

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ НАГРЕВА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКСЕРОВ И ВНЕПЕЧНЫХ УСТАНОВОК ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Михайлов К.А.,

научный руководитель канд. техн. наук Михайлов Д.А.

Сибирский федеральный университет

На большинстве отечественных предприятий системы нагрева электрических миксеров и внепечных установок рафинирования и фильтрации расплавов на основе алюминия (типа SNIF и PDBF) представлены подвесными стержневыми нагревательными элементами, помещенными в защитные трубы. Наиболее распространенными являются трубчатые электронагреватели фирмы Kanthal, состоящие из защитных труб Kanthal APM (Fe-22%, Al-6%) и нагревательных элементов Kanthal Tubothal. Основным недостатком таких электронагревателей являются низкая механическая прочность и склонность к насыщению элементами N, K, Na, Cl, F, Cu, Ni, Mn и Mg материала труб. Анализ причин выхода из строя электронагревателей фирмы Kanthal показал, что защитные трубы наиболее склонны к газовой коррозии при поддержании рабочей температуры в диапазоне (850-900) °С, а к механической деформации – в периоды перехода материала защитных труб через границу хладотвердости (850-870) °С [1, 2]. Проведенный анализ условий эксплуатации электронагревателей на ООО «РУСАЛ - Красноярск», ООО «РУСАЛ - Саяногорск» и ООО «РУСАЛ - Новокузнецк» с 2007 по 2012 гг. показал, что применяемые для защиты нагревательных элементов металлические трубы в наибольшей мере склонны к деформации и зарастанию при приготовлении алюминиевых сплавов с использованием флюсов. Использование дорогостоящих нагревательных элементов на большинстве предприятий ОК «РУСАЛ» практически не изменило ситуацию с выходом из строя электронагревателей.

С целью повышения газовой и коррозионной стойкости, а также для решения задачи повышения энергетической эффективности системы электронагрева требуется:

- Снизить температуру на нагревательных элементах;
- Повысить долю мощности, излучаемой на поверхность металла.

В наибольшей степени данным требованиям удовлетворяет электронагреватель замурованного типа, нагревательные элементы которого отделены от внутривспечного пространства защитными экранами или же располагаются в огнеупорном электроизоляционном блоке. По сравнению с электронагревателем, оснащенным открытыми нагревательными элементами, преимуществом такой конструкции является увеличение площади активно излучающей поверхности на 30-40 % [3]. Вместе с этим, применение неметаллических материалов в качестве огнеупорного электроизоляционного блока позволяет снизить интенсивность зашлаковывания излучающей поверхности. Результатом этого является снижение теплового сопротивления между зеркалом расплава и нагревательными элементами.

С учетом данных факторов были разработаны и исследованы несколько типов электронагревателей с повышенной энергетической эффективностью и надежностью. Электронагреватель конструкции «светящийся» свод (тип I) [4] содержит стержни, которые соединены последовательно и расположены в каналах дистанцирующего устройства, выполненного из корундовой керамики ($\lambda_k=(2\div5)$ Вт/м·°С, $\rho=(3700\div3900)$ кг/м³). Проведенные в 2005 году на ОАО «РУСАЛ-Красноярск» испытания опытно-промышленного образца электронагревателя конструкции

«светящийся» свод (тип I) подтвердили повышенную энергетическую эффективность электронагревателей такого типа и определили направление изысканий при поиске оптимальной конструкции.

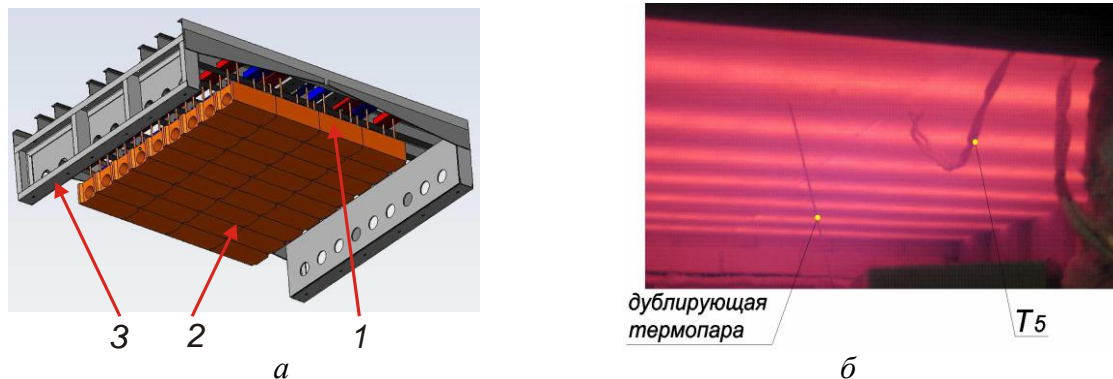


Рис. 1. Электронагреватель конструкции «светящийся» свод (тип II): *a* – общий вид; *б* – вид поверхности в ходе испытаний на миксере САМ-5 (ООО «ЗМИ Сиблента», г. Красноярск)

