



The brief information about crucibleless furnaces of reflecting type of melting, storage and melt discharge is given. For the purpose of increase of their effectiveness the theoretical calculation on optimization of multilayer brickwork parameters is carried out as well as composition of lining material is chosen.

*А. Т. ВОЛОЧКО, ФТИ НАН Беларуси, П. С. ГРИНЧУК, ИТМО НАН Беларуси,
Г. В. МАРКОВ, А. А. ЖУКОВА, ФТИ НАН Беларуси*

УДК 621.74

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ БЕСТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ПЛАВКИ, ХРАНЕНИЯ И ВЫДАЧИ РАСПЛАВА

Введение. В последние годы в мировой практике в качестве плавильно-раздаточного оборудования нашли применение бестигельные печи с верхним отражательным расположением нагревателей. Такие печи лишены промежуточной границы раздела в виде тигля между нагревателем и расплавом, что способствует снижению энергопотребления. Так, при емкости печи 300–400 кг по алюминию расплаву энергопотребление может быть снижено в 1,5–3,0 раза в сравнении с тигельными раздаточными печами [1]. Эффективность работы предлагаемого оборудования также связана с повышением качества литья. Исключение из технологии литья чугуновых тиглей снижает брак за счет устранения насыщения расплава железом. В этом случае роль тигля выполняет многослойная футеровка, являющаяся важным элементом их конструкции, которая в значительной степени определяет стоимость, срок службы, качество металла и энергопотребление печного агрегата.

Такие печи могут быть использованы в качестве плавильного, плавильно-раздаточного и раздаточного оборудования и позволяют вести плавку металла и осуществлять его непрерывную разливку.

В практике алюминиевого литья имеется ряд производств, где перед разливкой расплава из раздаточной печи необходима его комплексная обработка, которая предусматривает продувку расплава газами при одновременной флюсовой обработке, обработке дисперсными частицами и др. [2]. При этом плавка металла может производиться в больших индукционных печах [3], а раздача металла в формы происходит в печах хранения и выдачи расплава.

Заводом электродвигателей «Элласт» (г. Новолукомль) совместно с ФТИ НАН Беларуси и ОАО

«Минский моторный завод» предложена универсальная конструкция отражательной печи, которая позволяет осуществлять все названные выше операции.

Анализ конструкции и технологических особенностей работы таких печей показывает, что в качестве путей повышения эффективности их работы могут быть предложены правильный выбор состава и оптимизация параметров многослойной футеровки, а также определение конструктивных особенностей, позволяющих минимизировать тепловые потери.

Выбор состава и оптимизация параметров многослойной футеровки. Многослойная футеровка печей является важным элементом их конструкции. Она в значительной степени определяет стоимость, срок службы и энергопотребление печного агрегата. Например, одним из главных требований, предъявляемых к футеровке печи, является ее стойкость к воздействию переменной во времени высокой температуры, агрессивному действию пыли, шлаков, газов. Тепло, подводимое к футеровке со стороны рабочего пространства печи, можно разделить на две составляющие: аккумуляцию тепла футеровкой и тепловые потери теплопроводностью в окружающую среду. Согласно имеющимся литературным данным, обычно потери тепла теплопроводностью составляют от 14 до 41% всех потерь [4]. Таким образом, потери тепла через футеровку и, как следствие, расход энергии на покрытие этих потерь значительны. При увеличении толщины футеровки потери тепла теплопроводностью снижаются, но возрастают тепловые потери на аккумуляцию, что увеличивает капитальные затраты и эксплуатационные расходы на тепловое ограждение печи. Поэтому актуальным

является решение задачи оптимизации футеровки печи с учетом ее теплотехнических, эксплуатационных и стоимостных характеристик. Оптимизация футеровки печи предлагает варьирование применяемыми огнеупорными материалами, толщиной рабочего внутреннего слоя, тепловой изоляции. Все перечисленные параметры – факторы оптимизации.

