

МАШИНОБУДУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА ТА ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

MANUFACTURING ENGINEERING AND AUTOMATED PROCESSES

УДК 621.793.927.7:669.018.25

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

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ НАГРІВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ КОМБІНОВАНОГО ЕКРАНУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

У роботі розроблено математичну модель, яка дозволяє проектувати складну нагрівальну систему ІТЕЕ, що складається з індуктора, теплового та електромагнітного екранів, з урахуванням їх тепло-, електрофізичних, енергетичних та геометричних параметрів з використанням енергоощадного режиму нагрівання для наплавлення тонких сталевих дисків довільних діаметрів і розмірів зони наплавлення, виходячи з потреб технології без проведення експерименту, яка покращує рівномірність товщини шару наплавлювального металу, підвищує продуктивність процесу наплавлення, а також досягати додаткової економії електроенергії внаслідок екранування теплових та електромагнітних полів.

O.Shabliy, Ch.Pulka

MATHEMATIC MODEL OF HEATING SYSTEM CONSTRUCTION PARAMETERS OPTIMIZATION TAKING INTO ACCOUNT THE COMBINED SCREENING OF THERMAL AND ELECTROMAGNETIC FIELDS

Mathematic model providing complex heating system ITEE, which consists of an inductor, heat and electromagnetic screens taking into account their heat, electrophysical, power, and geometric parameters under energy-saving heating regime for surfacing of thin steel disks of arbitrary diameters and sizes of the surfacing area meeting the needs of technology without experiments having been carried out. The technology improves uniformity of the surfacing metal layer thickness and raises the surfacing efficiency and gives a possibility to obtain additional energy saving caused by the screening of the heat and electromagnetic fields

В роботі [1] проведені дослідження з оптимізації конструктивних параметрів двохвиткового кільцевого індуктора для наплавлення тонких круглих та фасонних дисків довільного діаметра і ширини зони наплавлення з врахуванням екранування тільки електромагнітного поля з метою одержання заданого розподілу потужності теплових джерел по ширині зони наплавлення. Там же наведені табличні дані і графічні залежності, за якими підбираються конструктивні розміри двохвиткового кільцевого індуктора в залежності від діаметра диска і ширини зони наплавлення, а також з

урахуванням значень коефіцієнтів екранування електромагнітних полів, які були прийняті відповідно $K_e = 0,25$, $K_e = 0$ – повне екранування.

Викликає інтерес дослідження температурного поля в зоні наплавлення з розробленням математичної моделі для знаходження температури в диску через параметри двохвиткового кільцевого індуктора, з допомогою якого здійснюється нагрівання з урахуванням одночасно як електромагнітного, так і теплового екранування, які суттєво впливають на розподіл температури в зоні наплавлення, а також розроблення методики визначення коефіцієнтів електромагнітного і теплового екранів K_e і K_T .

Нехай круглий диск, який показаний на рис. 1, має товщину $2h$ і радіус r_2 , нагрівається з допомогою двохвиткового кільцевого індуктора. В цьому випадку питома потужність теплових джерел, які виникають в області диска внаслідок дії електромагнітного поля, має вигляд (1).

$$W = \frac{\sigma \omega^2 \mu_0^2}{128\pi 2h} \left[\Delta I_a^2 A^2 a_a^2 + \Delta I_i^2 a_i^2 B^2 + 4ha_a^2 I_a^2 C^2 e^{-\frac{2(r_2-r)}{\Delta}} \right], \quad (1)$$

в якій $I_a = \frac{U}{Z_a}$, $I_i = \frac{U}{Z_i}$, Z_a , Z_i – повний опір у верхньому і нижньому витках індуктора,

U – напруга на індукторі; $\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$ – глибина проникнення струму; σ – електрична

провідність матеріалу диска; ω – кругова частота струму в індукторі; ϵ_0 , μ_0 – відповідно діелектрична і магнітна проникність простору за межами індуктора; I_a , I_i , a_a , a_i – відповідно струми і радіуси верхнього і нижнього витків індуктора, м; r_2 – зовнішній радіус диска; коефіцієнти А, В, С визначаються через геометричні розміри диска та індуктора.

