

УДК 621.396.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЕТАЛЕЙ



**В.Л. Ланин**

*Профессор кафедры  
электронной техники и  
технологии, доктор  
технических наук*



**Е.С. Ратников**

*Магистрант кафедры электронной  
техники и технологии*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь  
E-mail: vlanin@bsuir.by, negfreak@gmail.com*

### **В.Л. Ланин**

*Имеет 30 летний опыт работы в области технологии сборки и монтажа электронной аппаратуры.  
Автор 10 монографий в данной области исследований.*

### **Е.С. Ратников**

*Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в 2019.  
Проводит научные исследования по технологии локальной индукционной пайки с микроконтроллерным управлением.*

**Аннотация.** Повышение эффективности индукционного нагрева деталей в воздушном зазоре магнитопровода связано с использованием поверхностных и краевых эффектов. С помощью моделирования в ANSYS Electromagnetics Suite 19.2. и экспериментальных исследований были выявлены закономерности краевого эффекта в нагреваемых деталях.

**Ключевые слова:** Индукционный нагрев, зазор магнитопровода, краевой эффект.

Индукционный нагрев деталей вихревыми токами широко используется в массовом производстве благодаря высокой скорости, локализации зоны селективного нагрева, использованию любой газообразной среды (вакуум, защитный газ, воздух), автоматизации процесса [1]. Для этого применяют соленоидные (кольцевые) индукторы с магнитным сердечником и без него. Выбор формы соленоида и магнитопровода зависит от геометрических размеров нагреваемых деталей, а также от их физических свойств. Индукторы соленоидного типа характеризуются значительным рассеянием магнитного потока, низким КПД (0,2–0,4), необходимостью электрической и тепловой изоляции от нагретых поверхностей деталей и водяного охлаждения во время работы. ВЧ источники энергии – генераторы 10–50 кВт имеют значительные весовые и габаритные характеристики, а также требуют принудительного воздушного или водяного охлаждения [2].

Шарики припоя на контактных площадках расплавляются посредством индукционного нагрева в кольцевом индукторе электромагнитного поля [3]. Расплавление припоя за счет селективного индукционного нагрева позволяет избежать негативных последствий, присущих традиционным методам. Перед индукционным нагревом шарики припоя Sn3,5Ag диаметром

0,76 мм закрепляются на контактных площадках платы из стеклотканевого ламината FR4 толщиной 0,4 мм.

Новым направлением в технике индукционного нагрева является использование магнитопровода с воздушным зазором, в котором размещаются нагреваемые детали (рисунок 1) [4]. Этот способ осуществления индукционного нагрева обладает всеми преимуществами первого, но лишен его недостатков. Существенное отличие заключается в наличии магнитного сердечника (ферритового магнитопровода), который позволяет электромагнитному полю индуктора концентрироваться в рабочем зазоре, где детали нагреваются. Рабочая обмотка подключена к ВЧ генератору. Обмотка подмагничивания служит для управления процессом индукционного нагрева. Изменяя ток в обмотке, можно изменить магнитную проницаемость магнитопровода, а, следовательно, и напряженность ВЧ-поля в зазоре магнитопровода [5].

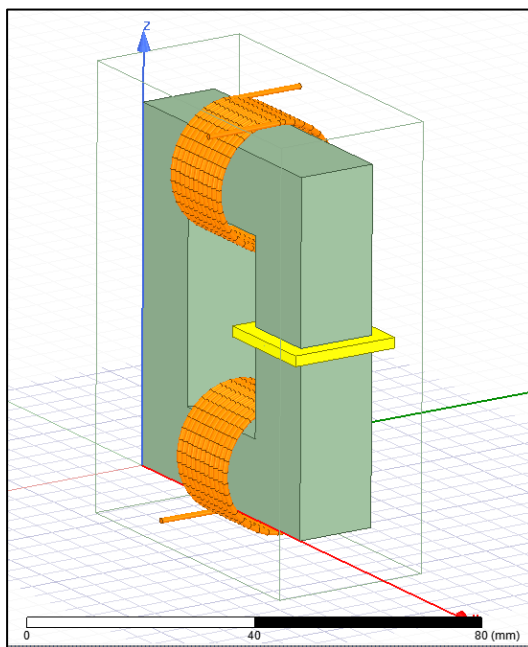


Рисунок 1. – Геометрическая модель устройства индукционного нагрева, подготовленная для моделирования в пакете ANSYS Electromagnetics Suite 19.2

Величина напряженности магнитного поля рассчитывается как [6]:

$$H = U_m / \mu_0 (4,44 \cdot S \cdot f \cdot W), \quad (1)$$

где  $U_m$  – амплитуда напряжения на обмотке,  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость,  $S$  – площадь зазора,  $f$  – частота тока,  $w$  – число витков.

