

## **АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАГРЕВА ПОРОШКОВЫХ ОБРАЗЦОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

**О.Т. Данилова**

The method for mathematical description of the characteristics of high-frequency heating is developed.

Электромагнитные поля влияют на кинетику химических реакций и термодинамику фазовых превращений, изменяют скорость, выход и даже направление химической реакции, изменяют свойства обрабатываемых материалов. На основании обзора теории и методов электротермического нагрева разработан расчетный алгоритм, позволяющий получить информацию о характере тепловых, электромагнитных и иных параметров в системе при высокочастотном индукционном и диэлектрическом нагреве порошковых материалов. Алгоритм состоит из трех частей (блоков): тепловой, электрической, информационно-логической. В тепловом и электрическом блоках производится расчет соответствующих полей. Информационно-логический блок осуществляет ввод и вывод информации, а также взаимодействие остальных частей программы, определяемое конкретной структурой нагревателя и режимом его работы. Тепловой расчет выполняется конечно-разностным методом, а электрический – по методу численного расчета осесимметрических систем [1].

При организации алгоритма принято во внимание следующее: в отличие от индукционного нагрева металлов при диэлектрическом нагреве диэлектриков поверхностный эффект является вредным, так как приводит к неравномерному распределению температуры, которая не может выровняться из-за низкой теплопроводности диэлектриков. Во избежание заметных проявлений поверхностного эффекта надо выбирать частоту поля такой, чтобы глубина проникновения в 3-4 раза превосходила размеры нагреваемого образца. Так как нагреваемый образец имеет конечные размеры, то из-за отражения электромагнитных волн от границ образца внутри него устанавливаются стоячие волны подобно тому, что происходит в электрических цепях с распределенными параметрами. Это явление в сочетании с поверхностным эффектом может приводить к весьма сложной картине распределения поля по объему тела.

Особенностью индукционного ввода энергии является регулирование пространственного расположения зоны протекания вихревых токов. Во-первых, ви-

хревые токи протекают в пределах площади, охватываемой индуктором, нагревается только та часть образца, которая находится в магнитной связи с индуктором, независимо от размеров тела. Во-вторых, глубина зоны циркуляции вихревых токов и, следовательно, зоны выделения энергии зависит кроме других факторов от частоты тока индуктора (увеличивается при низких частотах и уменьшается с повышением частоты) [2]. Для расчета параметров процесса индукционного нагрева в зависимости от геометрических размеров образцов определяются: глубина проникновения тока в образец; оптимальная частота нагрева; время нагрева; реактивные и активные сопротивления; число и высота витков; удельная мощность.

Нижний и верхний пределы выбора частоты тока для индукционного нагрева образца диаметром  $d$  определяются соотношениями:

$$f_0 > \frac{3 \cdot 10^6 \rho}{(\mu d^2)}, \quad (1)$$

$$f_x < \frac{6 \cdot 10^6 \rho}{(\mu d^2)}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала;  $\rho$  – его удельное сопротивление.

Предельный электрический КПД индуктора определяется выражением [2]:

$$\eta_u = \frac{1}{1 + \frac{d}{gD} \sqrt{\frac{\rho_u}{\mu\rho}}}, \quad (3)$$

где  $g$  – коэффициент заполнения;  $\rho_u$  – удельное сопротивление материала индуктора;  $D$  – диаметр индуктора.

Внешнее емкостное сопротивление  $X_c = 1/\omega C_L$  (где  $C_L$  – внешняя, или, точнее, краевая емкость рабочего конденсатора) можно рассчитать, используя некоторые свойства электрического поля конденсатора и магнитного поля индуктора. Если рассмотреть схему замещения индуктора с нагреваемым образцом, основанную на общности потока замыкания, и схему замещения рабочего конденсатора (рис.1), то можно заметить полную аналогию.

Схема замещения индуктора по общему потоку получается из схемы замещения конденсатора путем замены всех его емкостей индуктивностями, и сопротивление  $r_1$  становится сопротивлением провода индуктора. Расчет сопротивления  $X_L$  (при диэлектрическом нагреве это внешнее сопротивление, при индукционном-индуктивное сопротивление обратного замыкания) основан на предположении, что внешнее магнитное поле индуктора с нагрузкой подобно полю пустого индуктора. Очевидно, справедливо и аналогичное утверждение: краевое электрическое поле конденсатора с нагрузкой подобно полю пустого конденсатора [3]. Отсюда следует способ расчета:



Рис. 1. Схемы замещения рабочего конденсатора и индуктора с нагреваемым образцом

$$C_L = C - C_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где  $C_{\text{ср}}$  – емкость средней части конденсатора с нагреваемым материалом;  $C$  – емкость пустого конденсатора.

Полная аналогия наблюдается и при расчете индуктора с нагрузкой:

$$R_a = r_1 + Lr_2 \approx Lr_2, \quad (5)$$

$$X_{\text{э}} = L[X_2 + X_s + \frac{r_r^2 + (X_r + X_s)}{X_L}], \quad (6)$$

где  $L$  – коэффициент приведенного активного сопротивления загрузки:

$$L = \frac{1}{(\frac{r_2}{X_s})^2 + (\frac{X_2 + X_s}{X_L})^2}. \quad (7)$$

При проведении расчетов следует принимать во внимание, что если обрабатываемые образцы являются полупроводниками различного типа, то можно ожидать, что высокочастотное электромагнитное поле окажется интенсификатором процесса восстановления. Поэтому необходимо учитывать дополнительную энергию, вносимую в реакционную зону путем преобразования электромагнитной энергии в тепловую, которая выделяется в результате перемагничивания и индуктивных потерь. Время нагрева образцов определялось по формуле [4]:

$$t_k = \frac{D^2}{4a} \cdot \frac{S(\alpha, 0) - (T_0/T_c)S(\alpha, 0)}{T_0/T_c - 1}, \quad (8)$$

где  $a$  – тепловой коэффициент для заданных температур;  $T_0, T_c$  – значения температур на поверхности и на оси образца соответственно;  $S(\alpha, 0), S(\alpha, 1)$  –

критерий Фурье. Расчеты показывают, что при индукционном нагреве оксидов железа при частоте 0,44 МГц резкое увеличение температуры как внутри образца, так и снаружи начинается с 230 – 250<sup>0</sup> С. Затем температура во внутренних и наружных слоях возрастает с разной интенсивностью. На этом этапе преобладают уже вихревые токи, которые на поверхности образца максимальны, что является проявлением скин-эффекта, который характеризуется глубиной проникновения ВЧП в слой материала  $\Delta=0,49 - 0,64$  м. Пределы изменения  $\Delta$  определяются температурой процесса 400 – 700<sup>0</sup>С. Если материал восстанавливается до железа, то глубина проникновения резко уменьшается до 0,003-0,006 м.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глуханов Н.П. *Физические основы высокочастотного нагрева*. Л.: Машиностроение, 1989. 460 с.
2. Нетушил А.В., Жуховицкий Б.Я., Кудин В.Н. *Высокочастотный нагрев в электрическом поле*. М.: Высшая школа, 1961. 146 с.
3. Донской А.В., Рамм Г.С., Вигдорович Ю.Б. *Высокочастотные электротермические установки с ламповыми генераторами*. Л.: Энергия, 1974. 208 с.
4. Александров В.И., Осико В.В., Татаринцев В.М. *Плавление тугоплавких диэлектрических материалов высокочастотным нагревом* // Приборы и техника эксперимента. 1970. N.5. С.222–226.