

МЕХАТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.318.4

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ПЛОСКИМ КРУГОВЫМ МНОГОВИТКОВЫМ СОЛЕНОИДОМ

А.В. Гнатов, проф., д.т.н., Щ.В. Аргун, доц., к.т.н.,
Е.А. Чаплыгин, доц., к.т.н., О.С. Сабокар, ассист.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Проведен анализ и численные оценки электромагнитных и тепловых процессов в системе индукционного нагрева с плоским круговым многovitковым соленоидом. Получены расчетные соотношения для тока и коэффициента трансформации. Определен максимум коэффициента трансформации и время нагрева.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индукторная система, индуцированный ток, электромагнитные процессы, вихревые токи, нагрев металла.

ИНДУКЦІЙНЕ НАГРІВАННЯ ФЕРРОМАГНЕТИКІВ ПЛОСКИМ КРУГОВИМ БАГАТОВИТКОВИМ СОЛЕНОІДОМ

А. В. Гнатов, проф., д.т.н., Щ. В. Аргун, доц., к.т.н.,
Є. О. Чаплигін, доц., к.т.н., О. С. Сабокар, асист.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Проведено аналіз і чисельні оцінки електромагнітних і теплових процесів у системі індукційного нагріву з плоским круговим багатovitковим соленоїдом. Отримано розрахункові співвідношення для струму і коефіцієнта трансформації. Визначено максимум коефіцієнта трансформації і час нагрівання.

Ключові слова: індукційний нагрів, індукторна система, індукований струм, електромагнітні процеси, вихрові струми, нагрівання металу.

INDUCTION HEATING OF FERROMAGNETS BY PLANE CIRCULAR MULTITURN SOLENOID

A. Gnatov, Prof., D. Sc. (Eng.), Sch. Argun, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),
Ye. Chaplyhin, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.), O. Sabokar, T. Asst.,
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. Analysis and numerical estimation of electromagnetic and thermal processes in the induction heating system with a flat circular multiturn solenoid is carried out. The calculated dependences for the current and the transformation ratio is obtained. The maximum ratio of transformations and heating time is determined.

Key words: induction heating, induction system, induced current and electromagnetic processes, eddy current, heating of metal.

Введение

Индукционный нагрев (ИН) – метод бесконтактного нагрева электропроводящих материалов токами высокой частоты. Одним из

основных элементов в системе ИН является индуктор, обеспечивающий наведение индуцированного тока в объекте обработки. Этот эффект нашёл применение в промышленности для выполнения ряда производственных

операций, например, по закалке поверхностей металлических изделий, бесконтактно-му разогреву жидкостей, левитационной плавке металлов и др. [1–3].

Анализ публикаций

В последнее время ИН все чаще применяются в методах и способах ремонта транспортнх средств. Например, операции по съёму стёкол, очистке лакокрасочных покрытий, разьёму болтовых соединений, размягчению металлических покрытий кузовов перед рихтовкой вмятин и др. [4, 5].

В работе [6] авторами предложена система, которая обеспечивает предварительное протекание тока в обмотке рабочего инструмента перед самым процессом магнитно-импульсного силового воздействия. Такой предварительный ИН позволял существенно повысить эффективность магнитно-импульсной обработки металлов.

Однако на данный момент остаются не раскрыты многие вопросы ИН, особенно это касается его практического применения для ремонтных технологий в автотранспорте. Например, процессы возбуждения вихревых токов и индукционного нагрева в ферромагнетиках будут отличны от аналогичных процессов в немагнитных металлах со всеми вытекающими последствиями. Следовательно, создание реальных систем требует количественной оценки влияния магнитных свойств металла на характеристики ИН.

Среди последних научных публикаций на эту тему можно отметить работу [7], где критерием эффективности является плотность активной мощности, выделяемой у поверхности металла за период действующего поля, изменяющегося во времени по гармоническому закону. В рамках принятой идеализированной модели авторами получено, что глубокое насыщение позволяет увеличить отдельные показатели индукционного нагрева достаточно массивного ферромагнетика.

