

УДК 621.318.4

## ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ НЕМАГНИТНЫХ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ КРУГОВЫМ МНОГОВИТКОВЫМ СОЛЕНОИДОМ ДЛЯ РЕМОНТНЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ТРАНСПОРТЕ

**Щ.В. Аргун, доцент, к.т.н., О.С. Сабокар, преп. стажер,  
Д.А. Лисенко, студент, ХНАДУ**

***Аннотация.** Проведен теоретический анализ электромагнитных процессов в системе для индукционного нагрева, представленной плоским круговым многовитковым соленоидом, помещённым над плоскостью тонкостенного листового немагнитного металла. Получены расчетные зависимости для тока, индуцированного в металле листовой заготовки и коэффициента трансформации. Определен максимум коэффициента трансформации с учетом растекания вихревых токов.*

***Ключевые слова:** индукционный нагрев, индукторная система, индуцированный ток, электромагнитные процессы.*

## ИНДУКЦІЙНИЙ НАГРІВ НЕМАГНІТНИХ ЛИСТОВИХ МЕТАЛІВ КРУГОВИМ БАГОТОВИТКОВИМ СОЛЕНОЇДОМ ДЛЯ РЕМОНТНИХ ОПЕРАЦІЙ НА ТРАНСПОРТІ

**Щ.В. Аргун, доцент, к.т.н., О.С. Сабокар, викл. стажист,  
Д.А. Лисенко, студент, ХНАДУ**

***Анотація.** Проведено теоретичний аналіз електромагнітних процесів в системі для індукційного нагріву, яку представлена круговим плоским баготовитковим соленоїдом, що поміщено над площиною немагнітного тонкостінного листового металу. Отримано розрахункові залежності для струму, індукваного в металі листової заготовки і коефіцієнт трансформації. Визначено максимум коефіцієнта трансформації з урахуванням вихрових струмів, що розтікаються.*

***Ключові слова:** індукційний нагрів, індукторна система, індукований струм, електромагнітні процеси.*

## NONMAGNETIC SHEET METAL INDUCTION HEATING BY THE MULTICOIL CIRCULAR SOLENOID FOR THE VEHICLE SERVICE OPERATIONS

**Sch. Argun, assistant professor, cand. eng. sc., O. Sabokar, assistant of teacher,  
D. Lisenko, student, KhNAHU**

***Annotation.** The theoretical analysis of the electromagnetic process at the induction heating system, that consist of the circular flat multi coil solenoid that placed above the non magnetic thin walled sheet metal was performed. The calculation dependences for the inducted current in the sheetmetal sample and the transformation coefficient. The maximum of the transformation coefficient was defined according to the eddy currents dissipation.*

***Key words:** induction heating, inductor system, inducted current, electromagnetic process.*

### Введение

Индукционный нагрев (ИН) – это нагрев металлических объектов электрическими тока-

ми, которые индуцируются переменным магнитным полем индуктора (одно- или многовитковым соленоидом). Протекание вихревых токов сопровождается выделением тепла

(по закону Джоуля-Ленца), что приводит к разогреву металла [1]. Этот эффект нашёл применение в промышленности для выполнения целого ряда производственных операций, например, по закалке поверхностей металлических изделий, бесконтактному разогреву жидкостей, левитационной плавке металлов и др [2].

### Анализ публикаций

Среди последних работ, посвящённых ИН, следует отметить работы, где освещены процессы в инструментах метода – генераторах поперечного магнитного поля [3] и обобщены результаты комплексных исследований, представленных в российских и зарубежных литературных источниках, описаны методы расчёта интегральных характеристик процессов нагрева, а также результаты физических экспериментов на промышленных установках [4]. Интерес к ИН отмечается и в технологиях ремонта транспортных средств. Здесь с успехом разрабатываются производственные операции по съёму стёкол, очистке лакокрасочных покрытий, разъёму болтовых соединений, размягчению металлических покрытий кузовов перед рихтовкой вмятин и др. [5].

Идея использовать предварительный ИН в магнитно-импульсной обработке металлов была предложена ещё в 1984г. [6]. Авторами предложения была разработана и создана система, инициирующая протекание тока в обмотке рабочего инструмента до момента силового воздействия. Предварительный ИН позволял существенно повысить эффективность магнитно-импульсного деформирования в целом.