Исследованию данного вопроса посвящен ряд работ, но в них рассматривается в основном одномерная футеровка печи, что не отражает реальной ее конструкции и приводит к неизбежным погрешностям вследствие не принимаемых в расчет потерь тепла в неучтенных направлениях. В работе [5] проводилось изучение оптимальной толщины футеровки на модели печи, выполненной из волокнистых огнеупорных материалов. Полученные результаты касаются только сравнительного выбора данных материалов. Авторы в работе [6] выполнили задачу оптимизации конструкций одномерных многослойных футеровок. Как и в указанной выше работе, плотность теплового потока, проходящего через все слои такой стенки, была принята одинаковой и постоянной. Это допущение дает значительную погрешность, так как в реальных конструкциях плотность теплового потока по толщине (отдельным слоям) многослойной футеровки печи – величина не одинаковая.

При разработке конструкции электропечи хранения и выдачи расплава СВО-400Р (рис. 1) была проведена оптимизация конструкции многослойной футеровки и применяемых для этих целей материалов.

На основе принципов оптимизации параметров футеровки печей, которые представлены в работе [7], нами были проведены теоретические расчеты температуры на границах слоев футеровки с учетом теплообмена излучением, и на этой основе

был оптимизирован состав и толщина многослойной футеровки. Рассматривалась многослойная футеровка, состоящая из слоев различной толщины и материалов. При оптимизации футеровки печи хранения и выдачи расплава решались следующие задачи:

- определение оптимальной толщины футеровки печи, обеспечивающей уменьшение потерь теплоты и энергии;
- определение и выбор оптимальных последовательности разложения и толщины отдельных слоев из огнеупорных и теплоизоляционных материалов.

Анализировалось стационарное во времени температурное поле футеровки, когда температура изменяется только по толщине вдоль координат x, y, z . Нулевым координатам соответствует внутренняя поверхность футеровки рабочего пространства печи с температурой $t_{\text{кл}}$, конечным координатам – наружная поверхность футеровки с температурой $t_{\text{нар}}$.

Для определения потерь тепла теплопроводностью через кладку необходимо учитывать граничные условия первого и третьего рода. При этом задаются ограничение температуры на наружной поверхности кладки $t_{\text{нар}}$, условия (закон) теплообмена и температура в рабочем пространстве печи $t_{\text{кл}}$, а также определяется температура внутренней поверхности кладки.

При оптимизации футеровки печи исходили из уравнения для расхода тепла теплопроводностью через n -слойную плоскую стенку с отличающимися площадями, которые имеют вид [8]:

$$Q_m = \frac{t_{\text{кл}} - t_{\text{в}}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i F_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} F_{\text{нар}}}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{в}}, t_{\text{кл}}$ – соответственно температуры окружающего воздуха и внутренней поверхности кладки, °С;



а



б

Рис. 1. Печь СВО-400Р и ее многослойная футеровка: а – общий вид печи СВО-400 Р; б – многослойная футеровка печи СВО-400 Р

$\delta_i, \lambda_i, F_i, F_{нар}$ – соответственно толщина, коэффициент теплопроводности, средняя поверхность теплоотдачи i -го слоя, наружная поверхность футеровки; $\alpha_{нар}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности футеровки печи в окружающую среду, Вт/(м²·К).

Здесь суммарная теплоотдача от наружной стенки футеровки в окружающую среду $\alpha_{нар}$ равна теплоотдаче конвекцией $\alpha_к$ и излучением $\alpha_л$:

$$\alpha_{нар} = \alpha_к + \alpha_л, \quad (2)$$

где $\alpha_к, \alpha_л$ – соответственно коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением, Вт/(м²·К).

Так как в конструкции футеровки стен и пода печи, как правило, имеются отличия по материалу и количеству слоев, их толщине, то оптимизация проводилась отдельно для стенок и отдельно для пода печи.