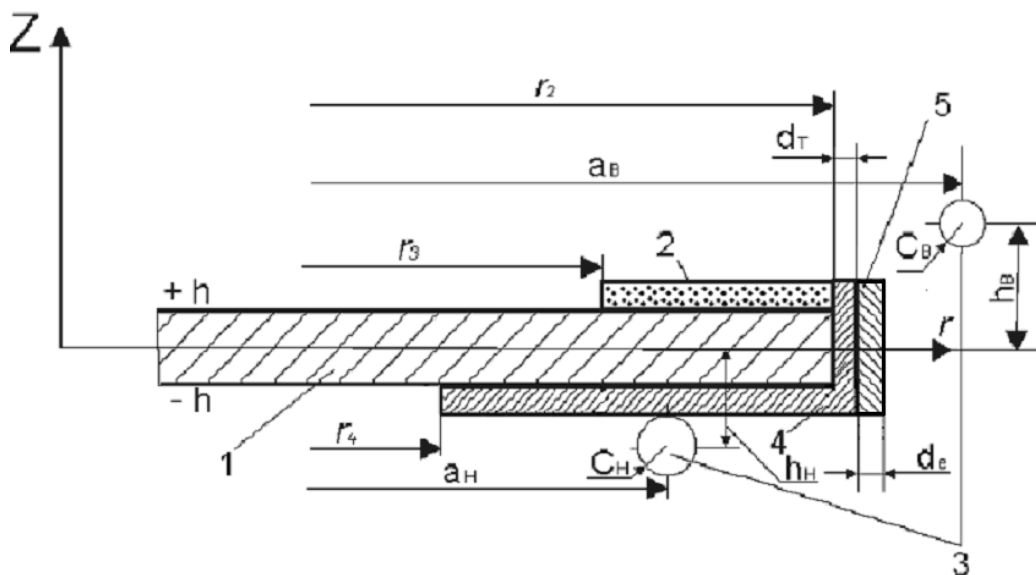


Рисунок 1 – Поперечний переріз нагрівальної системи ІТЕЕ (індуктор, тепловий та електромагнітний екрани): 1- деталь; 2 – шихта; 3 – кільцевий двохвитковий індуктор; 4, 5 – відповідно тепловий і електромагнітний екрани.

Температурне поле в диску повинно задовільняти рівняння теплопровідності [2]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} - m^2 T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{w}{\lambda}, \quad (m^2 = \frac{\alpha}{\lambda h}), \quad (2)$$

де $T = T_1 - T_c$;

T_1, T_c - відповідно температура диска і середовища; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу диска; α - коефіцієнт тепловіддачі в середовище при відсутності екрана.

Мають місце граничні умови

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \alpha T = 0 \quad \text{при } r = r_2. \quad (4)$$

Аналіз підрахунків, наведений у роботі [1], показує, що електромагнітне екранування теплових джерел на торці диска значно впливає на рівномірність розподілу питомої потужності по радіусу, (особливо по ширині зони наплавлення ($r_2 - r_3 = 10...50$ мм)).

Якщо реалізувати також теплове екранування (рис. 1), де екран розташований як на торці, так і у нижній поверхні диска, яка не підлягає наплавленню, при цьому радіус r_4 може змінюватися від 0 до r_2 , тоді потік тепла буде значно зменшений або зовсім припинений, що сильно вплине на рівень розподілу температури в зоні наплавлення, а також зменшиться втрата тепла через торець і нижню поверхню диска.

Формула (1) у випадку електромагнітного екранування торця диска набуде вигляду (5).

$$W = \frac{\sigma \omega^2 \mu_0^2}{128\pi 2h} \left[\Delta I_a^2 A^2 a_a^2 + \Delta I_i^2 a_i^2 B^2 + K_e 4ha_a^2 I_a^2 C^2 e^{-\frac{2(r_2-r)}{\Delta_e}} \right], \quad (5)$$

в якій всі величини, які входять у дану формулу, описані вище, а коефіцієнт електромагнітного екранування K_e має вигляд:

$$K_e = e^{-\frac{2d_e}{\Delta_e}}, \quad (6)$$

де d_e – товщина екрана, а Δ_e - глибина проникнення електромагнітного поля в екран, що знаходиться так:

$$\Delta_e = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_e \sigma_e}} \quad (7)$$

Тут μ_e - магнітна проникність, σ_e - електрична провідність матеріалу екрана.

Якщо прийняти товщину екрана $d_e = \Delta_e$, тоді потужність теплових джерел на торці диска зменшиться в e^2 разів. Коли товщина екрана $d_e = 2\Delta_e$, то вона зменшиться в e^4 разів, при $d_e = 4\Delta_e$ - в e^8 разів, тобто практично вона буде дорівнювати нулю.

