

ИНДУКЦИОННЫЕ ПЛАВИЛЬНО-ЛИТЕЙНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЧУГУНА

**В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, С.М. Фаткуллин,
(ООО "РЭЛТЕК", г. Екатеринбург)**

В.Э. Фризен

**(ФГАОУ ВПО Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина, г. Екатеринбург)**

Индукционная плавка металлов приобрела широкое распространение как по числу действующих установок, так и по разнообразию технологических применений в самых разных областях техники. В литейном производстве широко используются однофазные индукционные тигельные печи средней частоты (250-2500 Гц), которые работают в режиме порционной плавки (плавка с полным сливом металла) при удельных мощностях до 1000 кВт/т. При этом достигается высокая эффективность плавки и перегрева металла с малым расходом электроэнергии на тонну выплавляемого металла (500-560 кВт·ч/т при плавке чугуна) и создается естественное двухконтурное перемешивание. Однако при однофазном электропитании печи циркуляция жидкого металла происходит в двух плохосмешиваемых тороидальных контурах, которая не обеспечивает в полной мере необходимой однородности химического состава и температуры во всем объеме металла.

Одним из методов активизации металлургических процессов и повышения качества получаемых сплавов в тигельных индукционных печах является управление движением жидкого металла и создание одноконтурной циркуляции расплава в рабочем объеме печи. При этом направление и скорость вращения металла в общем тороидальном контуре должны изменяться в зависимости от требований технологического процесса обработки расплава. Реализация этих требований возможна в ИТП с многосекционным индуктором и многоконтурным электропитанием, в которых осуществляется управление величиной и фазовым сдвигом протекающих в них токов средней частоты, формируемых мультиэнергочанальным преобразователем частоты.

Авторами предлагается система двухконтурного электропитания (СЭПДК) двухсекционного индуктора тигельной печи с преобразователем частоты, собранном на основе каскадного несимметричного инвертора тока (КНИТ), схема которой представлена на рис. 1 [1]. Преобразователь строится по двухзвенной структурной схеме, первым звеном которой является трехфазный мостовой выпрямитель (В), а вторым – двухкаскадный несимметричный инвертор с фильтровыми дросселями в цепи постоянного тока (L_{Φ}). Энерговыходы инвертора подключены к двум контурам электропитания ИТП, образованным параллельно соединенными секциями индуктора и конденсаторами блока компенсации ($Z_{S1}-C_1; Z_{S2}-C_2$).

На разных стадиях плавки металла в КНИТ реализуются различные алгоритмы управления. На этапе нагрева и расплавления шихты оба каскада (VT_1-VT_3 и VT_2-VT_4) работают в синфазном режиме при этом токи инверторов

(i_1, i_2) прямоугольной формы протекают по нагрузочным контурам, на которых формируются синусоидальные противофазные напряжения u_{C1} и u_{C2} . Секции индуктора печи имеют правую и левую намотку, поэтому противофазные токи в секциях I_{S1}, I_{S2} создают синфазное электромагнитное поле в рабочем объеме печи, что способствует наиболее эффективному электротепловому преобразованию в шихте [2].