Величина напряженности электрического поля в детали равна [7]:

$$\dot{E} = \frac{\rho \cdot \sqrt{-2 \cdot j}}{\Delta K} \cdot \dot{H} \cdot \frac{J_1(\sqrt{-j} \cdot m)}{J_0(\sqrt{-j} \cdot m4)}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала детали, Ом·м;  $\Delta K$  – горячая глубина проникновения тока в материал детали, м;  $H$  – напряженность магнитного поля на поверхности индуктора;  $A/m$ ,  $m$  – относительный радиус индуктора;  $m4$  – относительный

наружный радиус детали,  $J_0$  – символ функции Бесселя первого рода, нулевого порядка;  $J_1$  – символ функции Бесселя первого рода, первого порядка.

Плотность вихревого тока в детали составит:

$$\dot{E} = \frac{\sqrt{-2 \cdot j}}{\Delta K} \cdot H_{m3} \cdot \frac{J_1(\sqrt{-j} \cdot m)}{J_0(\sqrt{-j} \cdot m^4)}, \quad (3)$$

где  $\Delta K$  – глубина проникновения тока в материал детали, м,  $H_{m3}$  – напряженность магнитного поля на поверхности детали, А/м,  $m$  – относительный радиус индуктора,  $m_4$  – относительный наружный радиус детали.

Моделирование распределения плотности вихревых токов в деталях проводилось в ANSYS Electromagnetics Suite 19.2 с использованием геометрической модели устройства индукционного нагрева на магнитопроводе. В результате моделирования установлено неравномерное распределение вихревых токов в металлической части детали, находящейся в воздушном зазоре магнитопровода (рисунок 2,а). Максимальная абсолютная плотность тока (до  $5,6 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>) при 66 кГц отмечена на краях детали, а минимальная ( $8,6 \cdot 10^6$  А / м<sup>2</sup>) находится в центре зазора магнитопровода (рисунок 2,б).

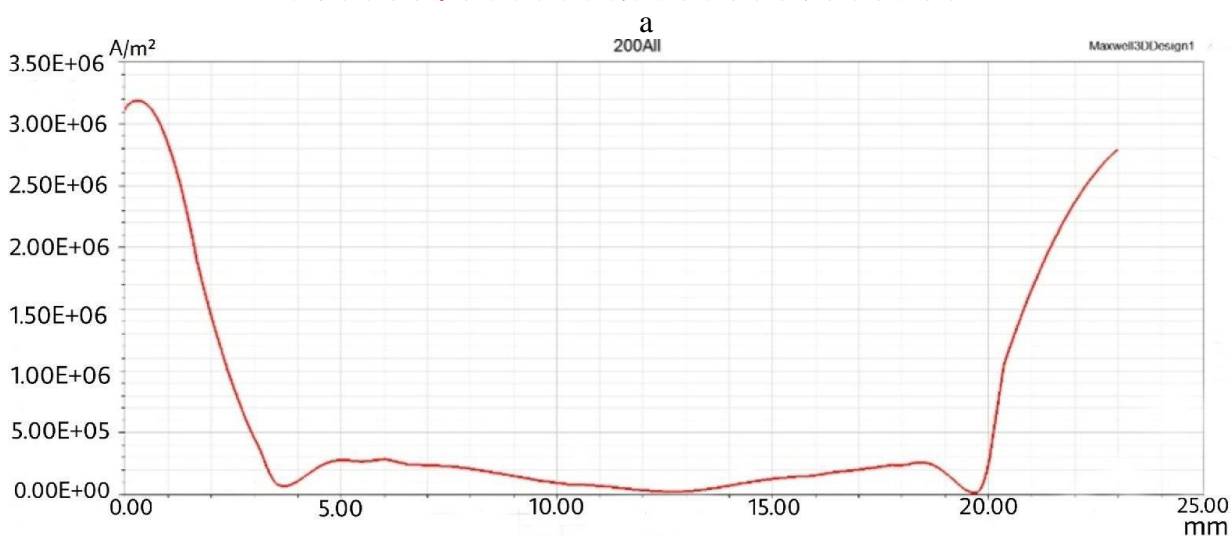
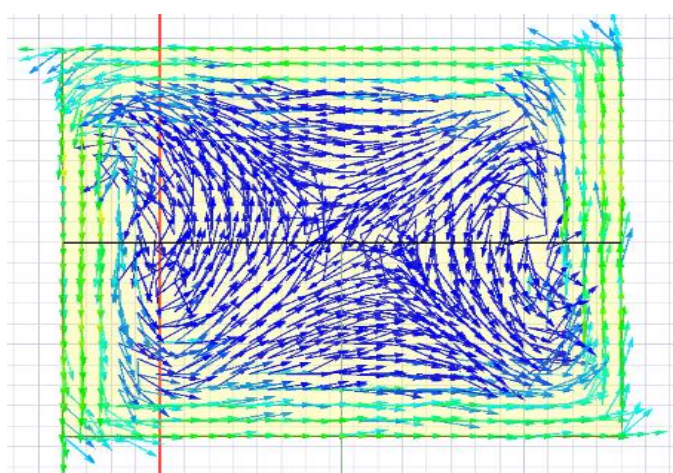


