

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 заглупления 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; Δ – 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 $\xi = b/\Delta$, $\beta = b/d$, γ – удельная электропроводность; Ψ – 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 ξ , но и от β .

С учётом (5) были проведены исследования температурных полей немагнитных слябов. Основным 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.

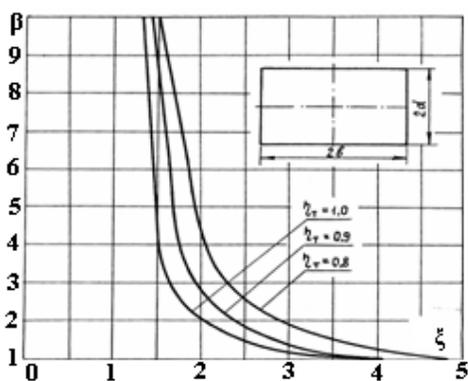


Рис. 1. Краевой поперечный эффект

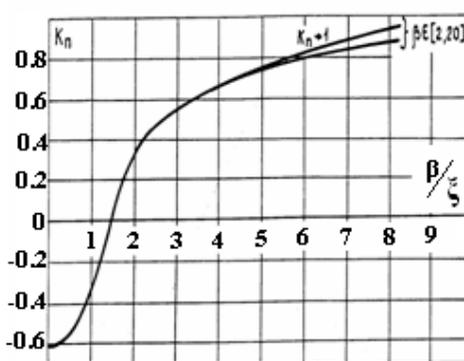


Рис. 2. Коэффициент k_n

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. (η_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 β в широком диапазоне приводит лишь к незначительному разбросу характеристик (не более 3,6%) при больших отношениях ξ/β . 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.

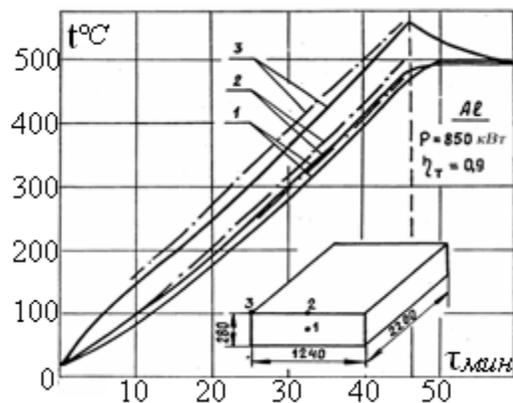


Рис. 3. Нагрев алюминиевого сляба

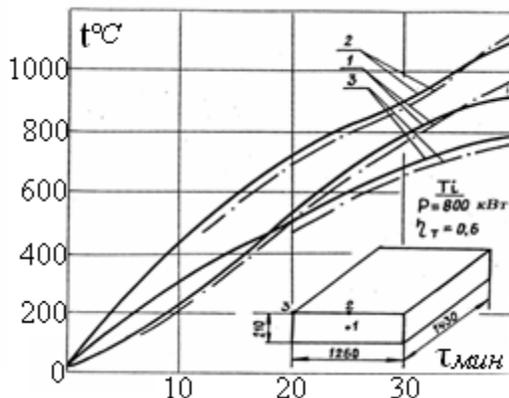


Рис. 4. Нагрев титанового сляба

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:

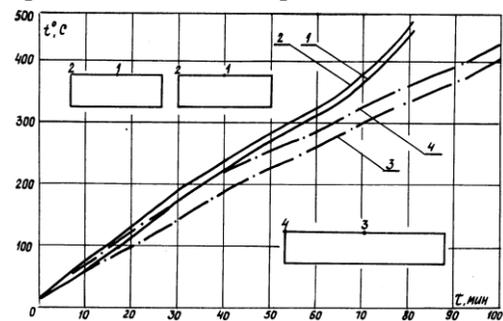


Рис. 5. Нагрев двух слябов

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.

Aleksandra M. Schelochkova – Graduate student.