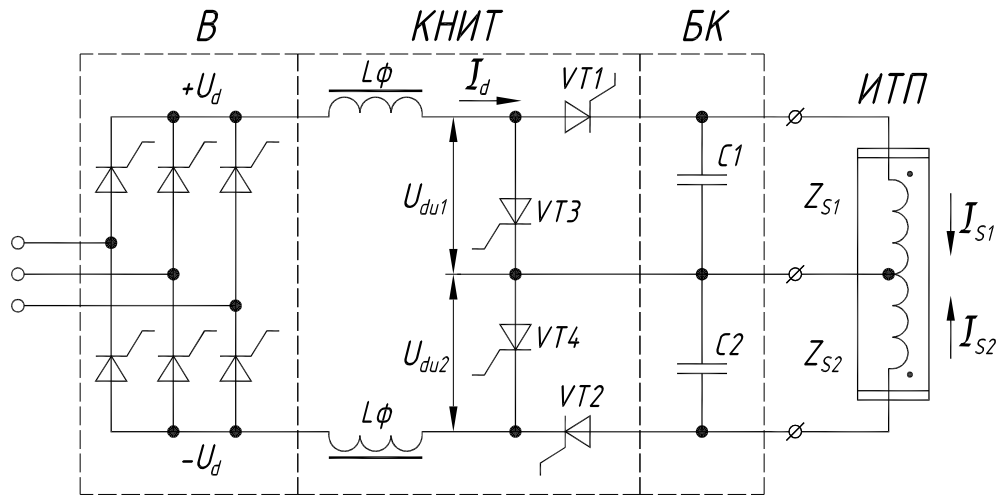


Рис. 1. Принципиальная схема установки индукционной плавки

После расплавления шихты и образования ванны жидкого металла при работе КНИТ в синфазном режиме управления под воздействием нормального сжимающего электродинамического давления (Q_{n1}, Q_{n2}) образуются два тороидальных контура циркуляции металла. Для создания одноконтурной циркуляции металла необходимо создать аксиальную составляющую электродинамических сил (Q_a), действующую на жидкий металл у стенок тигля и перераспределить нормальную составляющую электродинамических сил по высоте ванны расплава. Такое соотношение действующих на жидкий металл сил достигается регулированием фазового сдвига и относительного значения токов в секциях индуктора [3].

Для создания восходящего потока металла у стенок тигля необходимо уменьшить отношение токов в секциях индуктора ($I_{S1} / I_{S2} < 1$) и ввести отстающий фазовый сдвиг тока I_{S1} по отношению к току I_{S2} . Эти соотношения достигаются изменением алгоритма управления КНИТ, при котором асимметрируется управление верхнего каскада (угол проводимости тиристора $VT1 - \lambda_1 < \pi$) и вводится отрицательный фазовый сдвиг между импульсами управления тиристором верхнего и нижнего каскадов КНИТ ($\delta < 0$). На рис. 2, а приведен эскиз конструкции ИТП, на котором показаны эпюры нормальных и аксиальных сил ($Q_{n1} < Q_{n2}, Q_a$), формирующих восходящее движение жидкого металла у стенок тигля. На рис. 2, б приведен план скоростей в расплаве при данной силовой схеме.

