

УДК 621.793.927.7

**О. Шаблій, докт. фіз.-мат. наук; Ч. Пулька, докт. техн. наук; М. Базар**

*Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя*

## **ЕНЕРГООЩАДНА НАГРІВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ**

*Розроблено математичну модель для визначення конструктивних параметрів нагрівальної системи індукційного наплавлення тонких сталевих дисків довільних діаметрів і розмірів зони наплавлення, виходячи із потреб технології. Вона складається із двох кільцевих витків, з'єднаних між собою зустрічно – паралельно (у протифазі по струму і магнітному потоку), забезпечує рівномірнішу товщину шару наплавленого металу та економію електроенергії на 15-23%, залежно від типу використаного наплавлюваного порошкоподібного твердого сплаву.*

**Ключові слова:** індукційне наплавлення, тонкі сталеві диски, електричне поле, напруженість електричного поля, питома потужність теплових джерел.

**O. Shabliy, Ch. Pulka, M. Basar**

## **POWER-SAVING HEATING SYSTEM FOR INDUCTION WELDING OF THIN-WALL CONSTRUCTION ELEMENTS**

*Mathematical model for finding construction parameters of the heating system for induction welding of any diameter and size thin steel disks welding area to meet the demands of manufacturing, has been developed. It consist of two ring windings connected between each other meeting paralelly (in antiphase of the current and magnetic stream), rohich provider more homogeneous thickness of the welding metal layer and electric power-sewing in 15..23% depending on the type of application of the welded powder-like hard alloy.*

**Key words:** induction welding, thin steel disks, electric field, electric field stress, specific power of thermal sources, welded powder-like hard alloy.

**Вступ.** У техніці широко застосовують тонкостінні елементи конструкцій, зокрема такі, як тонкі сталеві диски суцільної і зубчастої форм. До них належать диски луцильників, дискові ножі для різання шиферу і зрізання соняшнику, ножі-гичкорізи, фрези і тому подібне, які експлуатують в умовах абразивного спрацювання [1-5].

Найбільш розповсюджене для зміцнення робочих поверхонь вищеназваних деталей індукційне наплавлення порошкоподібними твердими сплавами. Існуючі процеси наплавлення таких дисків, у тому числі й індукційне, призначені для наплавлення дисків певного діаметра і ширини зони наплавлення (для прикладу, діаметр 210мм з шириною зони наплавлення 5...20 мм при товщині основного і наплавленого металу відповідно 2...6 мм і 0,8...1,5 мм).

На практиці діаметри дисків і розміри зони наплавлення можуть змінюватися від 210 до 420 мм, а ширина зони наплавлення – відповідно від 10 до 50 мм. Для інших діаметрів дисків і ширини зони наплавлення необхідно знаходити нові конструктивні параметри нагрівальної системи (двовиткового кільцевого індуктора), щоб забезпечити якісне наплавлення. Експериментальне визначення таких параметрів вимагає певного часу і значних матеріальних затрат. У літературних джерелах немає результатів досліджень, пов'язаних із вирішенням цієї проблеми, що зумовлює необхідність вдосконалити даний спосіб наплавлення тонких сталевих дисків, використовуючи струми високої частоти. Тому виникає необхідність розробити просту методику, тобто такі математичні моделі, за допомогою яких можна було б отримати графічні залежності або табличні дані усіх конструктивних розмірів, що входять у конструкцію

нагрівальної системи або індуктора. Вони б дозволили інженеру вибирати конструктивні параметри для наплавлення дисків довільних діаметрів і ширини зони наплавлення, виходячи з потреб технології, без проведення експерименту. Цільовий експеримент у даному випадку слід використовувати, щоб перевірити теоретичні дані.

Мета даної роботи – розробити математичну модель для розрахунку конструктивних параметрів енергоощадної нагрівальної системи індукційного наплавлення тонких сталевих дисків довільних діаметрів і розмірів зони наплавлення та підвищення рівня стабільності товщини шару наплавленого металу й економії електроенергії.

