

## ПОПЕРЕЧНЫЙ КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

*Л.С. Зимин, А.М. Щелочкова*Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244*Анализируются краевые эффекты при индукционном нагреве тел прямоугольной формы.***Ключевые слова:** *краевой эффект, индуктор, сляб.*

В индукционном нагреве общеизвестно понятие «краевой эффект», под которым подразумевают ослабление напряженности магнитного поля на краях индуктора. Степень проявления этого эффекта зависит от соотношения размеров длины индуктора и его поперечного сечения, независимо от формы последнего. Краевой эффект является основной причиной неравномерности нагрева заготовок по длине. Отстроиться от этого явления в какой-то степени возможно при помощи выбора оптимальной величины заглубления торцов заготовок.

В то же время индукционный нагрев тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, например, прямоугольных, к которым в первую очередь относятся слябы, характеризуется явлением, которое не возникает в случае нагрева цилиндрических заготовок. Это явление заключается в неравномерности температурного поля по периметру заготовки даже в том случае, когда напряженность магнитного поля по всей поверхности поперечного сечения одинакова, как это имеет место при плоскопараллельном характере магнитного поля. По аналогии с неравномерностью магнитного поля по длине индуктора это явление называют «поперечный краевой эффект», а неравномерность поля по длине – «продольный краевой эффект», хотя эти эффекты имеют разную физическую основу. Причиной «поперечного краевого эффекта» является двумерный характер электромагнитного и температурного полей в поперечном сечении.

Принимая магнитное поле в первом приближении плоскопараллельным, можно для напряженности магнитного поля записать уравнение:

$$\frac{\partial^2 \dot{H}(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{H}(x, y)}{\partial y^2} = k^2 \dot{H}(x, y); \quad (1)$$

$$\dot{H}(x, y)|_L = H_0, \quad x \in [0, b], \quad y \in [0, d], \quad \dot{k} = \frac{1}{\Delta}(1 + j), \quad (2)$$

где  $b$  и  $d$  – половины сторон поперечного сечения сляба;  $\Delta$  – глубина проникновения тока.

Решая (1), (2) и учитывая, что

$$P(x, y, \xi, \beta) = \frac{1}{2} \gamma \left( \dot{E}_x E_x^* + \dot{E}_y E_y^* \right), \quad (3)$$

$$\dot{E}_x = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \dot{H}(x, y)}{\partial y}, \quad \dot{E}_y = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \dot{H}(x, y)}{\partial x}, \quad (4)$$

---

*Лев Сергеевич Зимин – д.т.н., профессор.*

*Александра Михайловна Щелочкова – магистрант.*

получаем мощность внутренних источников тепла:

$$P(x, y, \xi, \beta) = \frac{H_0^2}{\gamma \Delta^2} \times \frac{32}{\pi^2} \times \Psi, \quad (5)$$

где  $\xi = b/\Delta$ ,  $\beta = b/d$ ,  $\gamma$  – удельная электропроводность;  $\Psi$  – функция, зависящая от соотношения размеров поперечного сечения сляба и глубины проникновения.

Анализ распределения внутренних источников позволяет сделать вывод, что понятие глубины проникновения в трактовке для полуограниченного тела (по формуле Штейнметца) в данном случае не всегда применимо. Характер изменения плотности мощности зависит не только от  $\xi$ , но и от  $\beta$ .

С учётом (5) были проведены исследования температурных полей немагнитных слябов. Основной интерес представляет температурное поле в конечной, обычно квазистационарной, стадии нагрева.

Характерной особенностью, присущей индукционному нагреву тел прямоугольной формы, является наличие градиента температуры по периметру поперечного сечения, причем знак градиента зависит от соотношения размеров поперечного сечения и глубины проникновения. Таким образом, степень проявления поверхностного краевого эффекта и зависящая от него неравномерность температурного поля зависят от электрических и теплофизических свойств нагреваемого металла, размеров поперечного сечения, частоты тока индуктора и величины тепловых потерь.