Разработанный на основании уравнений (1) и (2) алгоритм оптимизации позволяет провести оценку различных сочетаний параметров многослойной футеровки и оптимизировать ее при заданных функционально-технических ограничениях. Основными параметрами алгоритма являются расположение футеровки и ее элементов в пространстве, толщина огнеупорного слоя, тип огнеупорных и теплоизоляционных материалов и их теплофизические характеристики, температура в рабочем пространстве печи, температура наружных стенок футеровки, температура окружающей среды.

Расчет температур на границах слоев проводится в следующей последовательности. В начале задается материал, толщина и число слоев огнеупорных и теплоизоляционных материалов, температура в рабочем пространстве печи, температура наружной поверхности футеровки, температура окружающей среды. Задаются и определяются размеры рабочего пространства печи. Также определяются площади наружной поверхности кладки, внутренних и наружных поверхностей слоев футеровки, коэффициент теплоотдачи в воздух от наружной поверхности кладки. И, как результат, рассчитывается тепловой поток от наружной поверхности футеровки в окружающую среду.

Для каждого слоя футеровки вычисляются удельные тепловые потоки. При определении температуры внутренней поверхности первого слоя футеровки t_0 необходимо использовать заданную эффективную температуру в рабочем пространстве печи. В первом приближении задается температура на границе первого и второго слоев t_1 и определяется для выбранного огнеупорного материала коэффициент теплопроводности λ_1 . Затем уточняется температура на границе слоев t_1 :

$$t_1 = t_0 - q_1 \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad (3)$$

где q_1 – удельный тепловой поток для первого слоя футеровки печи, Вт/м²; δ_1 – толщина первого слоя футеровки, м.

Если принятая и определенная температура на границе слоев не совпадают с заданной степенью точности, то приближение повторяется при заданной новой температуре. Аналогичные расчеты проводят для всех слоев футеровки. Толщина последнего слоя теплоизоляционного материала уточняется исходя из заданной температуры наружной поверхности футеровки $t_{нар}$ и ее площади $F_{нар}$.

Выбор огнеупорных и теплоизоляционных материалов, последовательности их расположения и толщины слоев футеровки печи хранения и выдачи расплава производится до тех пор, пока значения заданной и полученной температуры наружной поверхности не совпадут с определенной степенью точности.

На рис. 2 приведены схемы оптимизации многослойной футеровки печи хранения и выдачи расплава, выполненные согласно описанному выше алгоритму.

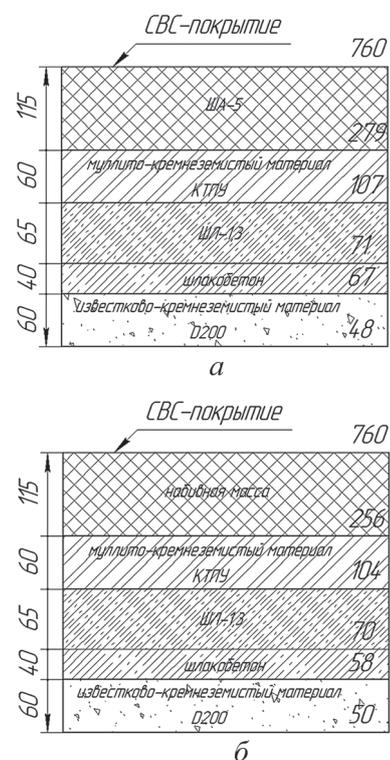


Рис. 2. Стационарное распределение температур по стенке футеровки в зависимости от толщины и материала каждого слоя: а – рабочий слой, соприкасающийся с расплавом, выполнен из огнеупорного шамота марки ША-5; б – рабочий слой, соприкасающийся с расплавом, выполнен из набивной массы