Цель и постановка задачи

Анализ протекания электромагнитных и тепловых процессов в системе индукционного нагрева с плоским круговым многовитковым соленоидом, помещённым над плоскостью тонкостенного листового ферромагнетика. Оценка влияния относительной магнитной

проницаемости металла на процесс его индукционного нагрева.

Ферромагнетики, особенности протекающих процессов

При решении можно воспользоваться аналитическими зависимостями для индуцированных токов в тонкостенных листовых ферромагнетиках, полученными авторами работ [8, 9].

Для понимания границ достоверности последующих вычислений приведём основные положения физико-математической постановки задачи.

Расчётная модель – та же, что и с немагнитным металлом в цилиндрической системе координат с направляющими ортами $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ представлена на рис.1.

Принятые допущения.

– Листовая заготовка является достаточно тонкостенной, а её радиальная протяжённость также достаточно велика, то есть

$\frac{d}{R_{1,2}} \ll 1$, где d – удельная электропровод-

ность и толщина заготовки, $R_{1,2}$ – внутренний и внешний радиусы индуктора.

– Виток индуктора достаточно тонок и "прозрачен" для действующих полей ($\Delta \rightarrow 0$), так что его металл не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы.

– В индукторе течёт ток $I(t)$, временные параметры которого таковы, что в расчётах вполне приемлемо известное условие квазистационарности происходящих электромаг-

нитных процессов, так что $\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1$ (здесь ω

– циклическая частота процесса, c – скорость света в вакууме, l – характерный наибольший геометрический размер системы).

– Система обладает аксиальной симметрией, так что $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$ (φ – полярный угол).

Магнитная проницаемость металла листовой заготовки постоянна и равна μ_1 , $\mu_1 = \mu_0 \cdot \mu_\gamma$, μ_0 и μ_γ – магнитная проницаемость вакуума и относительная магнитная проницаемость металла соответственно.

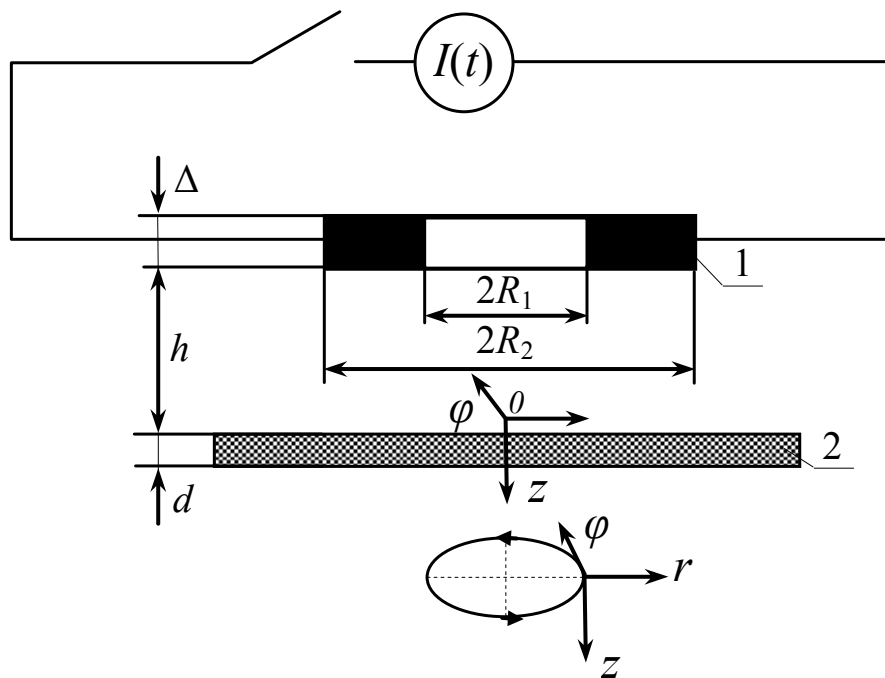


Рис.1. Расчётная модель системы «индуктор-заготовка», $I(t)$ – источник переменного тока: 1 – многовитковый соленоид; 2 – плоский листовой ферромагнетик