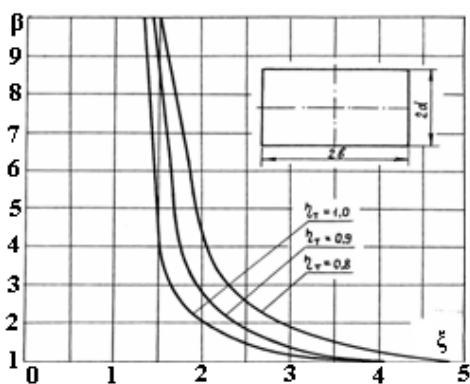


Рис. 1. Краевой поперечный эффект

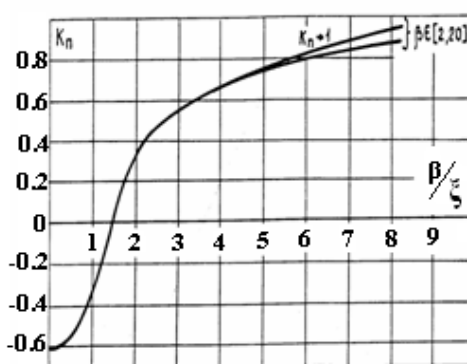


Рис. 2. Коэффициент  $k_n$

Наглядной иллюстрацией этого эффекта является график на рис. 1. На этом графике представлены зоны недогрева и перегрева углов по отношению к середине широкой стороны с учетом теплового к.п.д. ( $\eta_T$ ). Кривые на рис. 1 разделяют плоскость параметров нагреваемых заготовок на две зоны: слева от каждой кривой – зона недогрева ребер и углов, справа – перегрева. Тепловые потери будут всегда уменьшать нагрев ребер и углов или усугублять их недогрев. О степени проявления поперечного краевого эффекта можно судить по коэффициенту  $k_n$  (рис. 2). Значения этого коэффициента были получены при исследовании интегрального аналога вектора Пойтинга – поверхностной плотности мощности, без решения последующей тепловой задачи. Как видно на рис. 2, изменение  $\beta$  в широком диапазоне приводит лишь к незначительному разбросу характеристик (не более 3,6%) при больших отношениях  $\xi/\beta$ . При  $k_n = 0$  влияние краевых зон можно не учитывать, при  $k_n \geq 0$

будет положительный краевой эффект, при  $k_n \leq 0$  – отрицательный. Для всех практически возможных тепловых к.п.д. при  $\xi \leq 1$  углы будут недогреваться, а при  $\xi \geq 5$  – перегреваться.

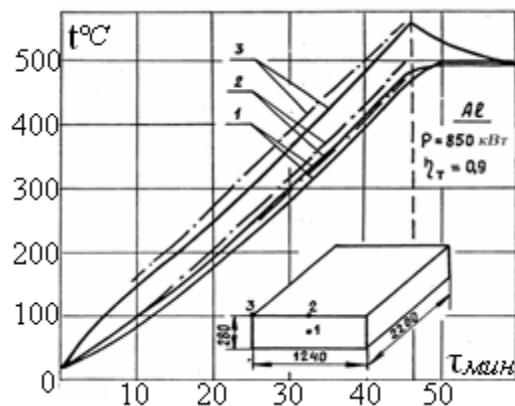


Рис. 3. Нагрев алюминиевого сляба

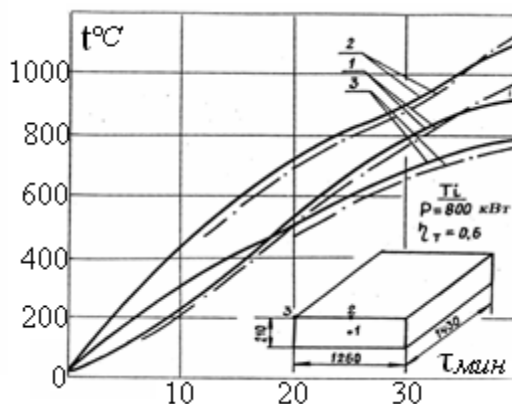


Рис. 4. Нагрев титанового сляба

Приведенные соотношения характерны для нагрева на частоте 50 Гц слябов промышленных габаритов из алюминиевых и титановых сплавов. Эти сплавы являются немагнитными, но резко отличаются по физическим параметрам:

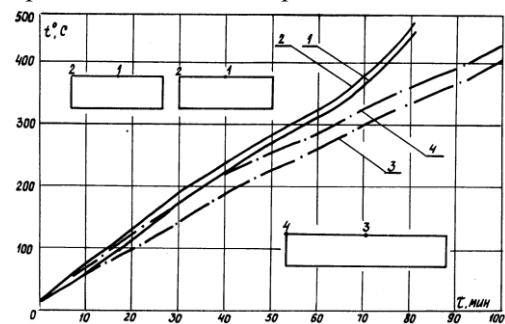


Рис. 5. Нагрев двух слябов

удельное электросопротивление титановых сплавов более чем в 20 раз превышает аналогичную константу для алюминиевых, а теплопроводность титановых, наоборот, в 10 раз меньше, чем у алюминиевых. Один из способов повышения равномерности нагрева по периметру прямоугольных заготовок заключается в нагреве двух и более заготовок в одном индукторе. На рис. 5 представлен сравнительный нагрев одного сляба (Д16 280×1400×1070 мм) и двух слябов (Д16 280×830×107 мм) в индукторе с внутренними размерами (по медной трубке) 420×1900×1200 мм. Несмотря на то, что в случае нагрева двух слябов общая ширина (1660 мм) и скорость нагрева выше, перепад температуры по периметру меньше.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2010 г.

UDC 621.785

## TRANSVERSE EDGE EFFECT DURING INDUCTION HEATING

*L.S. Zimin, A.M. Schelochkova*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*Analyzes the edge effects during induction heating of bodies of rectangular shape.*

**Keywords:** *edge effect, the inductor, slab.*

*Lev S. Zimin – Doctor of Technical Sciences, Professor.  
Alecsandra M. Shelochkova – Graduate student.*