У роботі [6] показано, що якісне наплавлення диска можна забезпечити при такому значенні питомої потужності теплових джерел (постійної за певний проміжок часу) у зоні наплавлення, яку визначимо за формулою

$$W_1 = \frac{T_{30} \lambda_0 m}{1 - e^{-am\tau}}, \quad (1)$$

де  $T_{30}$  – температура (задана), при якій виконується якісне наплавлення за час  $\tau$ ;  $\lambda_0 = ca\gamma$ ;  $c$  – питома теплоємність матеріалу диска;  $a$  – температуропровідність;  $\gamma$  – густина;  $m = \left(\frac{B_i}{2h^2}\right)$ ;  $B_i = \left(\frac{2h\alpha}{\lambda}\right)$ ;  $2h$  – товщина диска;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу.

Енергоощадним режимом наплавлення (щодо економії електроенергії) є такий режим, при якому питома потужність теплових джерел змінюється у часі за законом [6]

$$W_2 = \frac{T_{30} \lambda_0 m}{sh(am\tau)} e^{amt}, \quad (2)$$

де  $t$  – біжучий час.

Встановлено, що залежно від складу наплавлених матеріалів економія електроенергії може сягнути 15-23% [6], залежно від типу використаних наплавлених порошкоподібних твердих сплавів.

Реалізуємо розподіл питомої потужності (1) або (2) за допомогою нагрівальної системи – індуктора, який складається із двох кільцевих витків, встановлених паралельно до поверхні диска, що наплавляється (рис.1). Ці витки з'єднані між собою зустрічно – паралельно (у протифазі по струму і магнітному потоку).

Електричне поле поза індуктором опишемо рівнянням [7], справедливим при синусоїдальній зміні струму індуктора в часі

$$\nabla^2 E + k_0^2 E = i\omega\mu_0 J, \quad (3)$$

де  $E$  – комплексна амплітуда напруженості електричного поля;  $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ ;  $\omega$  – кругова частота струму в індукторі;  $\varepsilon_0, \mu_0$  – діелектрична і магнітна проникність простору поза індуктором;  $J$  – комплексна амплітуда густини струму в індукторі.

Тоді напруженість електричного поля поза індуктором буде така:

$$E_i = \frac{i\omega\mu_0 I_i a_i}{4\pi} \int_0^\pi \frac{e^{-ik_0\sqrt{r^2+(z-h_i)^2+a_i^2-2ra_i\cos\varphi}}}{\sqrt{r^2+(z-h_i)^2+a_i^2-2ra_i\cos\varphi}} d\varphi, \quad (4)$$

де  $I_i = 2\pi c_i J$  – лінійна густина струму індуктора;  $c_i (i=1, 2)$  – радіуси поперечних перерізів витків індуктора;  $a_i (i=1,2)$  – радіуси осей витків;  $h_i (i=1, 2)$  – відстань площин витків індуктора від площини симетрії диска;  $r, z, \varphi$  – координати точок поля у циліндричній системі координат.

Використовуючи умову спряження електричних полів на межі простору і диска, а також закон проникнення електричного поля у диск [7], отримаємо такі формули для визначення електричного поля у диску:

від витка 1 (рис.1) в області верхньої поверхні диска

$$E_{1z} = \frac{i\omega\mu_0 I_1 a_1}{4\pi} e^{-\frac{(1+i)(h-z)}{\Delta} 2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-ik_0 \sqrt{r^2 + (h-h_1)^2 + a_1^2 - 2ra_1 \cos \varphi}}}{\sqrt{r^2 + (h-h_1)^2 + a_1^2 - 2ra_1 \cos \varphi}} d\varphi; \quad (5)$$

від витка (2) в області нижньої поверхні диска

$$E_{2z} = \frac{i\omega\mu_0 I_1 a_1}{4\pi} e^{-\frac{(1+i)(z+h)}{\Delta} 2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-ik_0 \sqrt{r^2 + (h-h_2)^2 + a_2^2 - 2ra_2 \cos \varphi}}}{\sqrt{r^2 + (h-h_2)^2 + a_2^2 - 2ra_2 \cos \varphi}} d\varphi; \quad (6)$$