При $K_e = 0$ маємо повне електромагнітне екранування, а при $K_e = 1$ - екранування відсутнє.

Коли на торці диска встановлений також тепловий екран, то гранична умова (4) перепишеться так:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + K_T \alpha T = 0 \quad \text{при } r = r_2, \quad (8)$$

в якій K_T – коефіцієнт теплового екранування [3], який змінюється в проміжку $0 \leq K_T \leq 1$. При $K_T = 0$ маємо повне теплове екранування, а при $K_T = 1$ - екранування відсутнє. Коефіцієнт теплового екранування з допомогою екрана товщиною d_T і коефіцієнтом теплопровідності матеріалу екрана λ_T визначиться із співвідношення [3]:

$$K_T \alpha = \frac{\lambda_T}{d_T},$$

$$K_T = \frac{\lambda_T}{d_T \alpha} \quad (9)$$

в якому α - коефіцієнт тепловіддачі в середовище при відсутності екрана.

Коефіцієнт $\frac{\lambda_T}{d_T}$ називається коефіцієнтом теплової провідності екрана. Якщо

$\frac{\lambda_T}{d_T}$ стає рівним α , то $K_T = 1$, тобто екранування відсутнє і проходить конвективний теплообмін з середовищем, і гранична умова (8) набуває вигляду (4).

Припустимо, що в початковий момент часу температура диска дорівнює температурі середовища. Тоді початкова умова для рівняння (2) запишеться так

$$T = 0 \text{ при } t = 0. \quad (10)$$

Розв'язок рівняння (2) при граничній умові (8) і початковій умові (10) у випадку, коли питома потужність, яка є функцією радіуса r і часу t , визначається за формулою (5), має вигляд:

$$T = \frac{a}{\lambda_g} \sum_{\nu=1}^{\infty} \left(e^{-a\lambda_{\nu}^2 t} \int_0^t \frac{\int_0^{r_2} w(r,t) J_0(l_{\nu} r) r dr}{\int_0^{r_2} J_0^2(l_{\nu} r) r dr} e^{a\lambda_{\nu}^2 t} dt \right) J_0(l_{\nu} r), \quad (11)$$

в якому $w(r,t)$ знаходиться з допомогою формули (1) або (5), а $l_{\nu}^2 = \lambda_{\nu}^2 - m^2$; $\lambda_{\nu} = \sqrt{l_{\nu}^2 + m^2}$; $J_0(l_{\nu} r)$ - функція Бесселя першого роду нульового порядку дійсного аргументу, α - коефіцієнт тепловіддачі; λ_{ν} - корені характеристичного рівняння

$$-\lambda_{\nu} J_1(l_{\nu} r_2) + \alpha K_T J_0(l_{\nu} r_2) = 0. \quad (12)$$

Таким чином, отримано математичну модель знаходження температури в диску через параметри джерела його індукційного нагрівання з використанням електромагнітного і теплового екранування торця диска. Це дає змогу визначити та оптимізувати вказану температуру в зоні наплавлення диска в залежності від параметрів індуктора, диска, електромагнітного і теплового екранів та електричного струму.

Так, для оптимізації параметрів індуктора та електричного струму, який подається на нього, необхідно мінімізувати функціонал

$$\hat{O} = \int_0^{\tau} \int_0^{r_2} (T - T_{01})^2 r dr dt, \quad (13)$$

в якому T_{01} - визначається за формулою $T_{01} = \frac{T_{ca} sh(am^2 t)}{sh(am^2 \tau)}$, (14)

де $T_{ca} = T_1 - T_c = 1220 - 20 = 1200^{\circ}C$; m^2 - див. вираз (2); τ - час наплавлення; t - біжучий час; a - коефіцієнт температуропровідності диска.

Внаслідок того, що у вираз для питомої потужності $w(r,t)$ входять всі конструктивні параметри індуктора (див. рис. 1) $h_b, h_n, 2h, a_b, a_n, r_2$ і величина

електричного струму, який подається на нього, та електромагнітного поля, яке ним створюється, то, реалізуючи процес мінімізації функціоналу (13) за необхідними параметрами, ми отримаємо оптимальний варіант конструкції індуктора та електричного струму для забезпечення технологічного процесу одночасного індукційного наплавлення на всій робочій поверхні тонкого круглого або фасонного диска.

