

ИНДУКЦИОННАЯ ТИГЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ

Смолин Георгий Константинович,

профессор, доктор технических наук, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: smolingk@yandex.ru

INDUKZION CRUCIBLE FURNACE

Smolin Georgii Konstantinovich,

Professor, Doctor of Technical Sciences, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin», Ekaterinburg, e-mail: smolingk@yandex.ru

Аннотация. Дан анализ состояния и перспектив разработки оригинальной индукционной тигельной печи.

Abstract. The analysis of the status and prospects of development of the original high temperature induction crucible furnaces.

Ключевые слова. Индукционная тигельная печь, плавка, сепарация, моделирование.

Key words. Induction crucible furnace, melting, separation, modeling.

Индукционная тигельная печь новой конструкции предназначена для выплавки металлов и сплавов [1-2]. На рисунке 1 изображена печь, поперечный разрез. Печь состоит из тигля 1, в цилиндрическое углубление дна которого установлен полый цилиндр 2 из огнеупорного материала с винтовым трехходовым (или шестиходовым) каналом 3 в его стенке. Середины винтов трехходового канала сообщены соответственно с тремя 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. Нижние концы 6 канала 3 сообщены с внутренней полостью цилиндра 2, а верхние концы 7 – с кольцевой канавкой 8, выполненной в верхнем торце цилиндра 2. Внутренняя боковая стенка кольцевой канавки 8 выполнена ниже наружной; этим обеспечивается при пуске первоначальное заполнение жидким металлом внутренней полости цилиндра 2. Печь снабжена съемным магнитным экраном 9 в виде колпака, укрывающего индуктор. В нижней зоне экрана 9 выполнены отверстия 10 для входа жидкого металла, а сверху в экран 9 введен металлоотвод 11, напорный патрубок 12 которого сочленен с внутренней стенкой

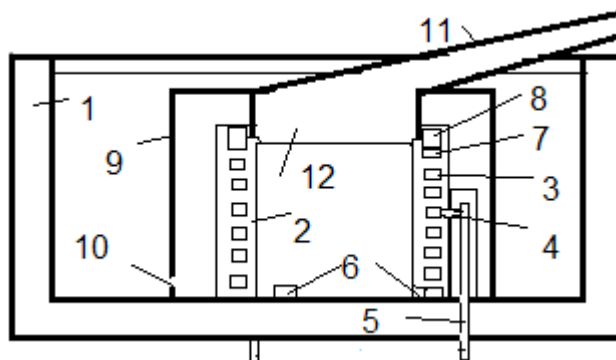


Рис.1. Индукционная тигельная печь

кольцевой канавки 8. Экран 9 выполнен из огнеупорного материала с ферромагнитным наполнителем (колошниковая пыль, железные опилки и т.п.); внутренний диаметр экрана 9 больше наружного диаметра цилиндра 2 на (2-4)д, где д-глубина проникновения электромагнитной волны в жидкий металл. Перед запуском печи съемный экран 9 с металлоотводом 11 вынимают из печи. Цилиндр 2 заполняют расплавленным металлом до уровня, обеспечивающего контакт с электродами 4, после чего на токоподводы 5 подают трехфазное напряжение. При этом по трехфазовому каналу 3 течет трехфазный ток, который разогревает жидкий металл в винтовом канале, создает бегущее винтовое электромагнитное поле как внутри, так и снаружи цилиндра 2. Бегущее поле создает электромагнитный напор, под действием которого жидкий металл нагнетается внутри цилиндра 2 вниз и, поднимаясь вверх по винтовому каналу 3, полностью заполняет его и кольцевую канавку 8, после чего в работу включается верхняя половина индуктора, и он выходит на рабочий режим. Металл из канавки 8 через низкую ее внутреннюю стенку стекает в полость цилиндра 2, куда загружается кусковая шихта. После заполнения цилиндра 2 доверху жидкий металл перетекает в полость тигля 1, расплавляет предварительно загруженную в него шихту, и печь выходит на рабочий режим. Достаточно интенсивное перемешивание жидкого металла обеспечивает выравнивание его состава по объему ванны, однако наиболее горячей остается зона над цилиндром 2. В эту зону и загружается свежая шихта, что обеспечивает ее интенсивное плавление. После плавления проводится рафинирование жидкого металла следующим образом. Внутренняя полость цилиндра 2 заполняется рафинирующим реагентом, на два (из трех) токоподвода 5 включается 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 прокачки), при этом жидкий металл ванны прокачивается через реагент, заполняющий полость цилиндра 2, и рафинируется. После очистки металла от одного элемента (например свинца от висмута) реагент в полости цилиндра 2 заменяют и аналогично металл ванны рафинируется от другого элемента (например, свинец от серебра) и т.д. Если есть необходимость держать печь в миксерном режиме, то к одному из трех токоподводов подают фазу, 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 ее регулирования. В режиме нагрева перемешивание осуществляется только за счет тепловой конвекции. Этого достаточно, чтобы снять перегрев с винтовых каналов, если учесть, что режим нагрева либо кратковременный, либо осуществляется мощностью ниже номинальной. После проведения плавления и рафинирования осуществляют откачку жидкого металла следующим образом. В печи устанавливают съемный экран 9 с металлоотводом 11. Затем транспозицией двух фаз реверсируют направление бегущего электромагнитного поля. После этого поле бежит снизу вверх, при этом жидкий металл поступает через отверстие 10 в экране 9 в канал, образованный внутренней поверхностью экрана 9 и наружной поверхностью цилиндра 2, и под действием бегущего вверх электромагнитного поля нагнетается через кольцевую канавку 8 в верхние концы 7 винтового канала 3, проходит по нему вниз, нагревается и выходит через нижние концы 6 во