від витка 1 в області торця диска (в радіальному напрямку)

$$E_{1r} = \frac{i\omega\mu_0 I_1 a_1}{4\pi} e^{-\frac{(1+i)(r_2-r)}{\Delta} 2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-ik_0 \sqrt{r^2 + (z-h_1)^2 + a_1^2 - 2ra_1 \cos \varphi}}}{\sqrt{r^2 + (h-h_1)^2 + a_1^2 - 2ra_1 \cos \varphi}} d\varphi. \quad (7)$$

Тут  $\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$  глибина проникнення струму;  $\mu$ ,  $\sigma$  – магнітна й електрична проникність матеріалу диска.

Підставляючи (5) - (7) у формулу закону Джоуля–Ленца [2]  $W_* = \frac{1}{2} \sigma \dot{E} E^*$ , знайдемо питому об'ємну потужність теплових джерел. Тоді середнє по товщині диска  $\left( W = \frac{1}{2h} \int_{-h}^{+h} W_* dz \right)$  значення питомої потужності теплових джерел дорівнюватиме

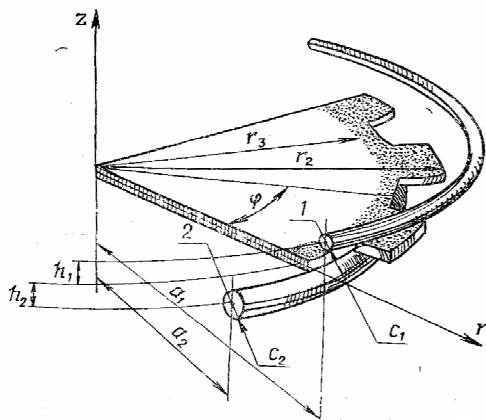


Рисунок 1 – Фрагмент тонкостінного диска з індуктором: 1,2 – верхній і нижній витки індуктора

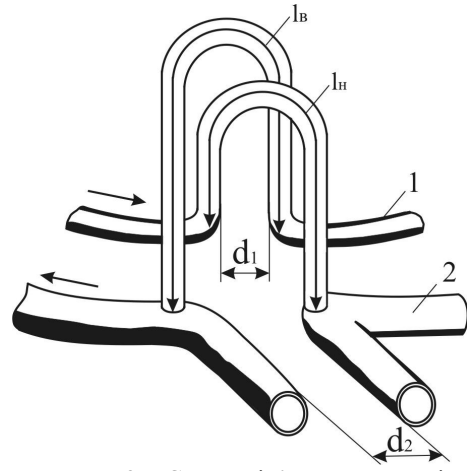


Рисунок 2 – Схема під'єднання витків індуктора: 1,2 (див.рис.1)

$$W = \frac{\sigma\omega^2\mu_0^2}{128\pi^2 h} \left[ \Delta I_1^2 A^2 a_1^2 + \Delta I_2^2 a_2^2 B^2 + 4ha_1^2 I_1^2 C^2 e^{-\frac{2(r_2-r)}{\Delta}} \right], \quad (8)$$

де

$$A^2 = \left[ \int_0^{2\pi} \frac{\sin k_0 \beta(\varphi)}{\alpha(\varphi)} d\varphi \right]^2 + \left[ \int_0^{2\pi} \frac{\cos k_0 \alpha(\varphi)}{\alpha(\varphi)} d\varphi \right]^2,$$

$$B^2 = \left[ \int_0^{2\pi} \frac{\sin k_0 \beta(\varphi)}{\beta(\varphi)} d\varphi \right]^2 + \left[ \int_0^{2\pi} \frac{\cos k_0 \beta(\varphi)}{\beta(\varphi)} d\varphi \right]^2,$$

$$C^2 = \left[ \int_0^{2\pi} \frac{\sin k_0 \gamma(\varphi)}{\gamma(\varphi)} d\varphi \right]^2 + \left[ \int_0^{2\pi} \frac{\cos k_0 \gamma(\varphi)}{\gamma(\varphi)} d\varphi \right]^2,$$