Достоверность вычислений определяется уровнем вариации значения относительной магнитной проницаемости μ_r в течение рассматриваемого процесса. Безусловным является и то, что реально эта характеристика ферромагнетика будет изменяться в интервале от единицы до своего максимального значения, много большего единицы. Но, если посмотреть на типичные зависимости магнитной проницаемости различных сталей от напряжённости поля из фундаментальной монографии Я. Туровского [10], то можно указать, что для $H_m > 10^4$ А/м изменение этой характеристики металла, определяемого величиной производной $\frac{d\mu_r(H)}{dH} \rightarrow 0$, будет достаточно малым. В данном диапазоне амплитуд действующего поля можно положить, что $\mu_r = \text{const}$.

Следует отметить, что допущение о постоянстве магнитной проницаемости ферромагнетиков не является новым. Разными авторами в разное время оно неоднократно использовалось в теоретических исследованиях электромагнитных процессов, например, [8–11].

Результаты цитируемых работ [8, 9], где исследована система, аналогичная рассматриваемой, но с одновитковым индуктором, перепишем в виде, удобном для проведения численных оценок.

Окончательное выражение для определения величины тока, индуцированного в металле листовой заготовки в круге радиуса R .

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

где $j_m = \frac{I_m \cdot w}{(R_2 - R_1)}$; I_m – амплитуда тока в индукторе; w – число витков в обмотке;

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

$$a(k) = \begin{cases} 0,5; & k = 0, \\ 1,0; & k = 1, 2, \dots \end{cases}; \quad \beta_k - \text{корни урав-}$$

нения: $\text{tg } \beta_k \left(\frac{\beta_k}{(\mu_r \cdot x)} - \frac{(\mu_r \cdot x)}{\beta_k} \right) = 2;$

$$F_k(\beta_k) = \left[(1 - \cos \beta_k) + \frac{\beta_k}{(\mu_r \cdot x)} \sin \beta_k \right];$$

$$\Phi_k((\mu_r \cdot x), \beta_k) = \cos \beta_k \times \\ \times \left[(\mu_r \cdot x)^2 + 2(\mu_r \cdot x) - \beta_k^2 \right] -;$$

$$-2\beta_k \sin \beta_k \cdot [1 + (\mu_r \cdot x)]$$

$$\varphi = \omega \cdot t - \text{фаза сигнала};$$

$\tau = (\mu_0 \cdot \mu_r) \gamma d^2$ – характерное время проникновения поля в проводящий слой с удельной электропроводностью γ , относительной магнитной проницаемостью μ_r и толщиной d .

Коэффициент трансформации определяется как отношение амплитуд возбуждающего тока и тока, индуцированного в заготовке в круге радиуса R (область: $r \leq R$).

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

Из выражения (2) получаем, что

$$K_{\max} = \frac{J_{\varphi \max}(R \rightarrow \infty)}{I_m} = \\ = \left(\mu_r \cdot \frac{4 \cdot d \cdot w}{(R_2 - R_1)} \right) \int_0^{\infty} f(x) x \cdot e^{-x \frac{h}{d}} \times \\ \times \sum_{k=0}^{\infty} a(k) \cdot \frac{F_k(\beta_k)}{\Phi_k((\mu_r \cdot x), \beta_k)} \times \\ \times \left(\cos \varphi * e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} \varphi} \right) dx. \quad (3)$$

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

Температурные показатели

Рассматривается нагрев кругового участка листового образца непосредственно под обмоткой индуктора радиуса R_2 , толщиной d из металла с удельной электропроводностью γ и плотностью ρ при протекании тока с плотностью $J_{\varphi}(\varphi)$.

Зависимость для температуры нагрева рассматриваемой круговой области листового металла за время, соответствующее фазовому промежутку $\Delta\varphi$

$$\Delta T^o = \frac{1}{(M \cdot C \cdot \gamma \cdot d \cdot \omega)} \cdot \int_0^{\Delta\varphi} \left(\overline{J_{\varphi}(\varphi)} \right)^2 \cdot d\varphi, \quad (4)$$

где M – масса пластины, $M = \rho \cdot \pi \cdot R_2^2$; C – удельная теплоёмкость металла пластины.