Для прикладу проведені обчислення для нагрівальної системи з урахуванням конструктивних особливостей та можливостей оптимізації. Задаємо геометричні розміри нагрівальної системи: радіус зовнішнього витка індуктора $a_b = 0,131$ м (див. рис. 1), критерій $Bi = 0,034$ - для теплоізоляційного матеріалу теплового екрана, який виготовлений з азбестошиферного шару товщиною $d_t = 0,02$ м, радіусом $r_3 = 0,075$ м (див. рис. 1) і часом наплавлення $\tau = 22$ с, $\lambda_t = 0,17$ Вт/м⁰С – коефіцієнт теплопровідності теплового екрана (азбестошиферу), тоді $K_T = 0,0192$.

Експериментальні дані підтверджують, що температура наплавлення становить $T_1 = 1220$ °С. Тоді при $T_c = 20$ °С маємо $T_{30} = 1200$ °С. Якщо електромагнітний екран виготовлений з міді, то при круговій частоті $\omega = 2\pi \cdot 440$ кГц глибина проникнення електромагнітного поля в екран становить $\Delta_e = 0,1$ мм.

Візьмемо за параметри оптимізації a_n, h_n, h_b, A, K_e .

Виконавши процедуру мінімізації функціоналу (13) за цими параметрами, отримаємо їх значення, які рівні $a_n = 0,0945$ м; $A = 165,20$; $K_e = 0,655$; $h_n = 0,0315$ м; $a_b = 0,131$ м; $h_b = 0,01$ м; $r_3 = 0,075$ м.

Результати обчислення температури в області диска при цих значеннях в різні моменти часу представлені в таблиці 1, а їх графічні зображення - на рис. 2. З рисунка видно, що по ширині зони наплавлення (в даному випадку $S = r_2 - r_3 = 0,125 - 0,075 = 0,05$ м) температура майже однакова, відхилення від заданої складає 2-3% і рівна 1200°С за час $\tau = 22$ с (що дуже важливо при індукційному наплавленні). Оскільки твердий сплав (для прикладу ПГ-С1) розплавляється від поверхні основного металу, тим самим досягається більш рівномірна товщина шару наплавлювального металу по всій робочій поверхні.

Зауважимо також, що для реалізації знайденого оптимального коефіцієнта електромагнітного екранування $K_e = 0,655$ досить (згідно з формулою (6)) взяти мідну пластинку товщиною $d_e = 0,021$ мм, тобто практично можна зробити напилення теплового екрана мідним порошком або наклеїти мідну фольгу такої товщини, що забезпечить умови її достатнього остигання.

При розрахунках прийняті наступні дані:

Для диска:

$$2h = 3 \text{ мм}; \quad c = 846 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}^\circ\text{С}}; \quad \lambda = 40 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^\circ\text{С}}; \quad \gamma = 5969,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \sigma = 1,25 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

$$r_2 = 1,25 \text{ м}; \quad \alpha = 455 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{С}}; \quad r_3 = 0,075 \text{ м}; \quad \tau = 22 \text{ с}; \quad T_{зд} = 1200 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Основний метал — сталь Ст3; наплавлювальний сплав ПГ-С1; товщина наплавлюваного металу 0,8...1,5 мм.

Для індуктора (мідного):

$$\mu = 2,75\mu_0; \quad \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}; \quad \omega = 2,763 \cdot 10^{-6} \text{ Гц};$$

$$c_1 = 5,0 \text{ мм}; \quad c_2 = 8,0 \text{ мм}; \quad \rho = 0,17 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

$T_{зд}=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $r_3=0,075\text{ м}$
 $r_2=0,125\text{ м}$
 $a=7\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$
 $K_T=0$
 $r_{12}=-0,31333$

Таблиця 1- Результати обчислень температури в різний момент часу в залежності від радіуса диска для випадку, коли $S = r_2 - r_3 = 0,125 - 0,075 = 0,05\text{ м}$