$$\alpha(\varphi) = \sqrt{r^2 + (h-h_1)^2 + a_1^2 - 2ra_1 \cos \varphi},$$

$$\beta(\varphi) = \sqrt{r^2 + (h-h_2)^2 + a_2^2 - 2ra_2 \cos \varphi},$$

$$\gamma(\varphi) = \sqrt{r_2^2 + h_1^2 + a_1^2 - 2r_2a_1 \cos \varphi}.$$

У формулі (8) струм у витках визначимо через напругу і опір за формулами

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}; \quad I_2 = \frac{U}{Z_2}, \quad (9)$$

де  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}; \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2};$

$$R_1 = \rho \frac{2\pi a_1 + l_1}{2\pi c_1 \delta_1}; \quad R_2 = \rho \frac{2\pi a_2 + l_2}{2\pi c_2 \delta_2};$$

$$l_1 = l_0 + 2(h_1 - h_2); \quad l_2 = 2(a_1 - a_2) - d_2; \quad l_0 = l_g + l_n - d_1;$$

$\rho$  – питомий опір матеріалу індуктора;  $c_1, c_2$  – радіуси перерізів трубок, з яких виготовлений індуктор;  $l_g, l_n$  – довжини перехідних трубок від кільцевих частин індуктора до затискачів;  $d_1, d_2$  – величини зазорів (рис.2).

Індуктивності витків індуктора  $L_1$  і  $L_2$  залежать від їхніх геометричних розмірів і визначаються складними математичними виразами. Більш достовірні дані значення індуктивностей, визначених експериментально. У дослідженнях також встановлено, що електрична ємність індуктора незначна, тому при розрахунках нею знехтуємо. Знайдений вище розподіл питомої потужності (8) є функцією конструктивних параметрів індуктора (далі позначимо їх через  $\varphi_k$ , де  $k=1, 2, \dots, m$ ), даного положення точки на диску, а також функцією часу (оскільки напруга може змінюватися у часі за будь-яким законом).

Для найкращого наближення закону зміни питомої потужності теплових джерел, що генерує індуктор, до енергоощадного, скористаємося методом найменших квадратів. Для цього формулу квадрата відхилення питомої потужності, що створюється від енергоощадної, запишемо у вигляді

$$\Phi = \int_0^{\tau} \int_{r_3}^{r_2} (W - W_{зд})^2 r dr dt, \quad (10)$$

де  $W$  – визначаємо за формулою (8), а  $W_{зд}$  задаємо за виразами (1) або (2).

Рівняння для визначення конструктивних параметрів індуктора, які створюють мінімум відхилень питомої потужності теплових джерел, що створює індуктор, від енергоощадної, тобто мінімум виразу (10), мають вигляд

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi_k} = 0; \quad k = (1, 2, \dots, n), \quad (11)$$

де  $\varphi_k$  ( $k=1, 2, \dots, n, \quad n \leq m$ ) – це із конструктивних параметрів, за якими мінімізуємо вираз (10). У нашому випадку  $\varphi_k$  може приймати значення  $a_1, h_1, h_2, c_1, c_2, U$ .

За умовами практичної реалізації конструкції деякі із цих параметрів ( $\varphi_{n+1}, \dots, \varphi_m$ ) можуть бути задані. Так, якщо відомі значення  $a_1, h_1, h_2, c_1, c_2$ , то для визначення  $U$  і  $a_2$  слугитимуть рівняння

$$\frac{\partial \Phi}{\partial U} = 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial a_2} = 0, \quad (12)$$

при цьому, якщо  $W_{зд}$  задається законом (1), то  $U=A$  (тобто напруга  $U$  у формулі (8)) стала в часі й дорівнює невідомій величині  $A$ ; коли ж  $W_{зд}$  задається законом (2), то  $U$  у формулі (8) буде визначатися за формулою  $U^2 = Ae^{amt}$ . Таким чином, перше з рівнянь (12) у нашому випадку матиме вигляд

$$\frac{\partial \Phi}{\partial A} = 0. \quad (13)$$

Розрахунки проведені для випадку наплавлення тонкостінних фасонних дисків (ножів-гичкорізів) за новою технологією, одночасного наплавлення на усій робочій поверхні. При розрахунках прийнято:

