

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

М.Ю. Кучинский

Научный руководитель д.т.н. М.В. Первухин
Сибирский федеральный университет

Электрические печи сопротивления получили очень широкое распространение. Это обусловлено сравнительной простотой их конструкции, относительно невысокой стоимостью и постоянно увеличивающимся объемом проведения общепромышленных процессов термической обработки металлов и сплавов. В данной статье рассматриваются особенности моделирования тепловых процессов в камерной печи сопротивления, используемой преимущественно для приготовления алюминиевых сплавов. Печь представляет собой футерованную камеру с жаропрочной ванной, в верхней части камеры располагаются нагревательные элементы (рис.1).

Целью исследования является расчет энергетических и конструктивных параметров ЭПС. Математическое моделирование тепловых процессов является важной и актуальной задачей, что позволяет в будущем повысить энергоэффективность и качество промышленного производства алюминиевой продукции.

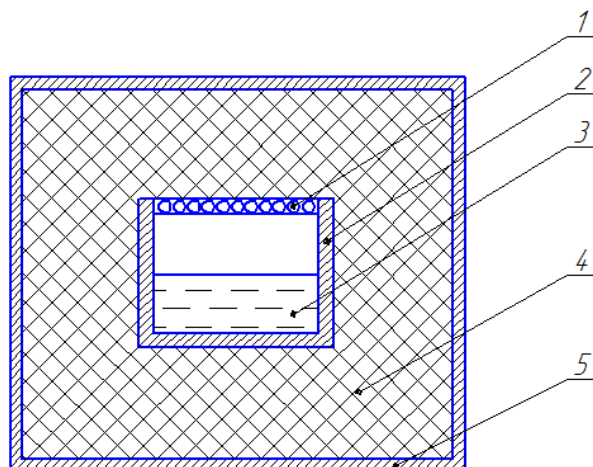


Рис. 1. Схема камерной ЭПС:

1-нагреватели; 2- жаропрочная ванна; 3-нагреваемый металл; 4- футеровка; 5- кожух

Теплообмен в электрической печи сопротивления протекает в результате следующих физических процессов: излучения, теплопроводности, конвекции.

Теплообмен излучением происходит между нагревательными элементами, нагреваемым металлом и стенками печи. При возрастании уровня абсолютных температур в камере электрической печи теплообмен излучением становится преобладающим, по сравнению с конвекцией.

Лучистый теплообмен описывается законом Стефана – Больцмана:

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1)$$

где $C_0 = \sigma \cdot 10^8 = 5.7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$, ε - степень черноты, $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$ - постоянная Больцмана.

Теплопроводность осуществляется между нагретым металлом и футеровкой печи. Основным закон теплопроводности – закон Фурье. Количество теплоты, проходящее через изотермическую поверхность площадью F за время τ , пропорционально температурному градиенту.

$$\bar{Q} = -\lambda \text{ grad } t F \tau \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности тела.

Конвекция происходит внутри камеры печи, за счет перемещения частиц нагретого воздуха и расплавленного металла. В исследуемой математической модели конвективный теплообмен в камере не учитывается, так как не оказывает значительного влияния на нагрев металла, в данном технологическом процессе преобладает лучистый теплообмен.

При постановке задачи используются граничные условия третьего рода, характеризующиеся законом конвективного теплообмена между телом и окружающей средой в стационарных условиях. В качестве футеровки рассматривается однослойная стенка. Через поверхности стенки происходит теплообмен конвекцией с окружающей средой. Выражение, описывающее граничные условия третьего рода имеет вид:

$$-\lambda_c \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_c = \alpha (t_c - t_{жс}) \quad (3)$$

где α - коэффициент теплоотдачи.

Расчет математической модели производится в программном пакете ANSYS Workbench. За основу была взята двухмерная модель камерной ЭПС (рис.2). Материал футеровки – шамотный кирпич. Максимальная температура нагревателей составляет 900 °С, требуемая температура расплава достигает 660 – 700 °С.

