих в фазных токах за счет применения в зависимости от мощности 6-, 12- или 24-фазной схемы. Учитывая большую энергоемкость ИТП, их электропитание осуществляется по сетям с напряжением 6 или 10 кВ, поэтому в систему электропитания включается индивидуальный силовой трансформатор (Тр), имеющий специальное исполнение, и шкаф высоковольтного ввода (ШВВ), обеспечивающий защиту установки в аварийных режимах.

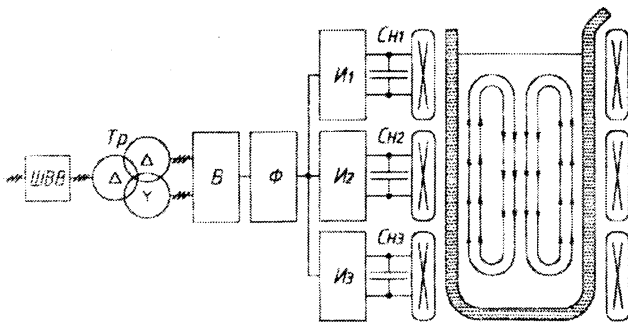


Рис. 1

Разработанная авторами система электропитания токами двух частот обеспечивает возможность управления параметрами электромагнитного поля и позволяет в полной мере использовать преимущества ИТП при плавке металлов на средних частотах и при интенсивном перемешивании расплава в бегущем поле низкой частоты. Метод двух частот весьма эффективен при получении нержавеющих и инструментальных сталей, а также для сплавов, имеющих состав металлов с резко дифференцированной плотностью и выплавляемых в проводящих или полупроводящих тиглях, в которых экранирующее действие тигля на средних частотах еще в большей степени снижает силовое давление электромагнитных сил.

Эффективность работы плавильного модуля существенно возрастает, если плавку вести одновременно в нескольких печах. Метод многопосто-

вой плавки находит широкое применение для крупных литейных производств, так как позволяет гибко подстраиваться под необходимый темп потребления металла литейным цехом и дает существенное снижение установленной мощности оборудования системы электропитания [2]. На рис. 2 показана структурная схема системы электропитания трех одновременно работающих печей, в которой количество инверторных ячеек равно количеству печей, а их питание по цепи постоянного тока осуществляется от общего трансформаторно-выпрямительного блока. Учитывая то, что в садочном режиме плавки каждая ИТП является периодическим потребителем электроэнергии, при синхронной их работе с фазовым сдвигом графиков потребления электроэнергии в технологическом цикле плавки металла достигается эффект стабилизации общего потребления электроэнергии.

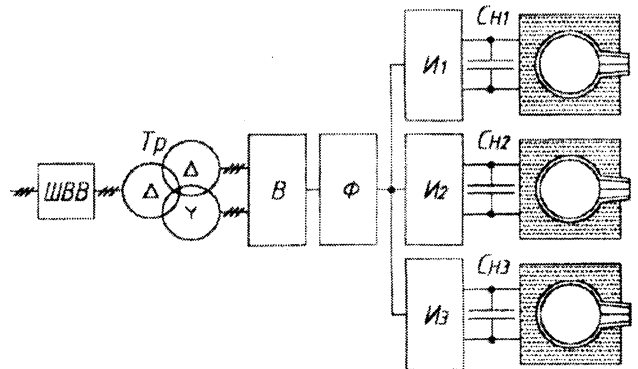


Рис. 2

Установленная мощность инверторных ячеек соответствует мощности печи, а требуемая мощность трансформаторно-выпрямительного оборудования в 2,0-2,5 раза меньше, чем суммарная мощность печей, что позволяет уменьшить установленную мощность оборудования всей системы электропитания на 30-40%, следовательно, снизить ее стоимость. В такой системе каждая инверторная ячейка генерирует ток двух частот, а также осуществляет глубокое регулирование мощности печи и уровней токов средней и низкой частоты на разных стадиях плавки. Последнее свойство системы электропитания – независимое управление тока средней частоты, под воздействием которого происходит интенсивный нагрев и плавка металла с большим потреблением электроэнергии, и тока низкой частоты, посредством которого происходит активное перемешивание металла в пульсирующем электромагнитном поле при малом потреблении электроэнергии, что позволяет плавно переходить из режима скоростной плавки в режим миксера.

