

**Г. К. Смолин**

**ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет» (г. Екатеринбург, Россия)**

## **ПЛАВИЛЬНАЯ КОНДУКЦИОННО-ИНДУКЦИОННАЯ ТИГЕЛЬНО-КАНАЛЬНАЯ ПЕЧЬ**

Плавильная кондукционно-индукционная тигельно-канальная печь, схематически изображенная на рис. 1 в поперечном разрезе, состоит из тигля 1, в цилиндрическое углубление дна которого установлен полый цилиндр 2 из огнеупорного материала с винтовым трехходовым каналом 3 в его стенке [1-2].

Средние витки трехходового канала 3 сообщены с электродами 4, зафутерованными в стенку цилиндра 2. В резьбовые отверстия электродов 4 ввинчены токоподводы 5, выполненные в виде штанг из материала с высокой удельной электропроводностью и снабженные прямоугольной резьбой, обеспечивающей надежный контакт с электродами 4. Токоподводы 5 проходят через футеровку дна тигля 1, они могут быть выведены также вверх через металл ванны. Та и другая конструкции обеспечивают быструю замену огнеупорного цилиндра 2 с винтовым каналом.

Нижние концы 6 канала 3 сообщены с внутренней полостью цилиндра 2, а верхние – с канавкой 8, выполненной в верхнем торце цилиндра 2. Канавка 3 в поперечном сечении может быть прямоугольной, овальной или другой формы, причем внутренняя ее боковая стенка выполнена ниже наружной, чем обеспечивается при пуске первостепенное заполнение жидким металлом внутренней полости цилиндра 2.

Для запуска плавильной кондукционно-индукционной тигельно-канальной печи цилиндр 2 заполняют расплавленным металлом до уровня, обеспечивающего контакт с электродами 4, после чего на токоподводы 5 подают трехфазное напряжение. При этом по трехходовому винтовому каналу 3 текут трехфазные токи, которые разогревают жидкий металл в винтовом канале, создают бегущее магнитное поле как внутри, так и снаружи цилиндра 2. Бегущее магнитное поле создает электромагнитный напор, под действием которого расплавленный металл нагнетается внутри цилиндра 2 вниз и, поднимаясь вверх по винтовому каналу 3, полностью заполняет цилиндр 2 и кольцевую канавку 8, после чего в работу включается верхняя часть индуктора, и он выходит на рабочий режим.

Расплавленный металл из канавки 8 через более низкую ее внутреннюю стенку стекает в полость цилиндра 2, куда загружается кусковая шихта. После заполнения цилиндра 2 доверху, расплавленный металл перетекает в полость тигля 1, расплавляет предварительно загруженную в него шихту, и плавильная индукционная печь выходит на рабочий режим.

Достаточно интенсивное перемешивание жидкого металла обеспечивает выравнивание его состава по объему тигля, однако наиболее горячей остается зона над цилиндром 2. В эту наиболее горячую зону и загружается свежая кусковая шихта, что обеспечивает ее интенсивное плавление.

Если после плавления необходимо провести операции рафинирования жидкого металла, то эти режимы осуществляются следующим образом. Внутренняя полость

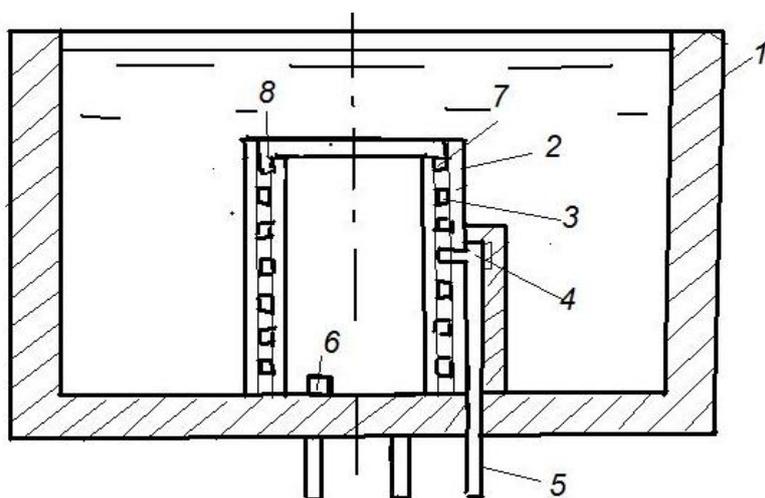


Рис. 1. Плавильная кондукционно-индукционная тигельно-канальная печь цилиндра 2 заполняется рафинирующим реагентом, на два (из трех) токоподвода 5 подается напряжение. При этом перекачивание жидкого металла отсутствует и в полости цилиндра 2 быстро создается температура, при которой наиболее интенсивно проходят химические реакции. После этого подается напряжение на третий токоподвод (режим нагрева и прокатки), при этом жидкий металл тигля прокатывается через рафинирующий реагент, заполняющий полость цилиндра 2, и рафинируется.