Корегуючий коефіцієнт 1

$Bi=0,034125$
 $m^2=7583,333$

Радіуси диска (м)	t=22 с		t=22		t=18		t=13,5		t=9		t=3,5 (с)	
	точно	прибл. 22	точно 18	прибл. 18	точно 13,5	прибл. 13,5	точно 9	прибл. 9	точно 3,5	прибл. 3,5		
0,010	1023,71	996,613	792,95	760,2834	543,55	535,0702	347,63	340,5342	129,82	128,2581		
0,020	1036,20	1025,498	802,74	782,3191	550,4	550,5784	352,2	350,4041	131,79	131,9755		
0,030	1052,42	1055,221	815,15	804,9934	558,69	566,5361	357,25	360,5601	133,33	135,8006		
0,040	1079,77	1085,805	836,58	828,325	573,66	582,9563	367,11	371,0104	137,38	139,7366		
0,050	1108,96	1117,275	859,19	852,3327	589,78	599,8524	376,76	381,7635	140,55	143,7867		
0,060	1146,96	1149,658	889,09	877,0363	610,06	617,2383	390,55	392,8284	145,98	147,9541		
0,070	1178,64	1182,979	914,1	902,4559	627,75	635,128	402,31	404,2139	150,74	152,2423		
0,075	1199,76	1200	934,13	915,4407	642,39	644,2664	412,48	410,0299	155,25	154,4328		
0,080	1202,21	1200	931,55	915,4407	639,98	644,2664	410,35	410,0299	154,59	154,4328		
0,090	1204,68	1200	934,36	915,4407	641,67	644,2664	411,21	410,0299	154,01	154,4328		
0,095	1205,64	1200	935,54	915,4407	641,96	644,2664	411,99	410,0299	152,86	154,4328		
0,100	1205,64	1200	937,72	915,4407	644,25	644,2664	413,08	410,0299	154,9	154,4328		
0,105	1205,93	1200	935,57	915,4407	642,79	644,2664	412,16	410,0299	154,57	154,4328		
0,120	1201,72	1200	934,56	915,4407	641,96	644,2664	411,99	410,0299	154,62	154,4328		
0,120	1201,99	1200	933,56	915,4407	642,76	644,2664	413,5	410,0299	156,55	154,4328		
0,124	1201,74	1200	933,84	915,4407	643,65	644,2664	414,78	410,0299	157,89	154,4328		
0,125	1199,59	1200	932,22	915,4407	642,54	644,2664	414,1	410,0299	157,67	154,4328		