Следуя логике первого предложения авторов работы [6] можно ожидать позитивные результаты и при ИН в производственных операциях с магнитно-импульсным притяжением заданных участков тонкостенных металлов, конкретно, в операциях по внешней рихтовке кузовных элементов автомобилей [5,7].

Исходя из изложенного, следует, что ИН ферромагнетиков в поле плоского кругового многовиткового соленоида представляется весьма актуальной научно-технической задачей, которая затребована в производственных операциях по ремонту транспортных средств.

### Цель и постановка задачи

Теоретический анализ электромагнитных процессов в системе для индукционного нагрева, представленной плоским круговым многовитковым соленоидом, помещённым над плоскостью тонкостенного листового немагнитного металла.

### Электромагнитные процессы

При решении можно воспользоваться аналитическими зависимостями для индуцированных токов, полученными авторами работ [9, 10]. А расчётная модель в цилиндрической системе координат с направляющими ортами  $\vec{e}_r$ ,  $\vec{e}_\varphi$ ,  $\vec{e}_z$  представлена на рис. 1.

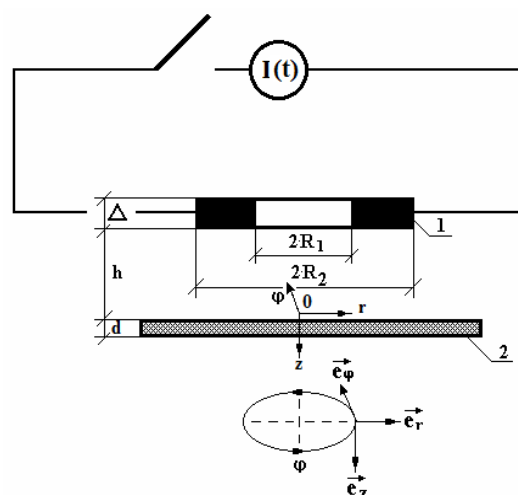


Рис.1. Расчётная модель системы «индуктор–заготовка»:  $I(t)$  - источник переменного тока; 1 – многовитковый соленоид; 2 – плоская листовая заготовка

Принятые допущения.

1. Система обладает аксиальной симметрией, так что  $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$  ( $\varphi$  – полярный угол).
2. Индуктор – плоская многовитковая катушка (число витков  $w$ ), толщина которой достаточно мала и её металл настолько "прозрачен" для действующих полей ( $\Delta \rightarrow 0$ ), что не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы.
3. В индукторе течёт гармонический ток  $I(t)$ , временные параметры которого таковы, что в расчётах вполне приемлемо известное условие квазистационарности протекающих электромагнитных процессов, так что  $\frac{\omega}{c} \cdot \ell \ll 1$

(здесь  $\omega$  – циклическая частота процесса,  $c$  – скорость света в вакууме,  $l$  – наибольший характерный геометрический размер системы).

4. Радиальная протяжённость листовой заготовки достаточно велика, так что  $d / R_{1,2} \ll 1$

, где  $d$  – толщина металла,  $R_{1,2}$  – внутренний и внешний радиусы индуктора.

Результаты цитируемых работ [9, 10], где исследованы электромагнитные процессы в системе, аналогичной рассматриваемой, но с одновитковым индуктором, перепишем в виде, удобном для проведения численных оценок.

$$J_{\varphi}(r, t) = 4 \cdot j_m \int_0^{\infty} f(x) \cdot x^2 \cdot e^{-x \frac{h}{d}} J_1 \left( x \frac{r}{d} \right) \times \\ \times \sum_{k=0}^{\infty} a(k) \frac{F_k(x, \beta_k)}{\Phi_k(x)} \frac{dj(t)}{dt} * e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{\tau} t} dx, \quad (1)$$

