

А. В. Гнатов¹
 Щ. В. Аргун¹
 Є. О. Чаплигін¹
 О. С. Сабокар¹

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ЗА УМОВ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ ПОЛЕМ ПЛОСКОГО КРУГОВОГО БАГАТОВИТКОВОГО СОЛЕНОЇДА

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Проведено теоретичний аналіз теплових процесів в системі для індукційного нагрівання, що виконана у вигляді плоского кругового багатовиткового соленоїда і розміщена над тонкостінним листовим немагнітним металом. Отримано розрахункові залежності для температури нагрівання кругової області листового металу. За отриманими аналітичними співвідношеннями проведено розрахунок індукційного нагрівання. Визначено час індукційного нагрівання немагнітних металевих зразків залежно від частоти поля, що збуджується.

Ключові слова: індукційне нагрівання, індукторна система, індукований струм, електромагнітні процеси, вихровий струм, нагрів металу.

Вступ

Індукційним нагріванням (ІН) називають явище безконтактного розігріву провідників, які розташовані в потужному змінному (зазвичай високочастотному) полі індуктора, що виникає внаслідок дії вихрових струмів Фуко. Протікання вихрових струмів супроводжується виділенням тепла, обумовленого дією закону Джоуля-Ленца, що приводить до розігріву металевих об'єктів [1]. ІН широко застосовується у промисловості для виконання низки виробничих операцій, наприклад, по загартуванню поверхонь металевих виробів, безконтактного розігрівання рідин, левітаційної плавки металів, а також ремонтних операцій, таких як рихтування тонкостінних металів, зняття шару фарби з металевих поверхонь, роз'єднання болтових з'єднань тощо. [2—5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ідея використовувати попередній ІН в магнітно-імпульсній обробці металів була запропонована ще в 1984 р. [6]. Авторами пропозиції була розроблена і створена система, яка ініціює протікання струму в обмотці робочого інструмента до моменту силового впливу. Попереднє ІН дозволяло істотно підвищити ефективність магнітно-імпульсного деформування в цілому.

Однією з останніх пропозицій щодо використання явища ІН є зовнішнє рихтування кузовних панелей автомобілів а також ремонтні операції зі зняття лакофарбового покриття, знімання стекол, роз'єднання болтових з'єднань, розм'якшення металевих покриттів кузовів перед рихтуванням вм'ятин, відклеювання різноманітних елементів (молдингів, наклейок і т. д.) [5—10].

Останнім часом в машинобудуванні (автомобілебудуванні) все більше застосовуються неферромагнітні метали (наприклад, алюміній і його сплави). Це зумовлено тим, що вони мають значно меншу вагу за відповідної технічних умов міцності.

З урахуванням вищезазначеного, можна зробити висновок, що ІН неферромагнетиків в полі плоского кругового багатовиткового соленоїда є досить актуальною науково-технічною задачею, яка затребувана у виробничих і ремонтних операціях сучасної промисловості.

Метою роботи є аналіз та чисельні оцінки основних характеристик протікання теплових процесів в системі для індукційного нагрівання, яка представлена плоским круговим багатовитковим соленоїдом, розміщеним над площиною тонкостінного листового немагнітного металу.

Теплові процеси

Вирішуючи поставлене завдання можна скористатися аналітичними залежностями для індукційних струмів, отриманими авторами робіт [11, 12].

Розрахункова модель в циліндричній системі координат з напрямними ортами $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ показана на рис. 1а.

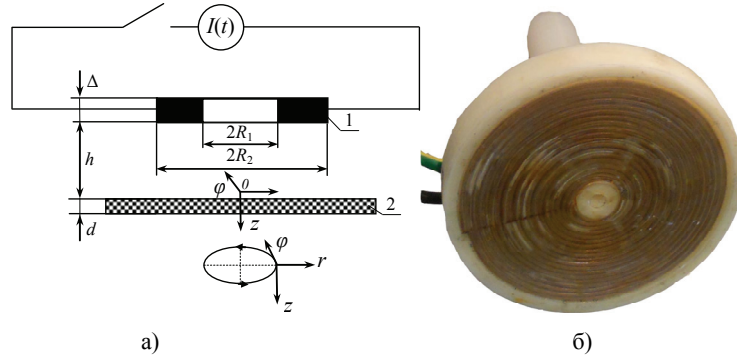


Рис. 1. Плоский круговий багатовитковий соленоїд для індукційного нагріву:
 а — розрахункова модель системи «індуктор-заготівка»: $I(t)$ — джерело змінного струму;
 1 — багатовитковий соленоїд; 2 — плоска листова заготівка; б — модельний варіант соленоїда

Отримаємо розрахункові співвідношення для оцінки залежності температури нагріву листового зразка від основних характеристик процесу індукційного нагрівання.