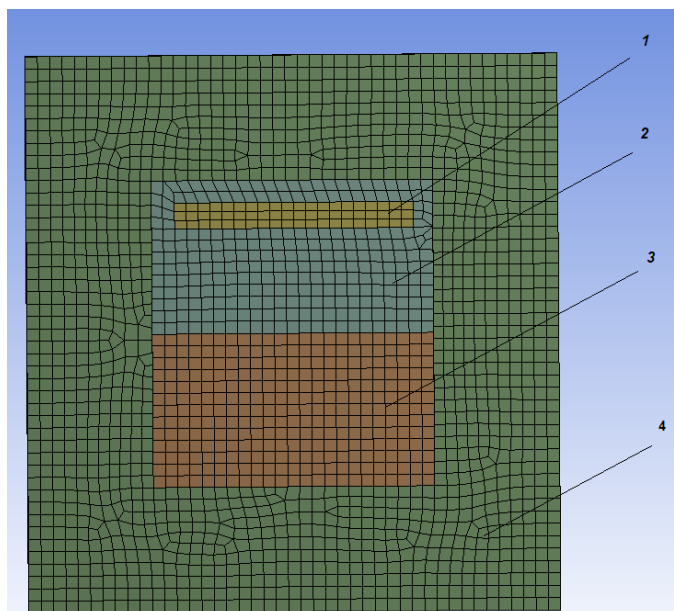


Рис. 2. Расчетная модель камерной ЭПС:

1-нагреватели; 2- воздушное пространство; 3-нагреваемый металл; 4- футеровка

В процессе моделирования были найдены распределения тепловых полей (рис.3). Время нагрева металла до наступления установившегося режима составило 5,5 ч (рис.4).

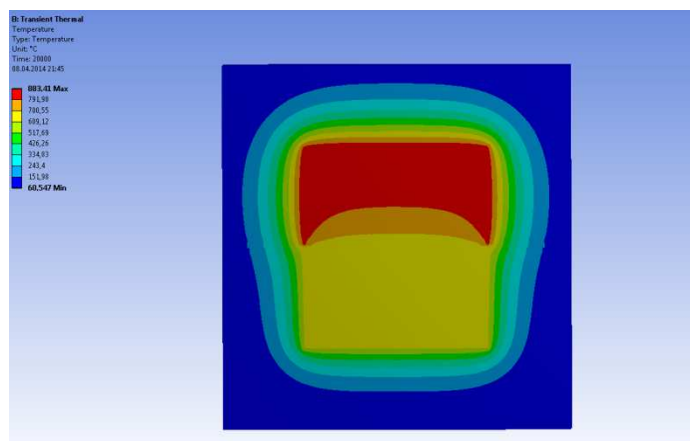


Рис. 3. Распределение теплового поля при установившемся режиме

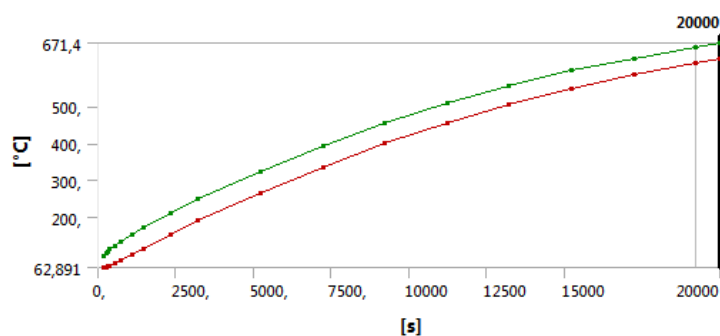


Рис. 4.График нагрева металла до достижения установившегося режима

Проверочный тепловой и электрический расчет осуществляется в программном пакете Mathcad. В табл.1 приведены результаты теплового расчета.

Таблица.1 Результаты расчета энергетических величин.

Полная мощность печи, кВт	17,37
Мощность, необходимая для нагрева металла, кВт	13,32
Мощность для нагрева вспомогательных изделий (стены и свод), кВт	1,32
Суммарные потери с наружной поверхности, кВт	2,72
Установленная мощность нагревателей, кВт	19,11
Мощность одного нагревателя, кВт	1,885
Тепловой КПД, о.е.	0,84

Для нагрева используется 11 нагревательных элементов. Тип нагревателей – карбидокремниевые, имеющие стержневую конструкцию.

Выводы: Применение программного пакета ANSYS Workbench и Mathcad предоставляет большие возможности для проектирования и исследования математических моделей. Полученные результаты позволили выбрать наиболее оптимальные характеристики и режим работы камерной печи сопротивления, учитывая распределение тепловых полей и возможные потери тепла.