где  $j_m = I_m \cdot w / (R_2 - R_1)$ ,  $I_m$  – амплитуда возбуждающего тока,  $w$  – число витков,  $R_{1,2}$  – внутренний и внешний радиусы обмотки,  $j(t)$  – временная зависимость тока индуктора,  $t$  – время,

$$a(k) = \begin{cases} 0,5, & k = 0; \\ 1,0, & k \neq 0; \end{cases}$$

$$f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \cdot \frac{R_1}{d}}^{x \cdot \frac{R_2}{d}} f(y) \cdot y \cdot J_1(y) dy,$$

$f(y)$  – функция, описывающая радиальное распределение плотности тока в индукторе,  $\beta_k$  – корни уравнения:

$$\left( 1 - \left( \frac{\beta_k}{\lambda \cdot d} \right)^2 \right) \cdot \sin(\beta_k) + 2 \left( \frac{\beta_k}{\lambda \cdot d} \right) \cdot \cos(\beta_k) = 0,$$

$$F_k(x) = (1 - \cos(\beta_k)) + \frac{\beta_k}{x} \cdot \sin(\beta_k),$$

$$\Phi_k(x) = \cos(\beta_k) \cdot [x^2 + 2x - \beta_k^2] - \\ - 2 \cdot \beta_k \cdot \sin(\beta_k) \cdot [1 + x]$$

С учётом конкретики решаемой задачи и в

соответствии с принятыми допущениями выражение (1) перепишется в виде:

$$J_{\varphi}(r, \varphi) = 4 j_m \int_0^{\infty} f(x) x^2 e^{-x \frac{h}{d}} J_1 \left( x \frac{r}{d} \right) \times$$

$$\times \sum_{k=0}^{\infty} a(k) \frac{F_k(x, \beta_k)}{\Phi_k(x)} (\cos \varphi * e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{\omega \tau} \varphi}) dx, \quad (2)$$

где  $f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \cdot \frac{R_1}{d}}^{x \cdot \frac{R_2}{d}} y \cdot J_1(y) dy$  – соответствующее

равномерному распределению плотности тока в индукторе;

$(\cos \varphi * e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{\omega \tau} \varphi})$  – свёртка функций, соответствует гармонической временной зависимости возбуждающего тока;

$j(t) = \sin(\varphi)$  ( $\varphi = \omega \cdot t$  – фаза сигнала),

$$\left( \cos \varphi * e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{\omega \tau} \varphi} \right) = \int_0^{\varphi} \cos(\eta) \cdot e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{\omega \tau} (\varphi - \eta)} d\eta;$$

$\tau = \mu_0 \gamma d^2$  – характерное время проникновения поля в проводящий слой с удельной электропроводностью  $\gamma$  и толщиной  $d$ .

Интегрируя выражение (2) по  $r \in [0; R]$ , находим величину тока, индуцированного в металле листовой заготовки в круге радиуса  $R$ .

$$I_{\varphi}(r \leq R, \varphi) = \left( I_m \cdot \frac{4 \cdot d \cdot w}{(R_2 - R_1)} \right) \times$$

$$\times \int_0^{\infty} f(x) \cdot x \cdot e^{-x \frac{h}{d}} \cdot \left( 1 - J_0 \left( x \frac{R}{d} \right) \right) \times$$

$$\times \sum_{k=0}^{\infty} a(k) \cdot \frac{F_k(x, \beta_k)}{\Phi_k(x)} \cdot (\cos \varphi * e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{\omega \tau} \varphi}) dx. \quad (3)$$

Коэффициент трансформации определяется как отношение амплитуд возбуждающего тока и тока, индуцированного в заготовке в

круге радиуса  $R$  (область:  $r \leq R$ ).

$$K(R, \varphi) = \frac{J_{\varphi \max}(R)}{I_m} = \left( \frac{4 \cdot d \cdot w}{(R_2 - R_1)} \right) \times \\ \times \int_0^{\infty} f(x) \cdot x \cdot e^{-x \frac{h}{d}} \cdot \left( 1 - J_0 \left( x \frac{R}{d} \right) \right) \times \\ \times \sum_{k=0}^{\infty} a(k) \cdot \frac{F_k(x, \beta_k)}{\Phi_k(x)} \left( \cos \varphi * e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{\omega \tau} \varphi} \right) dx. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что коэффициент трансформации по току прямо пропорционален количеству витков первичной обмотки, толщине листового металла и радиусу круговой зоны, в которой рассматривается возбуждение вихревых токов.