В период с 2005 по 2007 гг. был разработан, изготовлен и исследован представленный на рисунке 1, *a* опытно – промышленный образец электронагревателя конструкции «светящийся» свод (тип II) для электрического миксера САМ-5 (ООО «ЗМИ Сиблента») [5]. Основными узлами такого электронагревателя являются: теплопроводный слой 1, излучающая поверхность 2, каркас 3 и нагревательные элементы (на рисунке не показаны).

С целью достижения наибольшей энергетической эффективности необходимо было определить влияние характерных параметров электронагревателя конструкции «светящийся» свод (тип II) на тепловое поле. Для этого была разработана численная модель электронагревателя с привлечением САД- и САЕ-пакетов программ (Solid Works, Ansys ICEM, Ansys Multiphysics, Ansys CFX).

Решение тепловой задачи в расчетной области (включает электрический миксер и окружающую среду) сводится к нахождению температурного поля расплава, ограждающей футеровки и системы нагрева в каждый момент времени t [6].

Уравнением Фурье с внутренними источниками теплоты описывается теплообмен в области электронагревателя и в области футеровки (без последнего члена):

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (1)$$

где q_v – объёмная мощность тепловыделения, Вт/м³; c – удельная теплоёмкость, Дж/кг·°С; t – время, сек; ρ – плотность материала, кг/м³; T – температура, °С; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С.

Теплообмен в воздушном внутривспечном пространстве между расплавом, футеровкой и электронагревателем осуществляется преимущественно за счет излучения и учитывается уравнением Стефана – Больцмана:

$$q = \varepsilon_r c_0 (T_n^4 - T_{p.r}^4), \quad (2)$$

где ε_r – степень черноты расплава; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м²·К⁴; $T_{p.r}$ – температура на поверхности расплава, °С; T_n – температура на поверхности электронагревателя, °С.

Однозначное решение задачи определяется заданием начальных (3), граничных условий (4) в начальный момент времени t_0 :

$$T = f_0(x, y, z, T), \quad (3)$$

$$q_{\text{вн}} = \alpha \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{вн}}), \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); $T_{\text{вн}}$ – температура окружающей среды, °C; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности миксера, °C.

Коэффициент теплоотдачи α определяется из выражения:

$$\alpha = a_0 + a_1 + (T_{\text{пов}} - 30) - a_2(T_{\text{пов}} - 30)^2 + a_3(T_{\text{пов}} - 30)^3, \quad (5)$$

где a_0, \dots, a_3 – постоянные коэффициенты, зависящие от вида теплоотдающей поверхности.

В ходе проведения исследований с помощью численной модели были получены зависимости температурного перепада $\Delta T_{\text{нагр}}$ и температуры излучающей поверхности $T_{\text{и.п}}$ от температуры нагревательных элементов $T_{\text{н.э.}}$. Анализ данных зависимостей позволил установить, что выполнение теплопроводного слоя из материала на основе корундокарбидокремниевое бетона ККБ-70 с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{тс}}=(4\div 7)$ Вт/м·°C [7], в сочетании увеличением эффективной площади излучающей поверхности, позволяет повысить среднеинтегральную температуру излучающей поверхности (рис. 2, а) и снизить температурный перепад между поверхностью расплава и излучающей поверхностью свода $\Delta T_{\text{пов-распл}}$ на 80 °C (рис. 2, б). В результате этого тепловая мощность, излучаемая на поверхность металла возрастает в среднем 1,5-2 раза (в зависимости от температурного перепада между излучающей поверхностью и расплавом).