для диска  $r_2=105$  мм,  $r_3=92$  мм,  $2h=3$  мм,  $\lambda=40$  Вт/(м<sup>0</sup>С),  $c=846$  Дж/(кг<sup>0</sup>С),  $\gamma=5969,2$  кг/м<sup>3</sup>,  $\sigma=1,25 \cdot 10^6$  1/(Ом·м); для індуктора  $a_1=113,5$  мм,  $c_1=5$  мм,  $c_2=8$  мм,  $\delta_1=\delta_2=1$  мм,  $h_2=14,5$  мм,  $l_B=155$  мм,  $l_H=90$  мм,  $d_1=24$  мм,  $d_2=4$  мм,  $h_1=8$  мм,  $\mu=2,75\mu_0$ ,  $\epsilon_0=8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\omega=2,763 \cdot 10^6$  Гц,  $\rho=0,17 \cdot 10^{-7}$  Ом·м.

Теплофізичні та електрофізичні характеристики матеріалу диска залежать від температури. На стадії нагрівання, відповідно до рекомендацій [6], вони прийняті усередненими. Значення  $T_{зд}=1220$  °С,  $\alpha=455$  Вт/(м<sup>2</sup> °С) і  $\tau=32$  с, у випадку зносостійкого матеріалу ПГ-С1 (У30Х28Н4С4), взяті з роботи [6].

При розрахунках також використано такі експериментально встановлені залежності індуктивностей витків індуктора від радіуса  $a_2$ :

$$L_1 = (0.505 - 1.538a_2) \cdot 10^{-6} \quad \text{Гн};$$

$$L_2 = (-0.133 + 3.46a_2) \cdot 10^{-6} \quad \text{Гн}.$$

Значення радіуса витка 2 індуктора (рис.1) знайдено за допомогою рівнянь (12), з урахуванням експериментальних даних, яке дорівнює  $a_2=92$  мм. Залежність струму  $I$  індуктора від часу в процесі нагрівання зображено на рисунку 3. Визначені таким чином значення  $I$  і  $a_2$  забезпечують найменше відхилення питомої потужності джерела тепла, створеного індуктором, від заданої формулою (2).

Наплавлення можна виконати за режимом, що характеризується струмом зі сталою амплітудою (рис.3, криві 1, 3), і в режимі, що забезпечує зміну амплітуди струму в часі (крива 2). Розхід електроенергії при оптимальному режимі зміни струму в часі для наведеного випадку на 19% менший, ніж при режимі, що характеризується струмом постійної амплітуди (площа під кривою 2 на 19% менша від площі під кривою 1).

Щоб перевірити результати теоретичних досліджень на основі отриманих за розрахунками й експериментально параметрів, виготовили і випробували (при постійній амплітуді струму) індуктор нової конструкції. Випробування проводили на високочастотному генераторі ВЧИ-63/0,44, технічні характеристики якого такі: напруга в контурі 7,5 кВ, напруга на аноді лампи 10 кВ, струм мережі лампи 1,4 А, струм анода лампи 4 А; час наплавлення  $\tau=32$  с, при цьому струм, що протікає через індуктор, становив 26,7 А (рис.3, крива 3). Як зносостійкий матеріал використали сплав ПГ-С1 (сормайт).

Значення струму при наплавленні, який визначений теоретично, становить у даному випадку 27,3 А (рис.3, крива 1). Як бачимо, теоретичні й експериментальні результати добре узгоджуються. За допомогою цієї методики можна визначити інші параметри нагрівальної системи  $a_1$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ , за якими будують графічні залежності або табличні дані, звідти можна вибирати їхні значення – залежно від діаметрів дисків і розмірів зони наплавлення, без проведення експерименту.