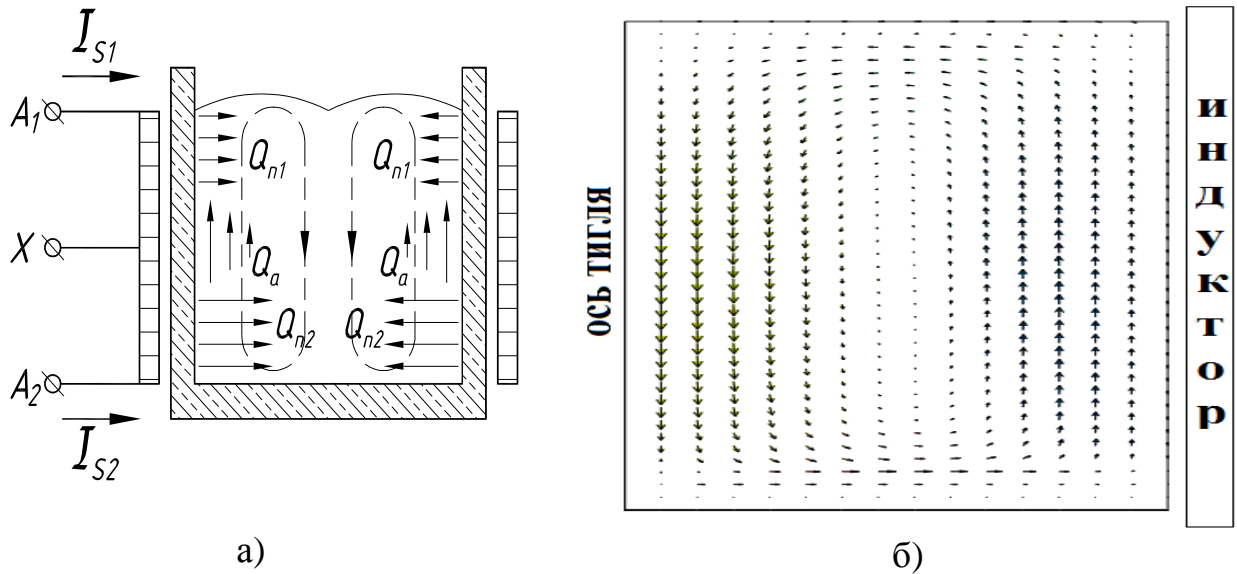


Рис. 2 Одноконтурная циркуляция с восходящим потоком металла
а – силовая схема, б – поле скоростей в расплаве

Для создания нисходящего потока металла у стенок тигля, наоборот, необходимо увеличивать отношение токов в секциях индуктора ($I_{S1} / I_{S2} > 1$) и ввести опережающий фазовый сдвиг тока I_{S1} по отношению к току I_{S2} . При этом алгоритм управления КНИТ должен быть таким, чтобы нижний каскад работал в асимметричном режиме (угол проводимости тиристора VT2 - $\lambda_2 < \pi$), а фазовый сдвиг между импульсами управления тиристоров верхнего и нижнего каскадов КНИТ был положительным ($\delta > 0$). На рис. 3, а приведен эскиз конструкции ИТП, на котором показаны эпюры нормальных и аксиальных сил ($Q_{n1} > Q_{n2}$, Q_a), создающих нисходящее движение жидкого металла у стенок тигля. На рис. 3, б приведен план скоростей в расплаве при данной силовой схеме.

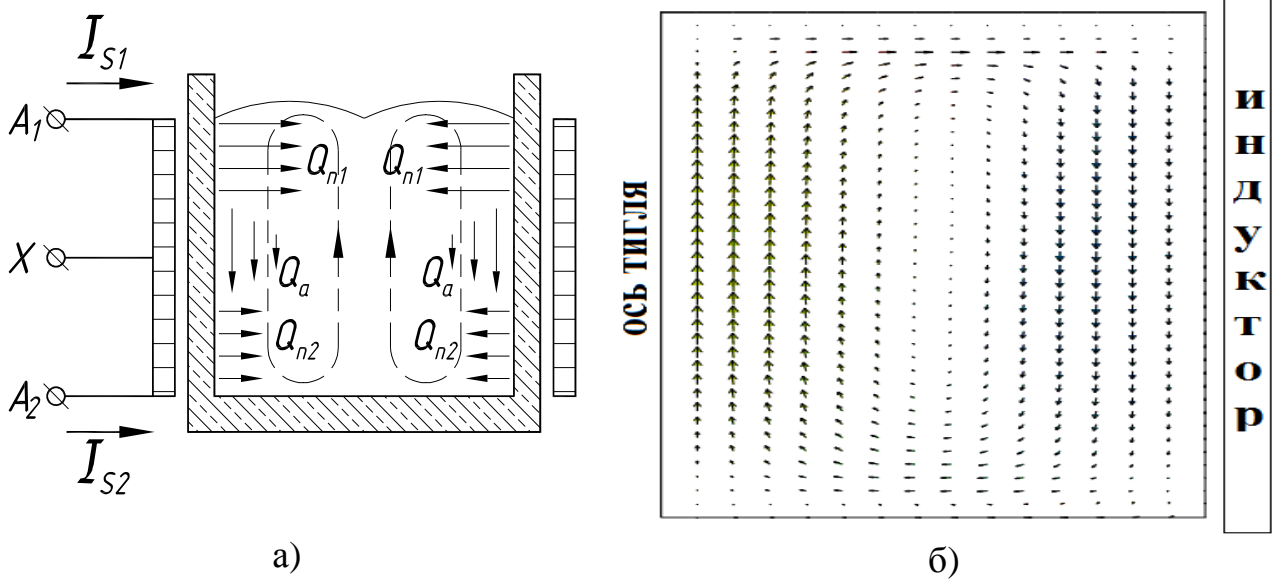


Рис. 3 Одноконтурная циркуляция с нисходящим потоком металла
а – силовая схема, б – поле скоростей в расплаве

Индукционные тигельные печи с реверсивноуправляемым движением металла могут быть определены как особый класс печей – турбоиндукционные тигельные печи (ТИТП).