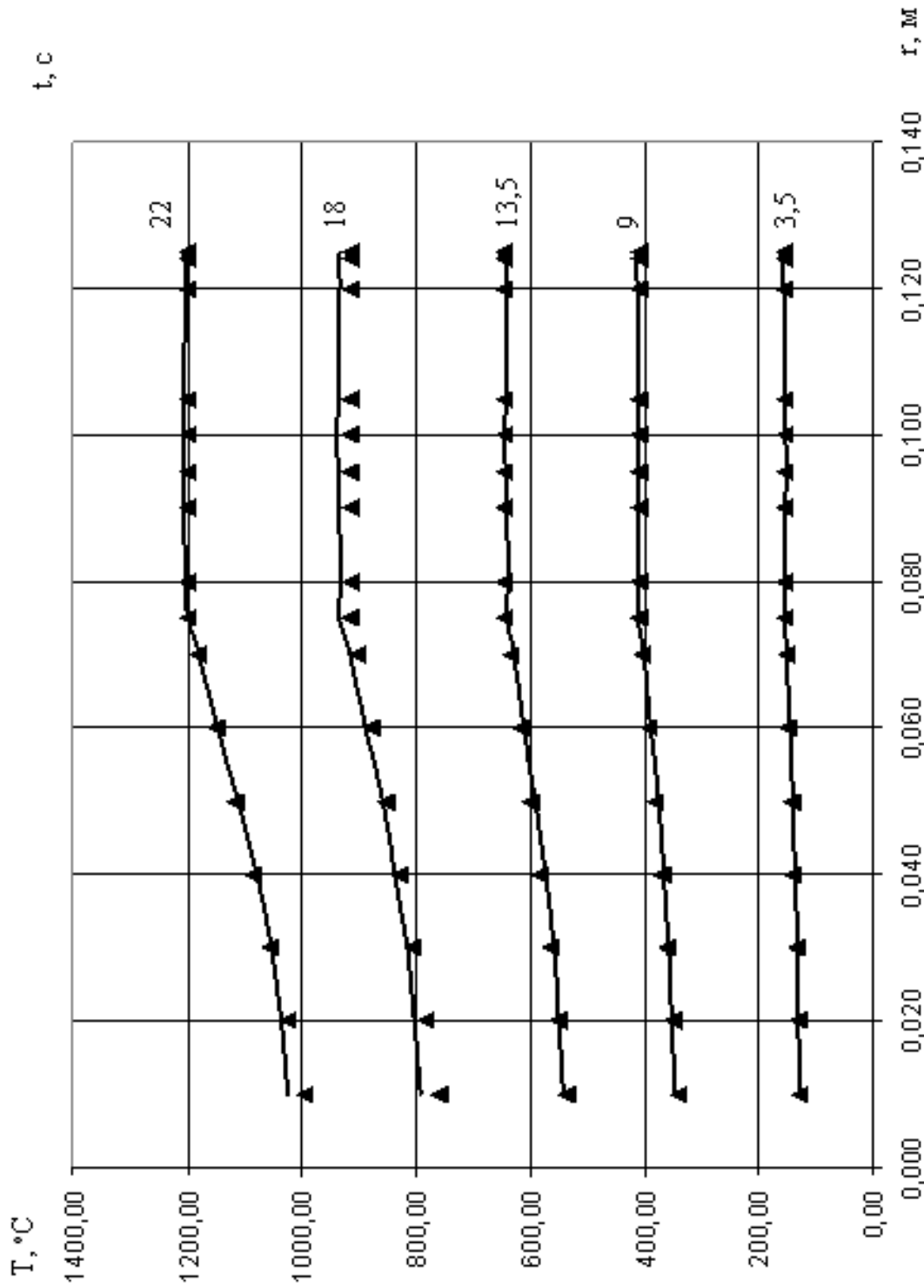


Рисунок 2 - Розподіл температури за радіусом диска $r_2 = 0,125$ м для різних моментів часу (ширина зони нагівлення складає $S = r_1 - r_2 = 0,125 - 0,075 = 0,05$ м).

Для електромагнітного екрана (мідного):

$$\sigma_e = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,17 \cdot 10^{-7}} = 58,8 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}};$$

$$\mu_e = \mu \cdot \mu_0 = 1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} = 12,56 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}; K_e = 0,655.$$

Для теплового екрана (азбестошифер):

$$d_T = 0,02 \text{ м}; \lambda_T = 0,17 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}; \alpha_T = 8,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}; K_T = \frac{\lambda_T}{d_T \alpha} = 0,0192.$$

Проведено також підрахунки у випадку, коли зона наплавлення є значно вужчою за попередню і дорівнює $S = r_2 - r_3 = 0,125 - 0,105 = 0,02 \text{ м}$.

В даному випадку параметри системи, виготовленої з таких же матеріалів, будуть наступні: $r_3 = 0,105 \text{ м}$; $a_n = 0,1025 \text{ м}$; $A = 165$; $K_e = 0,78$; $h_n = 0,0245 \text{ м}$; $B_i = 0,034$; $h_e = 0,0072 \text{ м}$; $a_e = 0,138 \text{ м}$.

Результати обчислень температури в такому випадку в різні моменти часу представлені в табл. 2 при відповідних параметрах нагрівальної системи, а графічні зображення температури показані на рис. 3 для цих же параметрів.

В даному випадку також кінцева температура нагрівання в зоні наплавлення відхиляється не більше, ніж на 2-3%.

Числові дослідження показують, що графічні залежності температури (що створюється нагрівальною системою) від радіуса диска у випадку, коли вони пологі, добре апроксимуються такими виразами

$$T = T_{01} \text{ при } r_3 \leq r \leq r_2.$$

$$T = T_{01} e^{\frac{(r-r_3)}{\beta}} \text{ при } 0 \leq r \leq r_3, \quad (15)$$

де T_{01} визначається за формулою (14), а β назвемо коефіцієнтом нагрівальної системи, який визначається з умови найкращого співпадання температури, знайденої за формулами (11) і (12).

Підрахунки залежності температури від радіуса диска і часу нагрівання, знайдені за допомогою формул (11), (12), зображені на рис. 2 і 3 суцільними кривими, а за приблизними формулами (15) і (14) – трикутними знаками (Δ). Відхилення від значень температури, знайдених за формулою (11), не перевищує 2-3%. В першому і другому випадках коефіцієнт нагрівальної системи $\beta = 0,35$. У випадку, коли зона наплавлення дорівнює 20 мм, у формулі (14) замість m^2 слід використовувати $0,9m^2$, тобто корегуючий коефіцієнт, дорівнює 0,9, тоді як в першому випадку він дорівнює 1. Приблизні формули визначення температури, знайдені таким чином, дають можливість достатньо точного її інженерного дослідження для даної нагрівальної системи.