После очистки металла от одного элемента (например, свинца от висмута - операция обесвисмучивания), реагент в полости цилиндра 2 заменяют, и аналогично жидкий металл ванны рафинируется от другого элемента (например, свинец от серебра - операция обессеребрения), и так далее.

После проведения всех операций процессов плавления и рафинирования осуществляют выпуск металла из индукционной печи известными средствами.

Если есть необходимость держать индукционную печь в миксерном режиме, то к одному из токоподводов подают фазу, а к другому - ноль. В результате устраняется перемешивание жидкого металла, а нагрев осуществляется мощностью в шесть раз ниже номинальной.

Возможны другие схемы подключения с изменением мощности в широком диапазоне без применения дополнительных устройств для регулирования мощности.

В миксерном режиме или в режиме подогрева перед разливом перемешивание жидкого металла осуществляется только за счет тепловой конвекции. Этого достаточно, чтобы снять перегрев с винтовых каналов, если учесть, что эти режимы осуществляются мощностью ниже номинальной.

Конструктивное решение плавильной кондукционно-индукционной тигельно-канальной печи, в которой канал выполнен трехходовым, фазы переменного тока присоединены к электродам, сообщающимся со средними витками, а верхние и нижние концы канала выполнены сообщающимися с полостью тигля, обеспечивает интенсивную прокатку жидкого металла по винтовому каналу и снимает его перегрев относительно металла ванны с  $300^{\circ}\text{C}$  (как в ИКП) до  $30^{\circ}\text{C}$ , что дает возможность увеличивать подводимую электрическую мощность и в результате повышать производительность печи. Перемешивание жидкого металла в тигле интенсифицирует процессы плавления (передача тепла массопереносом значительно интенсивнее, чем теплопроводностью).

Кроме одновременного нагрева, прокатки и перемешивания жидкого металла возможен только нагрев, мощность которого можно менять в широком диапазоне без применения регуляторов. Это дает возможность более тонко воздействовать на технологические операции, осуществлять, кроме режимов нагрева и плавления, также миксерные режимы печи, процессы рафинирования жидкого металла, то есть расширять функциональные возможности печи.

Для анализа МГД-процессов использована математическая модель на основе системы дифференциальных уравнений в комплексной форме в относительных единицах движения жидких металлов в бегущем винтовом магнитном поле [3-5]. Получены зависимости распределения по объему канала индукции, тока, электромагнитных сил, а также энергетические характеристики. Индукция, плотность тока, плотность электромагнитных сил трехкомпонентны. Радиальная компонента силы направлена к оси, отжимает металл от стенки (интегральная сила этой компоненты равна нулю), азимутальная – вращает жидкий металл, перемешивая его, аксиальная – транспортирует металл вдоль оси, нагнетая его в трехходовой винтовой канал - змеевик. Радиальная и азимутальная компоненты индукции с достаточной степенью точности можно считать равномерно распределенными по поперечному сечению канала и при числе Рейнольдса равном единице рассчитываются по формуле  $B = 1 + 0,2r$ , где  $r$  – радиус цилиндра 2 (МГД – канала). Азимутальная компонента плотности тока с увеличением радиуса увеличивается по функции  $i = 1 + 2r$ , а радиальная – уменьшается в соответствии с зависимостью  $i = 1 - r$ . Аксиальная компонента электромагнитных сил практически равномерно распределена по поперечному сечению канала и рассчитываются по формуле  $f = 1 + 0,2r$ . Таким образом, плавильная кондукционно-индукционная тигельно-канальная печь развивает производительность и электромагнитный напор, удовлетворяющие требованиям металлургии и литейного производства.

#### Список использованных источников

1. А. с. 1033833 А СССР, F 27 D 11/06. Индукционная печь / Г. К. Смолин. 1983. Бюл. № 29.
2. А. С. 1655269 СССР, H 02 K 44/06. Погружное устройство для обработки металлических расплавов / Г. К. Смолин, Я. Г. Смолин. 1991. Бюл. № 15.
3. А. с. 952071 СССР, H 02 K 44/02. Электромагнитное устройство для транспортировки жидкометаллических расплавов / Г. К. Смолин. 1982. Бюл. № 30.
4. А. с. 1204103 СССР, H 02 K 44/06. Электромагнитное устройство для транспортировки жидкометаллических расплавов / Г. К. Смолин. 1986. Бюл. № 1.
5. МГД-установка для разлива металлических расплавов: отчет о НИР / Рос. гос. проф.-пед. ун-т; рук. Г.К. Смолин. Екатеринбург, 2005. 150 с. № ГР 01.200.111142.