Розв'язання поставленої задачі проведемо аналогічно роботі [13]. Особливості, пов'язані з функціональними залежностями індукovanого струму від просторових змінних, можна врахувати усередненням по товщині і радіусу металу, який нагрівається. Деталі просторового струморозподілу істотно ускладнили б розрахунки. Це пов'язано з відповідними залежностями активних опорів контурів протікання, їх мас, процесів теплообміну між ними та ін.

Розв'язання поставленої задачі проводилось відомими математичними методами у загальному виді. Чисельні розрахунки у відповідності до геометричних розмірів системи наведені в роботах [11, 12]. Проведемо розрахунок індукційного нагрівання за отриманими виразами для немагнітної сталі і алюмінію.

Розглядається нагрівання кругової ділянки листового зразка безпосередньо під обмоткою індуктора радіуса R_2 , товщиною d з металу, який має питому електропровідність γ і щільність ρ при протіканні струму зі щільністю, що розраховується за формулою [11, 12].

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

$$j_m = \frac{I_m w}{(R_2 - R_1)};$$

$$a(k) = \begin{cases} 0,5, & k = 0; \\ 1,0, & k \neq 0; \end{cases} \quad f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \frac{R_1}{d}}^{x \frac{R_2}{d}} f(y) \cdot y \cdot J_1(y) \cdot dy,$$

де I_m — амплітуда збуджувального струму; w — число витків; $R_{1,2}$ — внутрішній і зовнішній радіуси обмотки; $j(t)$ — часова залежність струму індуктора; t — час; $f(y)$ — функція, що описує радіальний розподіл густини струму в індукторі; β_k — корені рівняння:

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

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

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

Усереднення по просторових координатах $\{z \in [0; d], r \in [0; R_2]\}$ густини струму, який протікає (1), з подальшим множенням на площу відповідного поперечного перерізу ($d \cdot R_2$) і запис у термінах

фази сигналу, що збуджується, приводить до такого рівняння:

$$\overline{I_\varphi(\varphi)} = \left(4(I_m w) \frac{d}{(R_2 - R_1)} \right) \int_0^\infty x \cdot f(x) \cdot e^{-x \frac{l}{d}} \left(1 - J_0 \left(x \frac{R_2}{d} \right) \right) \sum_{k=0}^\infty a(k) \cdot \frac{F_k(x, \beta_k)}{\Phi_k(x)} \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} * e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{\omega \tau} \varphi} dx, \quad (2)$$

$$\text{де } f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \cdot \frac{R_1}{d}}^{x \cdot \frac{R_2}{d}} y \cdot J_1(y) \cdot dy; \quad a(k) = \begin{cases} 0,5, & k = 0; \\ 1,0, & k \neq 0; \end{cases} \quad F_k(x) = (1 - \cos(\beta_k)) + \frac{\beta_k}{x} \cdot \sin(\beta_k); \quad \varphi = \omega \cdot t;$$

$$\beta_k \text{ — корені рівняння } \left(1 - \left(\frac{\beta_k}{x} \right)^2 \right) \sin(\beta_k) + 2 \left(\frac{\beta_k}{x} \right) \cos(\beta_k) = 0.$$

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

При протіканні усередненого індукваного струму по круговому контуру радіуса $0,5R_2$, завдовжки $l = 2\pi(0,5 \cdot R_2) = \pi R_2$, з поперечним перерізом $S = dR_2$ за час dt виділяється теплова енергія, кількість якої встановлюється законом Джоуля-Ленца [1]

$$dQ = (\overline{I_\varphi(\varphi)})^2 R_a dt, \quad (3)$$

де R_a — активний опір контуру протікання усередненого індукваного струму.

З урахуванням параметрів контуру записуємо

$$R_a = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\ell}{S} = \frac{1}{(\gamma d)}. \quad (4)$$

Співвідношення (4) підставимо у формулу (3) і отримаємо:

$$dQ = \frac{1}{(\gamma \cdot d)} \left(\overline{J_\varphi(\varphi)} \right)^2 \Big|_{\varphi=\omega t} dt. \quad (5)$$

Кількість теплоти, яка необхідна для зміни температури металевої пластини заданих розмірів на величину dT° , визначається формулою термодинаміки [1]

$$dQ = M \cdot C \cdot dT^\circ, \quad (6)$$

де M — маса пластини; $M = \rho \pi R_2^2$; C — питома теплоємність металу пластини.