$T_{зд}=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $r_3=0,105\text{ м}$
 $r_2=0,125\text{ м}$
 $a=7\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$
 $\alpha=455\text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$
 $\lambda=40\text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$
 $h=0,0015\text{ м}$
 $Bi=0,034125$
 $m^2=6825;$
 $\tau=22\text{ с}$
 $\beta=0,28$

$r12=-0,26917$

Таблиця 2 – Результати обчислень температури в різний момент часу в залежності від радіуса диска для випадку, коли $S = r_2 - r_3 = 0,125 - 0,105 = 0,02\text{ м}$

$m^2=7583,333$ Корегуючий коефіцієнт 0,9

$t=$ 22 18 13,5 9 3,5 (с)

Радіуси диска (м)	точно 22	прибл. 22	точно 18	прибл. 18	точно 13,5	прибл. 13,5	точно 9	прибл. 9	точно 3,5	прибл. 3,5
0,010	897	868,9803	695	671,3038	476	477,9869	304	306,8475	114,00	116,2705
0,020	909	900,5761	704	695,7122	482	495,3663	309	318,0043	116,00	120,4981
0,030	922	933,3208	714	721,0081	489	513,3777	313	329,5669	117,00	124,8793
0,040	950	967,2561	736	747,2238	504	532,0439	323	341,5498	121,00	129,4199
0,050	983	1002,425	761	774,3926	521	551,3889	332	353,9685	124,00	134,1256
0,060	1027	1038,873	793	802,5493	544	571,4372	348	366,8387	130,00	139,0024
0,070	1076,00	1076,646	834	831,7297	572	592,2145	366	380,1768	137,00	144,0564
0,075	1102,00	1096,045	854	846,7155	586	602,8848	375	387,0267	142,00	146,652
0,080	1128,00	1115,793	874	861,9712	600	613,7473	384	393,9999	144,00	149,2943
0,090	1172,00	1156,363	909	893,3122	624	636,0629	400	408,3257	150,00	154,7226
0,095	1195,00	1177,197	927	909,4075	637	647,5232	405	415,6827	152,00	157,5103
0,100	1211,00	1198,408	940	925,7928	646	659,19	415	423,1723	156,00	160,3482
0,105	1220,00	1220	950	942,4733	653	671,067	419	430,7968	157,00	163,2373
0,110	1221,00	1220	951	942,4733	654	671,067	427	430,7968	160,00	163,2373
0,115	1221,00	1220	953	942,4733	656	671,067	429	430,7968	162,00	163,2373
0,120	1220,00	1220	953	942,4733	659	671,067	431	430,7968	164,00	163,2373
0,125	1218,00	1220	952	942,4733	667	671,067	430	430,7968	164,00	163,2373