Варьирование вышеперечисленных параметров позволяет усилить электромагнитную связь между возбуждаемым и индуцируемым сигналами и повысить тем самым уровень трансформации энергии в металл листовой заготовки.

Максимум коэффициента трансформации имеет место при  $R \rightarrow \infty$ , учитывающем растекание вихревых токов по всей площади листового металла.

Из выражения (4) получаем, что

$$K_{\max} = \frac{J_{\varphi \max}(R \rightarrow \infty)}{I_m} = \left( \frac{4 \cdot d \cdot w}{(R_2 - R_1)} \right) \int_0^{\infty} f(x) x e^{-x \frac{h}{d}} \times \\ \times \sum_{k=0}^{\infty} a(k) \cdot \frac{F_k(x, \beta_k)}{\Phi_k(x)} \left( \cos \varphi * e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{\omega \tau} \varphi} \right) dx. \quad (5)$$

Формулы (2)–(5) представляют собой соотношения, позволяющие выполнить все необходимые численные оценки характеристик процессов в исследуемой системе «индуктор – листовая заготовка» с учётом всех особенностей, обусловленных процессами проникновения поля при ИН тонкостенных металлов для ремонтных операций на транспорте.

## Выводы

Основные результаты теоретического анализа показателей процесса индукционного нагрева немагнитных листовых металлов в зависимости от их удельной электропроводности и временных характеристик тока в обмотке плоского многовиткового индуктора сводятся к следующим положениям.

Коэффициент трансформации в исследованной системе устанавливается соотношением величины эффективной глубины проникновения поля в проводник и его толщины, определяющей степень рассеяния или концентрации электромагнитной энергии в какой-то части металла листового образца.

Максимум коэффициента трансформации тока соответствует рабочим частотам тока в индукторе, определяемым из соотношения:  $f_{\max} \approx 1/\pi \cdot (d^2 \cdot \mu_0 \cdot \gamma)$ , где  $d$  – толщина,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\gamma$  – удельная электропроводность.

Полученные математические выражения позволяют выполнить все необходимые численные оценки характеристик процессов при индукционном нагреве плоским круговым соленоидом, как инструментом для соответствующих ремонтных операций.

## Литература

1. Handbook of Physics / Benenson W., Harris J. W., Stöcker H., Lutz H. – New York : Springer, 2002. – 1186 p. ISBN 978-0-378-95269-7.
2. Handbook of Induction Heating Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond L. Cook, Michah Black – New York : Springer, 2002. – 796 p. ISBN 978-0-824-70848-1.
3. Elements of induction heating : design, control, and applications / Zinn S., Semiatin S.L. – ASM International, 1988. – 335 p. ISBN: 0871703084 / 9780871703088.
4. Frank W Curtis High Frequency Induction Heating / Lindsay Publications Inc, 1987. ISBN-10: 0917914716; ISBN: 978-0917914713
5. Welcome to BETAG Innovation [Электронный ресурс] – 2015. – Режим доступа: [www.beulentechnik.com](http://www.beulentechnik.com)
6. Белый И.В. Деформирование металлов импульсным электромагнитным полем с предварительным индукционным нагре-

- вом заготовок / И.В. Белый, Л.Д. Горкин, Л.Т. Хименко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. – №7. – С. 6-8.
7. Batygin Yu. V. Basic diagram and practical algorithm removing dents on the body of vehicle by the pulsed electromagnetic attraction / Yuri V. Batygin, Andrey V. Gnatov // International Journal Of Engineering Sciences & Management / Int. J. of Engg. Sci. & Mgmt. (IJESM), Vol. 5, Issue 1:Jan.-Mar.: 2015, 47-51.
8. Batygin Yuri V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications / Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2013. – № 213 (3). – P. 444–452.
9. Batygin Yuri V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – Volume 214. – Issue 2. – 2014. – P. 390-401.
10. Гнатов А. В. Прогрессивные технологии. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А. В. Гнатов, Ю. В. Батыгин, А. Н. Туренко,. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 238 с.

Рецензент: А.В. Гнатов, доцент, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 19 октября 2015 г.