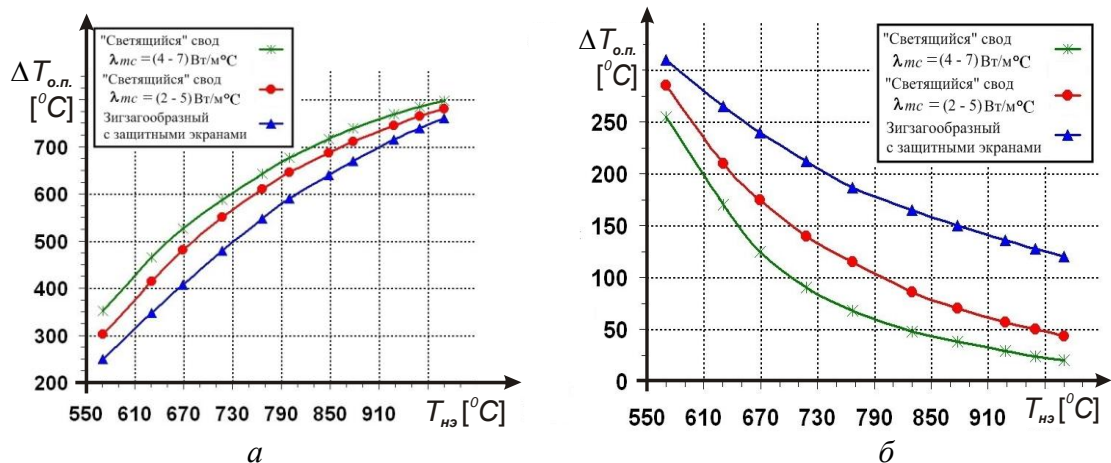


Рис. 2. Зависимости: а) температуры отражающей поверхности $T_{\text{о.п}}$; б) температурного перепада $\Delta T_{\text{нагр}}$ от температуры нагревательного элемента $T_{\text{н.э.}}$

Достоверность разработанной численной модели была оценена в ходе сравнительного анализа экспериментального и расчетного распределений температуры в теплопроводном слое, полученных на физической модели миксера (масштаб 1:10), которая была оснащена электронагревателем конструкции «светящийся» свод (тип II). Относительная погрешность измерений $\varepsilon_{\text{рм}}$ не превышала 9 % при доверительной вероятности $P=95\%$.

Кроме этого, для подтверждения адекватности разработанной математической модели была произведена сравнительная оценка данных, полученных с помощью математической модели, имитирующей процесс нагрева электронагревателя конструкции «светящийся» свод миксера САМ-5 и данных, полученных в ходе эксперимента на опытно – промышленном образце электронагревателя в период с 19 по 28 сентября 2007 г.. Относительная погрешность измерений $\varepsilon_{\text{рм}}$ не превышала 6,12 %

при доверительной вероятности $P=95\%$. Сравнение результатов экспериментов приведено в таблице 1.

Таблица 1. – Температура на излучающей поверхности электронагревателя

№ термопары	Измеренная температура, °С	Рассчитанная температура, °С	Относительная погрешность ε , %
1	778,3	813,45	4,317
2	845,7	822,62	2,802
3	846,7	901,88	6,122
4	837,3	827,21	1,224
5	784,7	741,54	5,816
6	926,0	967,38	4,278
7	930,7	882,93	5,407

Выводы:

1. Внедрение электронагревателя предложенной конструкции «светящийся» свод (тип II) с расположением нагревательных элементов в огнеупорном слое свода позволит увеличить эффективную излучаемую мощность на поверхность расплава не менее чем в 2 раза;
2. Разработанная численная модель электронагревателей конструкции «светящийся» свод позволяет производить оптимизационный поиск при изменении ряда характерных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Resistance Heating Alloys and System for Industrial Furnaces. Каталог 1-A-5B. KANTHAL. Hallstahammar, Sweden, 2001. – 38 p.
2. Investigation of KANTHAL Tubothal: Investigation report / «Kanthal AB». Reg. no. E07129. – Hallstahammar, Sweden, September 03, 2007. – 7 p.
3. Свенчанский, А. Д. Электрические промышленные печи / А. Д. Свенчанский. – М.: Энергия, 1975. – 384 с.
4. Патент РФ №32953, МПК⁷ Н 05 В 3/46, Н 05 В 3/48, Н 05 В 3/64. Электронагреватель / А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, П. А. Хоменков (РФ). – №2003113452/20; Заявлено 07.05.2003; Опубл. 27.09.2003, Бюл. № 27.
5. Патент РФ №38915, МПК⁷ F 27 D 1/02. Электрический миксер для приготовления алюминия и его сплавов/ А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, П. А. Хоменков, А. В. Богданчиков. – №2004106958/20; Заявлено 09.03.2004; Опубл. 10.07.2004, Бюл. № 19.
6. Темеров, А. А. Повышение надежности и энергетической эффективности систем нагрева электрических миксеров для приготовления алюминиевых сплавов / А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, Д. А. Михайлов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2010. – № 6 (32). – С. 150-154.
7. Сизов, В. И. Огнеупорные массы, бетоны и изделия для футеровок агрегатов плавки алюминия / В. И. Сизов, А. М. Гороховский, Е. В. Беклемышев и др. // Алюминий Сибири 2008: сб. научн. статей. – Красноярск: ООО «Версо», 2008. – С. 335-338.