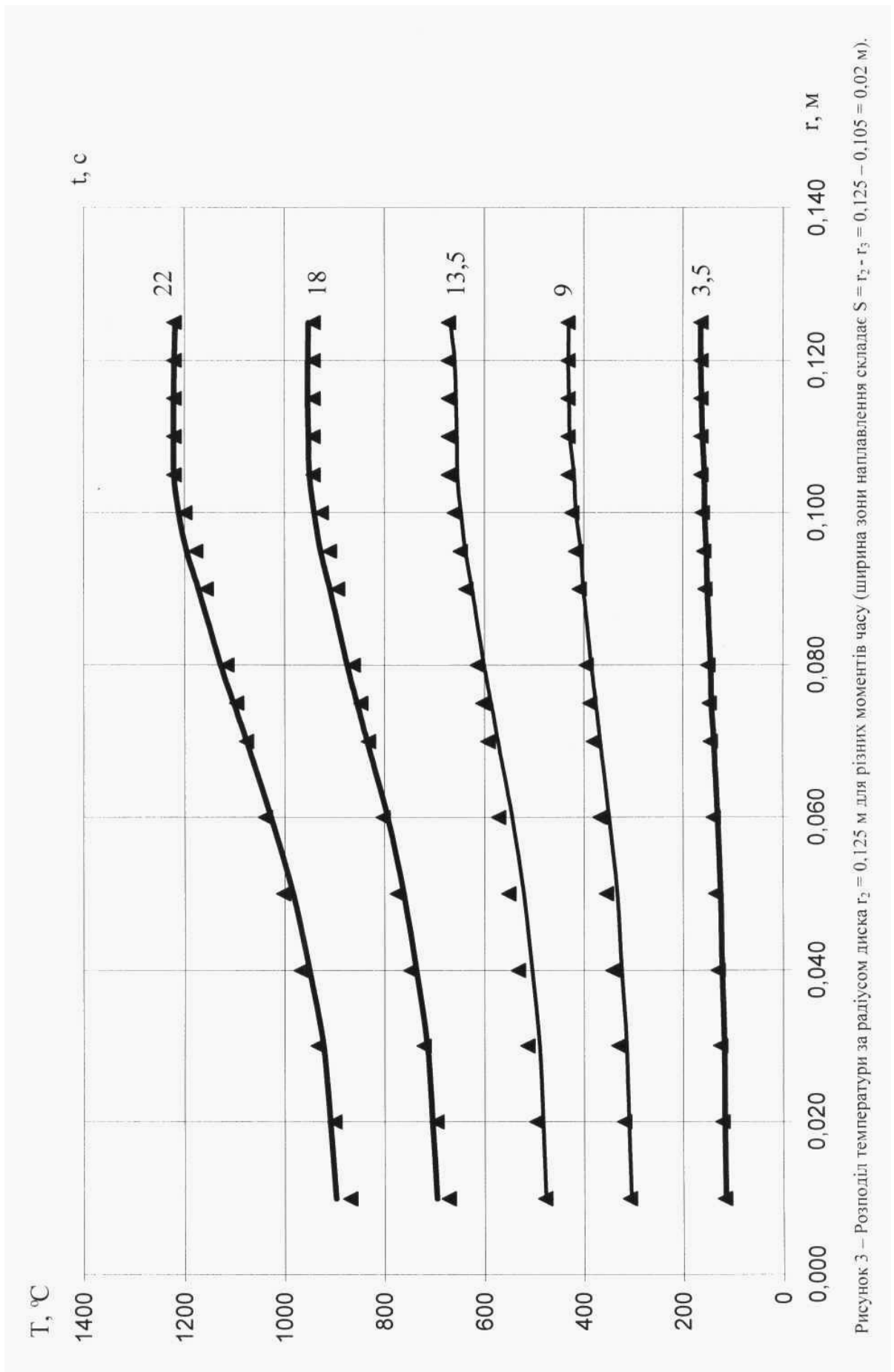


Рисунок 3 – Розподіл температури за радіусом диска $r_2 = 0,125 \text{ м}$ для різних моментів часу (ширина зони напівнагрівання складає $S = t_2 - t_3 = 0,125 - 0,105 = 0,02 \text{ м}$).

Висновок

Розроблена математична модель дозволяє проектувати складну нагрівальну систему ІТЕЕ (індуктор, тепловий та електромагнітний екрани) для наплавлення тонких сталевих дисків, довільних діаметрів і розмірів зони наплавлення, виходячи з потреб технології без проведення експерименту з метою покращення рівномірності товщини шару наплавленого металу, підвищення продуктивності процесу наплавлення, а також додаткової економії електроенергії, яка отримується внаслідок теплового та електромагнітного екранування.

Література

1. Шаблій О.Н., Пулька Ч.В., Письменный А.С. Оптимизация параметров индуктора для равномерного нагрева дисков по ширине зоны наплавки с учетом экранирования // Автомат. сварка. – 2002. - №11. – С. 24-26.
2. Шаблій О.Н., Пулька Ч.В., Будзан Б.П. Оптимизация энергозатрат при индукционной наплавке тонкостенных дисков // Автомат. сварка. – 1987. – № 1. – С. 36-39.
3. В.П.Исаченко, В.А.Осипова, А.С.Сукомел. Теплопередача. – 4-е изд., переработанное и дополненное. –М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

Одержано 12.04.2007 р.

УДК 621.952

В. Дзюра

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРОБКИ ПІВКРУГЛИХ ШЛІЦЕВИХ КАНАВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

Виведено рівняння для визначення висоти розміщення робочих елементів інструменту за умови забезпечення рівномірного режиму його навантаження. Досліджено закономірність розміщення робочих елементів інструменту від величини припусків, що знімаються ними на різних етапах формування півкруглих шліцевих канавок.

V. Dzyura

GROUND OF PARAMETERS OF INSTRUMENT KEY-WAY HALF-ROUND DETAILS OF MACHINES BY PLASTIC DEFORMATION

Equalization is shown out for determination of height of placing of working elements of instrument on condition of providing of the even mode of his loading. It is investigational conformity to the law of placing of working elements of instrument from the size of admittances which are taken off by them on the different stages of forming of half-round groove ditches.

Умовні позначення

S_2, S_3 – припуски, що знімаються двома послідовно розміщеними кульками, мм²;

F_1, F_2 – площі сегментів, утворених двома послідовно розміщеними кульками, мм²;

h_1 – розмір канавки, отриманий в результаті попередньої операції, мм.;

h_2 – розмір канавки після проходження попередньої кульки, мм;