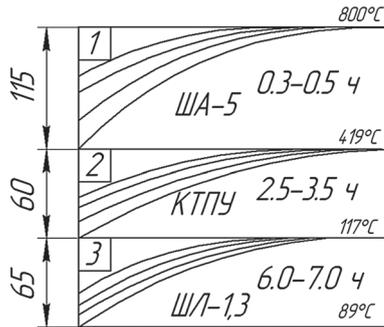


Рис. 3. Распределение температуры в многослойной футеровке печи во времени

Исходя из результатов расчета, был определен оптимальный состав многослойной футеровки стены, включающий набивную массу на фосфатном связующем или шамотный огнеупор марки ША-5 (толщина слоя 120 мм), два слоя теплоизоляционного материала на основе муллито-кремнеземистого волокна толщиной 60 мм, один слой шамотного легковеса толщиной 65 мм, один слой теплоизоляционного известково-кремнеземистого материала толщиной 60 мм.

Была также проведена оценка изменения распределения температуры в многослойной футеровке во времени (рис. 3).

Из рисунка видно, что температура внешней стенки шамотного кирпича начнет повышаться через 0,3–0,5 ч после заливки алюминиевого расплава, температура внешней стенки материала на основе муллито-кремнеземистого волокна – через 2,5–3,5 ч после заливки алюминиевого расплава, температура внешней стенки шамотного легковеса – через 6–7 ч после заливки алюминиевого расплава. Максимум достигаемой температуры поверхности стенок многослойной футеровки достаточно точно совпадает с расчетами, проводимыми в стационарном режиме.

Определение конструктивных особенностей, позволяющих минимизировать тепловые потери печи СВО-400Р. Основные тепловые потоки потерь тепла будут идти через открытую крышку посредством теплового излучения и через ограждающие стенки печи теплопроводностью. Электрическая мощность нагревателя должна быть не меньше, чем суммарная мощность всех тепловых потерь [9].

С целью оптимизации конструктивных особенностей, позволяющих минимизировать тепловые потери, была разработана методика расчета теплового состояния печи при выдержке расплава, которая учитывает потери тепла излучением открытого зеркала жидкого алюминия.

Для вычисления теплового потока излучением необходимо прежде всего найти угловые коэффици-

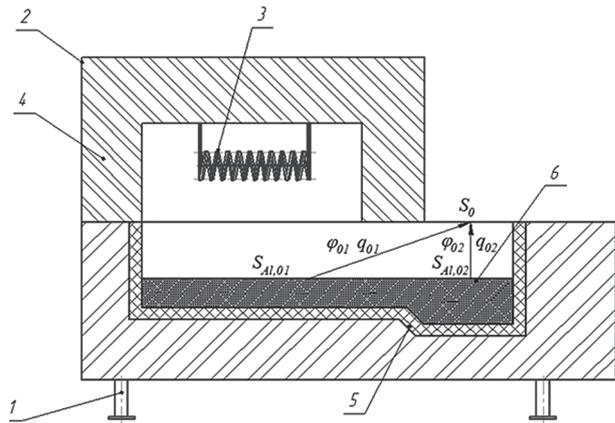


Рис. 4. Печь и схема для нахождения угловых коэффициентов между поверхностью расплава и отверстием для забора расплава: 1 – ножки печи; 2 – металлический корпус; 3 – электрические нагреватели; 4 – футеровка свода печи; 5 – футеровка пода печи; 6 – алюминиевый расплав

циенты φ_0 между поверхностью расплава площадью S_{Al} и отверстием для забора расплава площадью S_0 (рис.4):

$$S_{Al} = S_{Al,01} + S_{Al,02},$$

где $S_{Al,02}$ – площадь поверхности расплава, находящаяся непосредственно под отверстием для забора расплава; $S_{Al,01}$ – оставшаяся площадь.