Таким образом, предлагаемый авторами метод многопостовой двухчастотной плавки металлов позволяет расширить функциональные возможности индукционного плавильного модуля, улучшить технико-экономические показатели и обес-

печить его более высокую гибкость и универсальность как базового модуля литейного производства.

Российской электротехнологической компанией разработана серия установок индукционной плавки (УИП), которые включают в себя комплекс оборудования, обеспечивающий работу индукционных печей вместимостью от 1 до 10 т. На рис. 3 показана компоновка плавильного модуля на рабочей площадке, которая не требует фундаментов и легко может быть смонтирована на территории литейного цеха. В состав оборудования установок входят две или три ИТП, блоки компенсации реактивной мощности индукторов печей, многоэнергоканальный преобразователь частоты, гидравлическая система подъема печей, двухконтурная система охлаждения оборудования, система дымоудаления, система автоматического управления процессом плавки металла, контроля футеровки печей, системы диагностики и контроля качества потребления электроэнергии. В табл. 1 приведены основные технические харак-

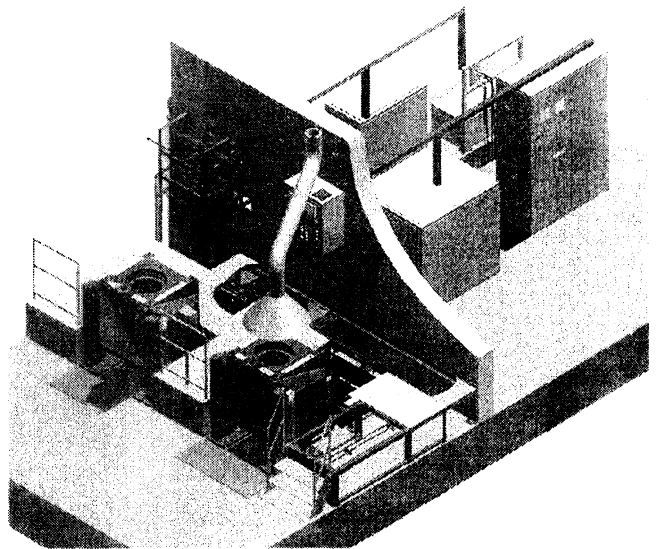


Рис. 3

теристики плавильных модулей серии УИП, которые позволяют плавить металл в атмосфере воздуха с различной производительностью.

Таблица 1.

Тип установки	Вместимость печи, т	Производительность печи, т/ч	Мощность, кВт/частота, кГц	Площадь, занимаемая участком, ммхмм
УИП-800-1,0-1,0	1,0	0,8	800/1,0	10000x8000
УИП-1000-0,5-2,0	2,0	1,5	1000/0,5	10000x8000
УИП-1600-0,5-3,0	3,0	2,4	1600/0,5	10000x8000
УИП-3200-0,25-6,0	6,0	4,8	3200/0,25	12000x20000
УИП-5000-0,25-10,0	10,0	6,6	5000/0,25	15000x12000

Наряду с индукционными плавильными модулями открытого исполнения в литейном производстве широко используются печные агрегаты с контролируемой средой. Плавка металлов и литье изделий в вакууме или атмосфере инертных газов позволяет значительно повысить качество отливок и реализовать технологические процессы, которые невозможно получить в открытых печах.

В вакуумных индукционных печах, оборудованных дорогостоящими вакуумными системами, включающими в себя совокупность приборов и аппаратов, вакуумную камеру, откачные устройства, вакуумпроводы, арматуру, обеспечивающих создание и поддержание необходимого для проведения технологического процесса давления, себестоимость отливок резко возрастает. К тому же и производительность таких печных агрегатов снижается из-за длинных циклов откачки газа между технологическими операциями.