Реверсивное одноконтурное перемешивание металла расширяет технологические возможности ТИТП при реализации сложных металлургических процессов. Одноконтурная циркуляция с восходящим потоком металла способствует дегазации расплава, уменьшению вероятности приплавления шихты к футеровке, выравниванию химического состава сплава и уменьшению высоты мениска на свободной поверхности ванны жидкого металла.

Одноконтурная циркуляция с нисходящим потоком металла целесообразна при легировании металла и введении микродобавок, а также при допировании расплава интерметаллидами и нанопорошками. Этому способствует концентрация мощности в верхней части тигля, вызывающая интенсивный нагрев и турбулентность потоков металла в подшлаковом слое, что позволяет быстро вводить и распределять легирующие материалы и создает благоприятные условия для точной корректировки химического состава и гомогенизации расплава в рабочем объеме печи [4].

Следует отметить, что расширение технологических возможностей установок индукционной плавки с реверсивной одноконтурной циркуляцией металла достигается при незначительном усложнении конструкции ТИТП, преобразователя частоты, системы управления и незначительном увеличении капитальных затрат на их изготовление.

Установки индукционной плавки с управляемым движением металла в ТИТП приобретают значительные конкурентные преимущества по сравнению с печными агрегатами других типов и обеспечивают повышение эффективности металлургического производства и улучшения качества продукции.

Науглероживание расплавленного металла — один из важнейших процессов плавки синтетического чугуна, которому посвящено большое число экспериментальных исследований. Рассмотрим условия науглероживания сплава при электромагнитном перемешивании в индукционных печах. Процесс науглероживания при этом ускоряется, что обусловлено большой удельной поверхностью контакта и высоким значением коэффициента массообмена между установившимся турбулентным потоком расплава и частицами науглероживателя. Скорость науглероживания зависит от интенсивности перемешивания, температуры и химического состава жидкого металла, вида науглероживающего реагента и его свойств, технологического режима науглероживания.

Интенсивное перемешивание жидкого металла нивелирует различные условия науглероживания. Процент усвоения углерода реагента жидким металлом при возрастании интенсивности перемешивания увеличивается. Подобным образом в случае интенсивного перемешивания сглаживается различие между значениями скорости процесса науглероживания при применении разных науглероживающих реагентов, использовании исходного жидкого сплава с различным содержанием кремния и т. п.

Науглероживание идет тем быстрее, чем выше температура металла, чем больше поверхность соприкосновения твердой и жидкой фаз, чем интенсивнее

перемешивание. Растворение углерода при высокой интенсивности перемешивания идет примерно в два раза быстрее, чем при низкой интенсивности перемешивания жидкого сплава.

Электромагнитное перемешивание жидкого металла в печах промышленной частоты обеспечивает конвективный массоперенос на границе раздела твердой и жидкой фаз, создавая в течение всего процесса высокий градиент концентрации углерода. Диффузия углерода, будучи пропорциональна градиенту концентрации, усиливается. В конечном итоге усвоение углерода из любого реагента жидким металлом в индукционных печах промышленной частоты выше (почти полное), чем в среднечастотных печах, в которых интенсивность перемешивания значительно ниже. В то же время усвоение углерода реагента при низкоинтенсивном перемешивании жидкого металла сильно зависит от его концентрации в реагенте, с понижением удельного содержания углерода процент его усвоения уменьшается. Это обстоятельство может быть объяснено увеличением времени процесса науглероживания в печах средней частоты и, как следствие, значительным окислением углерода на поверхности жидкого металла. В турбоиндукционных печах средней частоты за счет создания одноконтурной циркуляции металла с управляемой интенсивностью достигается эффект быстрого и полного поглощения углерода жидким металлом. В таких печах расширяются технологические возможности и повышается эффективность производства высококачественного чугуна.