внутреннюю полость цилиндра 2, здесь снова попадает в зону бегущего вверх электромагнитного поля и нагнетается в напорный патрубок 12 металлоотвода 11, поступая через него на следующую технологическую операцию, например на разливочную машину. Конструктивное решение печи, в которой индуктор, выполненный в виде вертикального полого цилиндра из огнеупорного материала с трехходовым винтовым каналом и сообщенным с верхним и нижним концами с полостью тигля, а электроды подведены к средним виткам трехходового винтового канала, снабжен съемным магнитным экраном в виде колпака, укрывающего индуктор, причем в нижней зоне экрана выполнены отверстия, а сверху введен металлоотвод, напорный патрубок которого сочленен с внутренней стенкой кольцевой канавки, обеспечивает откачку жидкого металла из печи без применения дополнительных энергетических агрегатов. При этом на откачку поступает отстоенный жидкий металл из нижних слоев ванны печи (так как экран предотвращает перемешивание), а зеркало остается спокойным под слоем шлака (вне контакта с воздухом), футеровка печи не ослаблена шпуровым отверстием в днище, отсутствуют затраты на пробивание и закрытие шпурового отверстия. Откачка жидкого металла осуществляется под действием электромагнитного напора, более чем в два раза превышающего электромагнитный напор индуктора в металлургических режимах, при этом откачиваемая струя жидкого металла, идущая на разлив, проходя последовательно каналы индуктора, подогревается, а печь при откачке работает в миксерном режиме и, таким образом, экономится электроэнергия. Кроме того, в печи осуществляется очистка жидкого металла: более легкие включения всплывают при отстое вверх на зеркало, более тяжелые опускаются вниз на дно, от прочих включений жидкий металл очищается в каналах индуктора: в зоне действия электромагнитных сил, направленных вверх: жидкий металл квазиоблегчается, а неметаллические включения (шлаки), на которые электромагнитные силы не действуют, по отношению к жидкому металлу квазиутяжеляются и опускаются на дно, а в металлоотвод и далее на разлив поступает, таким образом, отсепарированный жидкий металл, что улучшает микроструктуру слитков и отливок. Таким образом, в печи, кроме режимов плавления, миксерных режимов, процессов рафинирования жидкого металла, можно осуществлять сепарацию жидкого металла от неметаллических включений, откачку жидкого металла из печи с подогревом откачиваемой струи, т.е. расширить технологические и функциональные возможности печи.

При анализе процессов в печи использована математическая модель на основе системы дифференциальных уравнений в комплексной форме в относительных единицах движения жидких металлов в бегущем винтовом магнитном поле [3-6]. Определены зависимости распределения по объему цилиндра 2 индукции, плотности тока, плотности 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 или в напорный патрубок 12 и в металлоотвод 11 и далее на разлив. Радиальная и азимутальная компоненты индукции с достаточной степенью точности можно считать равномерно распределенными по поперечному сечению канала и при числе Рейнольдса равном единице рассчитыва-

ются по формуле $B = 1 + 0,2r$, где r – радиус цилиндра 2 (МГД – канала). Азимутальная компонента плотности тока с увеличением радиуса увеличивается по функции $J_a = 1 + 2r$, а радиальная – уменьшается в соответствии с зависимостью $J_p = 1 - r$. Аксиальная компонента электромагнитных сил практически равномерно распределена по поперечному сечению цилиндра 2 и рассчитываются по формуле $f_a = 1 + 0,2r$. Таким образом, анализ показывает, что индукционная тигельная печь оригинальной конструкции развивает удовлетворительные производительность и электромагнитный напор.

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. 1183810 А СССР, F 27 D 11/06. Индукционная печь / Г. К. Смолин. 1985. Бюл. № 37.
3. Смолин Г.К. МГД-устройства для обработки расплавленного металла // Проблемы электроэнергетики, информатики и образования: сб. науч. тр. / под редакцией Г.К.Смолина. Екатеринбург: Рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2009. С. 69 - 80.
4. Смолин Г.К. Трехфазный безобмоточный МГД-насос «Тандем» // Проблемы электроэнергетики, информатики и образования: сб. науч. тр. / под редакцией Г.К. Смолина. Екатеринбург: Рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2010. С. 55 – 58.
5. Разработка основ теории, методики расчета нового электромагнитного насоса "Тандем" для жидких металлов и исследование его параметров и характеристик: заключительный отчет о НИР/ ФГАОУ ВО РГППУ; Руководитель Г.К.Смолин. № госрегистрации 01201170836. Екатеринбург, 2015. 100 с.
6. Смолин Г.К., Шабалдин Е.Д. Линейно-вихревые и трансформаторные МГД-устройства / Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы 1 Международной научно-технической конференции. Пермь, 24-25 сентября 2015 г. Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2015. С.216-223.