Інтегруючи вирази (5), (6) і прирівнюючи отримані результати, знаходимо залежність для температури нагріву розглянутої кругової області листового металу за час, що відповідає фазовому проміжку $\Delta\varphi$:

$$\Delta T^\circ = \frac{1}{(MC\gamma d\omega)} \int_0^{\Delta\varphi} \left(\overline{I_\varphi(\varphi)} \right)^2 d\varphi. \quad (7)$$

Слід зазначити, що формула (7) інтегрально враховує вплив особливостей не тільки скін-ефекту, але й радіального розподілу струму, що збуджується, на температурні показники індукційного нагріву.

Ампер-витки індуктора, тобто, величина струму і число витків індуктора ($I_m w$) у вираз (7) входять лінійно. У цьому зв'язку, для узагальнення результатів чисельних оцінок доцільно залежність (7) переписати в термінах «відносної температури нагрівання»:

$$\Delta T^\circ_{\text{отн}} = \frac{\Delta T^\circ}{(I_m w)^2};$$

$$\Delta T^\circ_{\text{отн}} = \frac{1}{(MC\gamma d\omega)} \int_0^{\Delta\varphi} \left(\overline{I_{\varphi-\text{отн}}(\varphi)} \right)^2 d\varphi, \quad (8)$$

де $\overline{I_{\phi-\text{отн}}(\phi)} = \frac{\overline{I_{\phi}(\phi)}}{(I_m w)}$ — «відносна густина струму збудження».

Тепер реальна температура нагріву розглянутої кругової області листового металу

$$\Delta T^{\circ} = \Delta T^{\circ}_{\text{отн}} (I_m w)^2. \quad (9)$$

Формули (2) і (7)—(9) — це співвідношення, які дозволяють виконати всі необхідні чисельні оцінки характеристик процесів у досліджуваній системі «індуктор—листова заготовка» з урахуванням всіх особливостей, зумовлених двовимірними процесами проникнення поля при індукційному нагріванні тонкостінних металів.

Приклад розрахунку індукційного нагріву за отриманими виразами

Сталь немагнітна.

а) $f = 25000$ Гц; до температури ≈ 100 °С, коли струм індуктора ≈ 10 А, зразок повинен нагрітися за час ≈ 4 хв;

б) $f = 50000$ Гц; до температури ≈ 100 °С, коли струм індуктора ≈ 10 А, зразок повинен нагрітися за час ≈ 3 хв. З підвищенням струму до ≈ 15 А час нагрівання зменшується: при $f = 25000$ Гц — менше ніж 2 хв; при $f = 50000$ Гц — менше ніж 1,5 хв.

Порівняння показників індукційного нагрівання сталевих зразків показує, що збільшення частоти струму з 25000 Гц до 50000 Гц зменшує час нагрівання (до температури ≈ 100 °С) в 1,3 рази.

Алюміній.

а) $f = 25000$ Гц. Час нагрівання до ≈ 100 °С, коли струм індуктора ≈ 10 А, близький до 14 хв;

б) $f = 50000$ Гц. Час нагрівання до ≈ 100 °С, коли струм індуктора ≈ 10 А, близький до 11 хв. З підвищенням струму до ≈ 15 А час нагрівання зменшується: коли $f = 25000$ Гц — менше ніж 6 хв; коли $f = 50000$ Гц — менше ніж 5 хв.

Порівняння показників індукційного нагрівання алюмінієвих зразків показує, що збільшення частоти струму з 25000 Гц до 50000 Гц забезпечує скорочення часу нагрівання в 1,27 рази.

Отже, якщо провести узагальнення отриманих результатів чисельних оцінок за показниками частоти та значення струму індуктора, можна чітко визначити, вказані параметри для проектування індукторної системи, як інструмента індукційного нагрівання. А це вельми важливо бо, наприклад, для операції зняття захисного лакофарбового покриття з металеві поверхні, необхідно її розігрівати до певної температури, яка визначається самою технологією процесу та типом лакофарбового покриття. Наприклад, для зняття лакофарбового покриття з кузовної панелі автомобіля її необхідно розігріти до 600 °С [3, 4].

Висновки

1. Проведено аналіз та чисельні оцінки основних характеристик теплових процесів в системі для індукційного нагрівання, яка є плоским круговим багатопитковим соленоїдом, розміщеним над площиною тонкостінного листового немагнітного металу.

2. Отримані результати чисельних оцінок основних характеристик теплових процесів показують, що:

— орієнтовний час нагрівання до температури ≈ 100 °С на частотах $\approx 25000\dots 50000$ Гц і амплітудах струму в індукторі $\approx 10\dots 15$ А для листових зразків товщиною ≈ 1 мм становить: 1,5...4 хв — для сталі; 5...14 хв — для алюмінію;

— порівняння показників індукційного нагрівання немагнітних зразків різних металів показує, що збільшення частоти струму від 25000 Гц до 50000 Гц зменшує час нагрівання (до ≈ 100 °С): в 1,3 рази — для немагнітної сталі; в 1,27 рази — для алюмінію.