Задача разбивается на две части – нахождение углового коэффициента между отверстием и площадью расплава, не граничащей с отверстием φ_{01} , и между отверстием и расплавом, расположенным непосредственно под отверстием φ_{02} . При этом тепловой поток излучением через отверстие для забора расплава можно оценить следующим образом:

$$q_{изл} = q_{01} + q_{02} = \varepsilon \sigma T_{Al}^4 (\varphi_{01} S_{Al,01} + \varphi_{02} S_{Al,02}). \quad (4)$$

Здесь ε – степень черноты расплава ($\varepsilon \sim 0,7$); σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Анализ задачи в рамках стереометрии позволяет получить выражение для расчета коэффициентов φ_{01} и φ_{02} :

$$\varphi_{01} = \frac{b_2}{b_1 - b_2} \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{A_1}{\sqrt{1 + A_1^2}} \arctg \left(\frac{B_1}{\sqrt{1 + A_1^2}} \right) + \frac{B_1}{\sqrt{1 + B_1^2}} \arctg \left(\frac{A_1}{\sqrt{1 + B_1^2}} \right) \right\}, \quad (5)$$

$$A_1 = a_1 / h, \quad B_1 = (b_1 - b_2) / h, \quad (6)$$

$$\Phi_{02} = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{1}{2A_2B_2} \ln \left[\frac{(1+A_2^2)(1+B_2^2)}{1+A_2^2+B_2^2} \right] + \frac{\sqrt{1+A_2^2}}{A_2} \times \operatorname{arctg} \left(\frac{B_2}{\sqrt{1+A_2^2}} \right) + \frac{\sqrt{1+B_2^2}}{B_2} \times \operatorname{arctg} \left(\frac{A_2}{\sqrt{1+B_2^2}} \right) - \frac{1}{A_2} \operatorname{arctg} B_2 - \frac{1}{B_2} \operatorname{arctg} A_2 \right\}, \quad (7)$$

$$A_2 = a_2 / h, \quad B_2 = b_2 / h, \quad (8)$$

где a_1, b_1 – соответственно ширина и длина зеркала расплава; a_2, b_2 – соответственно ширина и длина крышки; h – расстояние между зеркалом расплава и плоскостью крышки.

Результаты расчета коэффициентов Φ_{01} и Φ_{02} в зависимости от расстояния h между зеркалом расплава и плоскостью крышки для геометрии печи приведены на рис. 5, а результаты расчетов потоков тепла излучением через отверстие для забора расплава – на рис. 6.

При этом принято, что температура поверхности расплава T_{A1} составляет 750 °С, а степень черноты ϵ расплава равна 0,7.

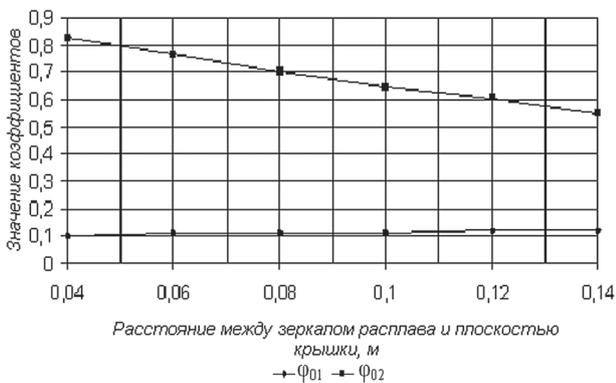


Рис. 5. Зависимость коэффициентов Φ_{01} и Φ_{02} от расстояния между зеркалом расплава и плоскостью крышки

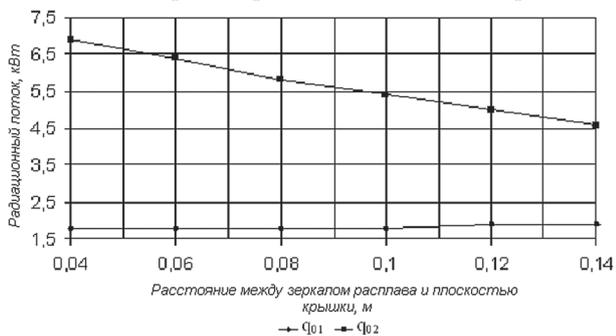


Рис. 6. Зависимость радиационного потока q_{01} и q_{02} от расстояния между зеркалом расплава и плоскостью крышки