Рисунок 2. – Распределение векторов плотности тока (а) и график плотности тока (б)

В результате проявления краевого эффекта индукционного нагрева на кромках детали, подвергнутой индукционному нагреву в воздушном зазоре магнитной цепи, возникает неоднородность нагрева, которая зависит от мощности нагрева и удельного сопротивления материала детали. При частоте нагрева 66 кГц напряженность магнитного поля составляла  $4,5 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup>, а неоднородность поля – 1,3–1,4 относительно центра детали. В результате проявления краевого эффекта на краях детали, подвергаемой индукционному нагреву в воздушном зазоре магнитопровода, возникает разность потенциалов, которая зависит от мощности нагрева и от удельного сопротивления материала детали.

Благодаря результатам моделирования можно оценить влияние краевого эффекта при индукционном нагреве деталей, что позволит использовать данные результаты для совершенствования технологии индукционного нагрева.

Для пайки малогабаритных и миниатюрных деталей эффективен нагрев ВЧ электромагнитными колебаниями, локализованный в зазоре магнитопровода. Индукционные устройства на магнитопроводе способны с более высокой точностью поддерживать температуру нагрева деталей при высокой теплоотдаче в процессе пайки.

#### **Список литературы**

- [1] Induction Heating. Industrial Applications / Ed. by S. Lupi. Paris, U.I.E., 1992. –142 p.
- [2] Rudnev, V. Handbook of Induction Heating / V. Rudnev. N. Y.: Marcel Dekker, 2010.– 777 p.
- [3] Local Melt Process of Solder Bumping by Induction Heating Reflow / H. Xu [ and ets.] // Soldering @ Surface Mount Technology, 2009. – № 4. –P. 45–54.
- [4] Rumak, N.V. Economical non-contact heating with alternating magnetic field energy / N.V. Rumak, V.I. Lanin, I.N. Chernishevich // Vesci NAS Belarus. Ser. Fiz.-tehn. Nauk, 199– № 2 P. 94–96.
- [5] Lanin, V.L. Application of the Concentrated Power Streams in Electronics Industry / V.L. Lanin. Saarbrucken, Germany: Scholar's Press. 201 – 194 p.
- [6] Немков, В. С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В. С. Немков, В. Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 142 с.
- [7] Рогинская, Л.Э. Расчет параметров комплексной электротехнологической установки, включающей индукционный нагрев детали / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов // Современные проблемы образования и науки, 2012. –№ 6. – С. 120-126.

## **MODELLING OF INDUCTION HEATING IN AIR GAP OF MAGNETIC WIRE**

**V.L. LANIN**

*Doctor of Engineering Sciences  
Professor of department of the  
electronic equipment and  
technology of the BSUIR*

**E. S. RATNIKAU**

*Master student  
of department of the  
electronic equipment and  
technology of the BSUIR*

*Belarus State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus  
E-mail: vlanin@bsuir.by, negfreak@gmail.com*

**Abstract.** Improving the efficiency of induction heating of parts in the air gap of the magnetic circuit is associated with the use of surface and edge effects. Through modeling in ANSYS Electromagnetics Suite 19.2. and experimental studies identified patterns of edge effect in the heated parts.

**Keywords:** Induction heating, the gap of the magnetic circuit, edge effect.