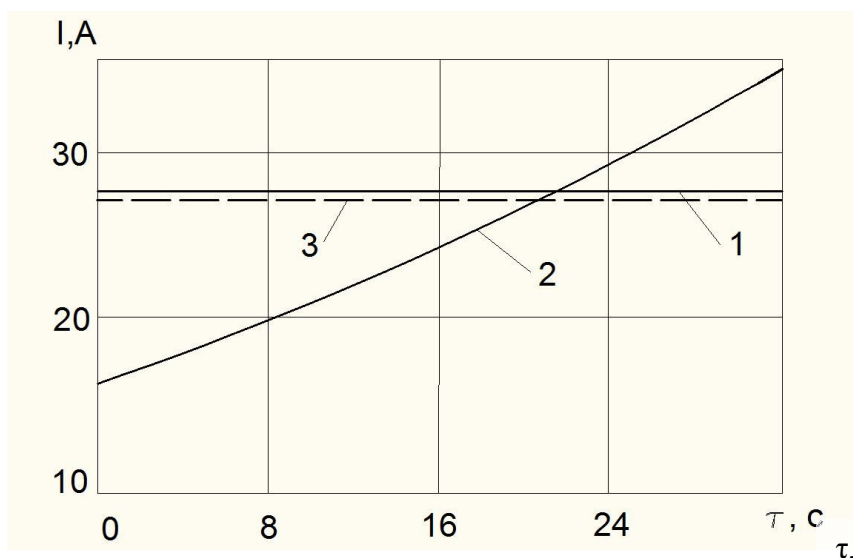


Рисунок 3 – Зміна струму  $I$  індуктора залежно від часу наплавлення  $\tau$ : 1, 3 – теоретична і експериментальна криві при постійній амплітуді струму; 2 – розрахункова крива при змінній амплітуді струму

Запропонована нагрівальна система забезпечує рівномірнішу температуру на усій робочій поверхні диска, яка наплавляється, що сприяє підвищенню стабільності товщини шару наплавленого металу, оскільки порошкоподібний твердий сплав розплавляється від поверхні основного металу (диска).

**Висновки.** Розроблено математичну модель, яка дозволяє визначати конструктивні параметри енергоощадної нагрівальної системи, для розроблення нових технологічних процесів індукційного наплавлення тонких сталевих дисків довільних діаметрів і розмірів зони наплавлення, забезпечуючи при цьому підвищення стабільності товщини шару наплавленого металу на 12% та економію електроенергії на 15–23% при мінімальних термінах та матеріальних затратах – порівняно з існуючим способом наплавлення при постійній питомій потужності у часі.

### Література

1. Боль А.А. Индукционная наплавка деталей в сельскохозяйственном машиностроении / А. А. Боль, С. П. Лесков // Наплавка. Опыт и эффективность применения. – К.: 1985.– С.72–75.
2. Вишнеvский А. А. Технология изготовления наплавленных дисковых ножей / А. А. Вишнеvский, Ю. М. Костылев, Д. Д. Остров // Наплавка деталей металлургического и горного оборудования. – Реферат. сборник НИИИНФОРМТЯЖМАШ 10-78-16.– М., 1978.– С.15–18.
3. Стрельбицкий В.Ф. Дисковые почвообрабатывающие машины / Стрельбицкий В.Ф. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.
4. Лозовский В. П. Исследование работоспособности и критериев предельного состояния дисков луцильников / В. П. Лозовский, А. Т. Остапенко, В. А. Прокопенко // Тракторы и сельхозмашины. – 1983. – № 6. – С.15–16.
5. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин / Ткачев В. Н. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.
6. Шаблий О.Н. Оптимизация энергозатрат при индукционной наплавке тонкостенных фасонных дисков / О.Н. Шаблий, Ч.В. Пулька, Б.П. Будзан // Автомат. сварка. – 1987.– №1. – С.36–39.
7. Семенов Н.А. Техническая электродинамика / Семенов Н.А. – М.: Связь, 1973. – 480 с.

Одержано 21.08.2009 р.