Формула (4) для температуры нагрева круговой области листового металла с внешним радиусом R за временной интервал Δt может содержать зависимость от магнитной проницаемости только в выражении для линейной плотности индуцированного тока под знаком двойного интеграла.

С учётом данного замечания она приемлема для расчёта температуры индукционного нагрева круговой области листового ферромагнетика. В терминах «относительной температуры нагрева» – $\Delta T_{\text{отн}}^o = \frac{\Delta T^o}{(I_m \cdot w)^2}$ эта

формула запишется в виде:

$$\Delta T_{\text{отн}}^o = \frac{1}{(M \cdot C \cdot \gamma \cdot d \cdot \omega)} \times \\ \times \int_0^{\Delta\varphi} \left(\overline{J_{\varphi-\text{отн}}(\varphi)} \right)^2 d\varphi, \quad (5)$$

где $\overline{J_{\varphi-\text{отн}}(\varphi)} = \frac{J_{\varphi}(\varphi)}{(I_m \cdot w)}$ – «относительная

плотность усреднённой величины возбуждаемого тока» (имеется ввиду усреднение по радиальному и поперечному размеру области нагреваемого образца).

Следует отметить, что формула (5) интегральным образом учитывает влияние осо-

бенностей скин-эффекта на температурные показатели индукционного нагрева, то есть не только проводящих, но магнитных свойств металла заготовки.

Для проведения численных оценок соотношение (5) необходимо дополнить выражением для величины возбуждаемого тока, усреднённой по толщине листа d и радиусу R_2 (область под индуктором), которое можно получить из зависимости (1).

$$\begin{aligned} \overline{J_\varphi(r \leq R, \varphi)} = & 4 \left((I_m \cdot w) \cdot \frac{\mu_r \cdot d}{(R_2 - R_1)} \right) \times \\ & \times \int_0^\infty f(x) \cdot e^{-x \cdot \frac{h}{d}} \cdot x \cdot \left(1 - J_0 \left(x \cdot \frac{R_2}{d} \right) \right) \times \\ & \times a(k) \cdot \frac{F_k(\beta_k)}{\Phi_k((\mu_r \cdot x), \beta_k)} \times \\ & \times \sum_{k=0}^\infty \times \left(\cos \varphi * e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} \varphi} \right) \cdot dx. \quad (6) \end{aligned}$$

Реальная температура нагрева круговой области листового ферромагнетика с внешним радиусом R за временной интервал Δt будет равна:

$$\Delta T^o = \Delta T_{отн}^o \cdot (I_m \cdot w)^2. \quad (7)$$

Формулы (5)–(7) 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 индукционном нагреве тонкостенных ферромагнетиков.

Численные оценки

Вычисления проведём для следующих исходных данных: число витков в обмотке индуктора $w=20$, его радиальные размеры $R_1=0,0025$ м и $R_2=0,225$ м (поперечный размер обмотки, соответствующей размеру рабочей зоны $\varnothing 40$ мм), толщина листовой заготовки $d=0,001$ м, зазор между плоскостью индуктора и заготовки $h=0,001$ м, удельная электропроводность стальной заготовки $\gamma_{St} \approx 0,4 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м). Относительная магнитная проницаемость принимает значения

из интервала $\mu_r \in [200; 500]$, соответствующие $H > 10^3 \div 10^4$ А/м для многих сортов стали [10]. Как показывают грубые оценки с помощью закона полного тока, данному диапазону значений напряжённости соответствуют, например, токи ~ 5 А и выше в обмотке индуктора из провода толщиной ~ 1 мм. Рабочая частота гармонического тока в индукторе ~ 25000 Гц.

Вычисления характеристик исследуемых процессов проводились с помощью стандартного программного пакета «Mathematica 5.1».