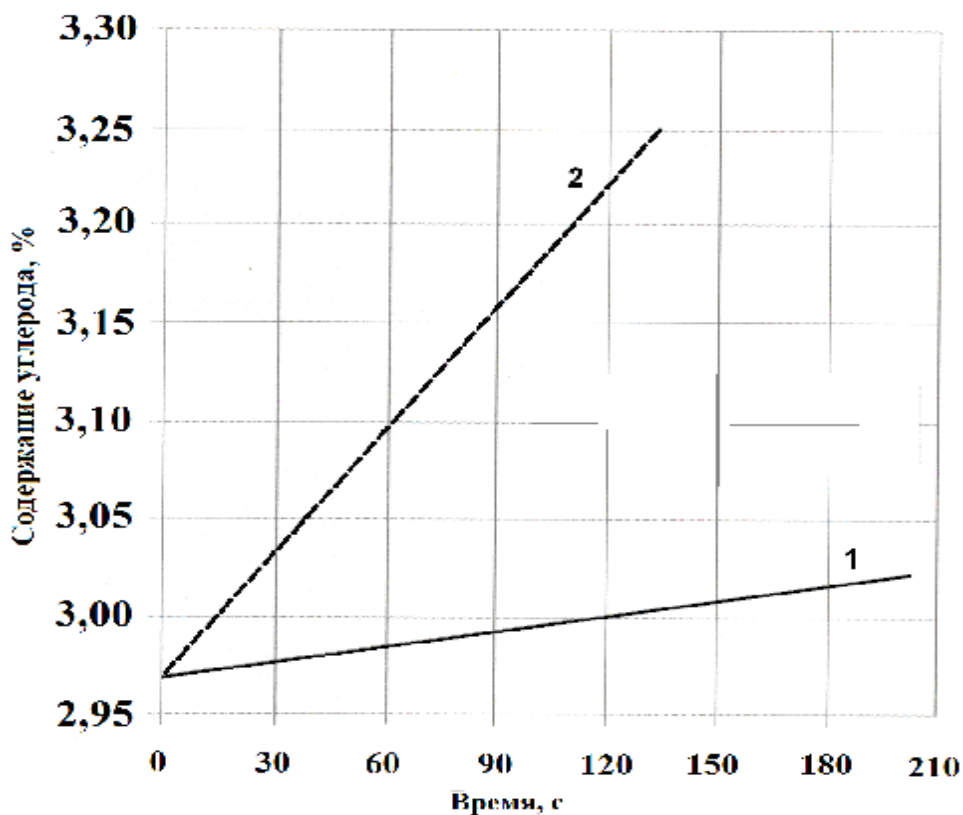


Рис. 4 Скорость науглероживания чугуна для режима с естественной циркуляцией металла в обычной среднечастотной ИТП (1) и для режима одноконтурной циркуляции в турбоиндукционной печи (2)

На рис. 4 приведены графики скорости поглощения углерода в ИТП и ТИТП, которые показывают, что процесс науглероживания металла происходит в восемь раз быстрее.

Сокращение времени проведения технологических операций обработки сплавов позволяет существенно повысить энергоэффективность ТИТП и снизить приведенные затраты на производство высококачественного чугуна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2394400. Преобразовательное устройство для индукционного нагрева и его варианты. / Лузгин В.И., Петров А.Ю., Черных И.В. и др. Опубликовано: 10.07.2010 г. Бюл. № 19.
2. Вайнберг А.М. Индукционные и плавильные печи. М., Энергия. 1967. 415 с.
3. Тир Л.Л. Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией металла в электропечах.- 2-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgia. 1991. 280 с.
4. Траузель Д., Шлюкабер, Донбах Ф. Реализация специальных технологических и металлургических задач в индукционных печах средней частоты // Литейщик России, 2003. № 5. С. 20-23.