Как следует из рисунков, потоки тепла излучением q_{01} и q_{02} достаточно большие и сравнимы с мощностью нагревателя печи (~15 кВт). Поток тепла q_{02} в 3–4 раза больше q_{01} . Вместе с тем, если поток тепла q_{01} исключить, т. е. не дать ему выходить наружу, тогда можно получить значительную экономию мощности печи. Осуществить это конструктивно достаточно легко, поставив теплоизолирующую перегородку.

Сейчас оценим тепловые потоки теплопроводностью через стенки печи. Распределение температур и тепловые потоки найдем в стационарном приближении. Будем полагать, что на внутренней поверхности стенки поддерживается температура, равная температуре расплава T_{A1} . Для нахождения тепловых потоков через стенку печи (для простоты будем рассматривать под печи) используем уравнение (1).

Применим формулы (1)–(8) для расчета тепловых потерь печи, геометрическая схема которой приведена на рис. 4. Примем, что $\epsilon = 0,7$, а $\alpha \approx 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Учтем также, что суммарная площадь стенок печи равна 37 м^2 , $S_{A1} = 0,9 \text{ м}^2$, $S_0 = 0,21 \text{ м}^2$, $h = 0,04 \text{ м}$, $b_1 = 1,55 \text{ м}$, $b_2 = 0,35 \text{ м}$. Результаты соответствующих расчетов приведены в таблице.

Зависимость тепловых потоков от геометрических, конструктивных и теплофизических особенностей применяемых материалов

Температура расплава, °С	Радиационный поток q_{01} , кВт	Радиационный поток q_{02} , кВт	Тепловой поток через футеровку	Общие тепловые потери печи, кВт
700	1,9	6,3	0,98	9,2
750	2,3	7,7	1,06	11,1
800	2,8	9,3	1,13	13,2
850	3,3	11,1	1,2	15,6

Как оказалось, результаты расчетов корректно совпадают с экспериментальными результатами, полученными в процессе опытной эксплуатации печи. Так, в частности, температура внешней поверхности печи T_n , согласно расчетам, должна была составлять 40–45 °С, а в ходе экспериментов она не превышала 37–40 °С.

Таким образом, разработана методика расчета теплового состояния печи для выдержки расплава алюминия при определенной температуре, на этой основе найдены пути оптимизации ее геометрических размеров и подбора футеровочных материалов.

Литература

1. Садоха М. А., Мельников А. П. Энергосбережение при производстве отливок из алюминиевых сплавов // Литье и металлургия. 2008. № 2. С. 43–46.
2. Волочко А. Т., Изобелло А. Ю., Овчинников В. В. Комплексная обработка силуминов дисперсными частицами и атомарным азотом // Литье и металлургия. 2009. № 3. С. 218–226.
3. Волочко А. Т. Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов. Мн.: Белорусская наука, 2006.
4. Абакумов В. Г., Новиков В. Л. Методы оптимизации конструкции многослойных печных футеровок // Огнеупоры. 1983. № 7. С. 45–49.
5. Смугина Л. Н., Степанчук В. Ф., Козлов А. И. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. 1981. № 2. С. 131–133.
6. Абакумов В. Г., Цибин И. П., Новиков В. Л. Конструирование экономических футеровок промышленных агрегатов // Огнеупоры. 1987. № 5. С. 822–827.
7. Парамонов А. М. Научные основы повышения эффективности работы печных агрегатов: Дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2007.
8. Справочник теплоэнергетика предприятий цветной металлургии / Под ред. О. Н. Баргова, З. Л. Берлина. М.: Металлургия, 1982.
9. Гринчук П. С. Математическое моделирование тепловых режимов работы электропечей сопротивления // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83. С. 28–37.