Как показали численные оценки, для принятой геометрии индуктора при $(\mu_r \cdot x) \gg 1$ корни уравнения β_k в выражении (1) можно аппроксимировать зависимостью:

$$\beta_k \approx \pi \left(k + \left(1 - \frac{2}{(\mu_r \cdot x)} \right) \right).$$

Основные результаты вычислений для принятых параметров рассматриваемой системы индукционного нагрева листовых ферромагнетиков сведены в табл. 1.

Таблица 1 Основные результаты вычислений системы индукционного нагрева листовых ферромагнетиков

| № п/п | μ_r | $\frac{\Delta}{d}$ | $K(r \leq R_2, \varphi_{\max})$ | Δt_{100}^o , мин. |
|-------|---------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 1. | 200 | 0,12 | 15,0 | 4,6 |
| 2. | 350 | 0,085 | 9,57 | 11,5 |
| 3. | 500 | 0,071 | 7,53 | 18,08 |

где μ_r – относительная магнитная проницаемость; $\frac{\Delta}{d}$ – отношение величины скин-слоя к толщине заготовки; $K(r \leq R_2, \varphi_{\max})$ – коэффициент трансформации для круговой области под обмоткой индуктора в максимуме по фазе; Δt_{100}^o – время нагрева до 100^o С при токе индуктора ~ 10 А.

Проведенные численные оценки и данные табл. 1 показывают, что:

– с увеличением относительной магнитной проницаемости $\mu_r=200-500$, то есть при приближении к состоянию насыщения ферромагнетика падает эффективность передачи энергии от индуктора в металл заготовки и

растёт время её нагрева до заданного уровня температур;

- удаление от состояния насыщения за счёт уменьшения тока в индукторе или снижения его рабочей частоты позволяет улучшить показатели процесса индукционного нагрева в целом;
- наиболее приемлемым и эффективным режимом индукционного нагрева тонкостенного листового ферромагнетика представляется режим, в котором величина скин-слоя приближается к толщине листа, то есть $\Delta/d \rightarrow 1$.

Выводы

Основные результаты проведенных оценок сводятся к следующим положениям.

1. Проведен анализ протекания электромагнитных и тепловых процессов в системе индукционного нагрева с плоским круговым многовитковым соленоидом, помещёно над плоскостью тонкостенного листового ферромагнетика.
2. Выполнена оценка влияния относительной магнитной проницаемости металла на процесс его индукционного нагрева. Показано, что с увеличением относительной магнитной проницаемости снижается величина коэффициента трансформации тока и растёт время нагрева ферромагнетика до заданного уровня температур.
3. Наиболее приемлемым и эффективным режимом индукционного нагрева тонкостенного листового ферромагнетика представляется режим, в котором величина скин-слоя приближается к толщине листа металла.

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, Micah Black – New York : Springer, 2002. – 796 p. ISBN 978-0-824-70848-1.

3. Сидоренко В.Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении / Сидоренко В. Д. – Л. : Машиностроение, 1980. – 231 с.
4. Welcome to BETAG Innovation [Электронный ресурс] – 2015. – Режим доступа: www.beulentechnik.com.
5. Лаборатория электромагнитных технологий [Электронный ресурс] – 2015. – Режим доступа: <http://electromagnetic.comoj.com>
6. Белый И. В. Деформирование металлов импульсным электромагнитным полем с предварительным индукционным нагревом заготовок / И. В. Белый, Л. Д. Горкин, Л. Т. Хименко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. – №7. – С. 6–8.
7. Сысун В. И. Индукционный нагрев в режиме насыщения / В. И. Сысун, В. А. Подопригора // Фундаментальные исследования. – 2004. – №3. – С. 132–134.
8. Батыгин Ю. В. Магнитно-импульсное притяжение/отталкивание тонкостенных листовых ферромагнетиков / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, // Электричество. – 2012. – № 8. – С. 58–65.
9. 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.
10. Туровский Я. Техническая электродинамика / Туровский Я. – М.: Энергия, 1974. – 488 с.
11. Кувалдин А. Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали / А. Б. Кувалдин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.

Рецензент: Ю.В.Батыгин, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2015 г.