3. Узагальнення отриманих результатів дозволяє сформулювати рекомендації щодо вибору робочих частот струму при індукційному нагріванні немагнітних листових металів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — М. : Наука, 1968. — 940 с.
2. Сидоренко В. Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении / В. Д. Сидоренко. — Л. : Машиностроение, 1980. — 231 с.
3. Welcome to BETAG Innovation [Електронний ресурс]. — 2015. — Режим доступу : www.beulentechnik.com.

4. Кузовной ремонт легковых автомобилей : [производственно–практическое издание]. — Минск : Автостиль, 2003. — 272 с.
5. Лаборатория электромагнитных технологий [Электронный ресурс]. — 2015. — Режим доступа : <http://electromagnetic.comoj.com>.
6. Алиферов А. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов / А. Алиферов, С. Лупи. — Новосибирск : изд. НГТУ, 2013. — 354 с.
7. 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.
8. Гнатов А. В. Научные основы восстановления кузовных панелей автомобилей методами внешней бесконтактной рихтовки : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.20 / Гнатов Андрей Викторович. — Х., 2014. — 391 с.
9. Фізичні основи прогресивних магнітно-імпульсних технологій в виробництві та ремонті АТЗ : навч. посіб. / [Ю. В. Батигін, А. В. Гнатов, Є. О. Чаплигін, Щ. В. Аргун та ін]. — Х. : ХНАДУ, 2013 — 336 с.
10. 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.
11. Батыгин Ю. В. Вихревые токи в тонких металлических листах при магнитно-импульсной обработке металлов / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, В. И. Лавинский // Электричество. — 2009. — № 9. — С. 61—65.
12. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. — Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов; моногр. — Х. : ХНАДУ, 2009. — 240 с.
13. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хименко. — Т. 1 / под ред. проф. Ю. В. Батыгина. — [2-е изд.] — Х. : МОСТ-Торнадо, 2003. — 288 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 3.06.2015

Гнатов Андрій Вікторович — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри автомобільної електроніки, e-mail: kalifus@yandex.ua;

Аргун Щасяна Валіковна — канд. техн. наук, доцент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: shasyana@gmail.com;

Чаплигін Євген Олександрович — канд. техн. наук, доцент кафедри фізики, e-mail: chaplygin_e_a@mail.ru;

Сабокар Олег Сергійович — студент, e-mail: krot_93@mail.ru.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

A. V. Hnatov¹
Shch. V. Argun¹
Ye. O. Chaplygin¹
O. S. Sabokar¹

Thermal processes at course induction heating by the field of the flat circular multiturn solenoid

¹Kharkiv National Automobile and Highway University

The theoretical analysis of thermal processes in the system for induction heating, which is designed as a flat circular multiturn solenoid and placed on thin-walled sheet nonmagnetic metal, has been conducted in the paper. The calculated dependences have been obtained for the heating temperature of the considered circular area of a sheet metal. The calculation of the induction heating expressions on the obtained expressions has been carried out. The time of the induction heating a nonmagnetic metal samples depending on the frequency of an excited field has been determined.

Keywords: induction heating, inductor system, induced current, induction current, electromagnetic processes, eddy currents, heating of metal.

Hnatov Andrii V. — Dr. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Chair of Automotive Electronics, e-mail: kalifus@yandex.ua;

Argun Schasiana V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Automotive Electronics, e-mail: shasyana@gmail.com;

Chaplygin Yevgen O. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Physics, e-mail: chaplygin_e_a@mail.ru;

Sabokar Oleg S. — Student, e-mail: krot_93@mail.ru

А. В. Гнатов¹
Щ. В. Аргун¹
Е. А. Чаплыгин¹
О. С. Сабокарь¹

Тепловые процессы при индукционном нагреве полем плоского кругового многовиткового соленоида

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Проведен теоретический анализ тепловых процессов в системе для индукционного нагрева, выполненной в виде плоского кругового многовиткового соленоида, размещенного над тонкостенным листовым немагнитным металлом. Получены расчетные зависимости для температуры нагрева круговой области листового металла. По полученным аналитическим соотношениям проведен расчет индукционного нагрева. Определено время индукционного нагрева немагнитных металлических образцов в зависимости от частоты возбуждаемого поля.

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

Гнатов Андрей Викторович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры автомобильной электроники, e-mail: kalifus@yandex.ua;

Аргун Щасяна Валиковна — канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильной электроники, e-mail: shasyana@gmail.com;

Чаплыгин Евгений Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры физики, e-mail: chaplygin_e_a@mail.ru;

Сабокарь Олег Сергеевич — студент, e-mail: krot_93@mail.ru