Предприятием «РЭЛТЕК» разработаны и выпускаются высокоэффективные вакуумные индукционные модули нового поколения серии УИПВ непрерывного действия, в которых значительно сокращены циклы плавки и разлива металла в формы при минимальных затратах на работу системы вакуумирования. Основное преимущество

печей серии УИПВ состоит в том, что в них обеспечивается загрузка шихтой, плавка металла и разлива в формы с последующей выгрузкой отливок без нарушения вакуума в плавильной камере. Кроме того, системами двухчастотного электропитания обеспечивается энергонасыщенная, скоростная плавка металлов с высокой степенью гомогенности сплава и распределения температуры по всему объему тигля печи и на всем интервале разлива металла, что чрезвычайно важно для получения прецизионных отливок с требуемой микроструктурой. Управление процессом плавки, режимами работы вакуумной системы и агрегатами, вакуумизация процессов и архивирование показателей каждой плавки осуществляются с помощью компьютерной информационно-управляющей системы. В табл. 2 приведены основные технические характеристики вакуумных печей серии УИПВ.

Конструктивно элементы оборудования УИПВ размещены на двухуровневой рабочей площадке (рис. 4). В состав установки входит одно-, двух- или трехсекционная вакуумная камера, двухчастотный полупроводниковый преобразователь, вакуумная система, компьютерная система управления процессом плавки. В установке предусмотрены

Таблица 2.

Тип установки	Вместимость печи, т	Продолжительность цикла, мин	Мощность, кВт/ частота, кГц	Остаточное давление, Па	Максимальная температура расплава, °С
УИПВ-10-10-0,001	0,001	25	10/10	10	2200
УИПВ-16-10-0,005	0,005	30	16/10	10	2200
УИПВ-63-10-0,02	0,02	50	63/10	10	2200
УИПВ-100-10-0,05	0,05	60	100/10	10	2200
УИПВ-250-8-0,25	0,25	90	250/8	10	2200

механизмы и устройства, обеспечивающие загрузку металла в тигель до его наполнения, наклон индуктора с тиглем печи для слива металла в изложницы, последовательную подачу изложниц под тигель по мере их наполнения, измерение температуры расплава и давления в камере.

Применение индукционных плавильных модулей с расширенными функциональными и технологическими возможностями управления металлургическими процессами обеспечивает их высокую адаптивность в модульных схемах организации литейного производства и универсальность технологических процессов плавки металла. Модульная схема организации литейного производства при неизменяемом плавильном модуле позволяет заменять вспомогательные модули и, таким образом, диверсифицировать производство без значительных затрат, следовательно, снижает себестоимость продукции.

Все перечисленные свойства модульных схем на основе индукционных плавильных модулей дают им решающее преимущество при организации гибких быстроперестраиваемых литейных минипроизводств и делают их безальтернативными в условиях рыночного производства.

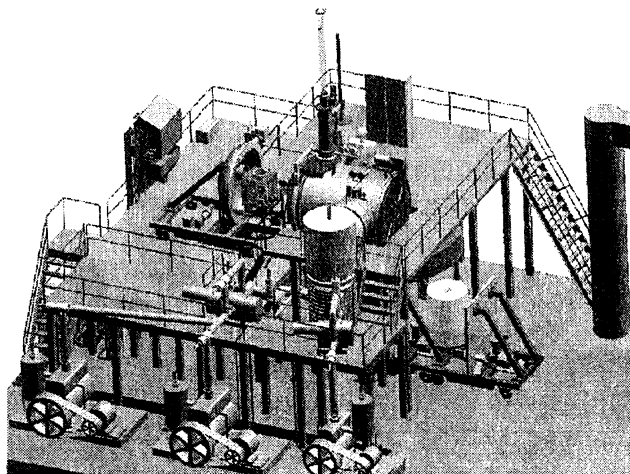


Рис. 4

### Литература

1. 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.
2. Джон Х. Мортимер. Завтрашние технологии индукционной плавки существуют уже сегодня // Литейщик России. 2002. № 1. С. 32–37.