

*Set out the relevance of the use of mushroom polysaccharides in plant protection from diseases and conditions develop biotechnology mikobiopreparat production of fruiting bodies of fungi (*Fomes fomentarius* (L. Fr.), Gill.). Biotechnology includes a mushroom harvesting, drying and storage, crushing, extraction, separation of the liquid fraction, the mixing of the components.*

Mushroom polysaccharides, biotechnology, fungal biomass, mikobiopreparat, fruiting body, mushroom extract size.

УДК 621.791.927

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

***Ч. В. Пулька, В. М. Барановський, доктори технічних наук
В. Я. Гаврилюк, В. С. Сенчишин, інженери
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя***

У статті описано метод індукційного наплавлення тонких фасонних дисків з використанням кільцевих індукторів шляхом застосування теплових і електромагнітних екранів. Розроблено математичну модель, яка характеризує витрати енергії під час індукційного наплавлення тонких сталевих дисків.

Індукційне наплавлення, сталевий диск, електромагнітний екран, теплове поле, енергія, математична модель.

Постановка проблеми. Широке застосування в сільськогосподарській техніці знайшли робочі органи, які виконано у вигляді дисків лущильників, ножів гичкорізів, дисків для зрізування соняшнику тощо. Для підвищення зносостійкості та самозагострювання під час експлуатації робочі поверхні відновлюють різними методами наплавлення. Найчастіше для відновлення деталей, виконаних у вигляді тонких дисків використовують індукційне наплавлення порошкоподібними твердими сплавами.

Аналіз останніх досліджень. У працях [1, 2] розкрито сутність способу індукційного наплавлення тонких фасонних дисків з використанням кільцевих індукторів спеціальної конструкції. При цьому наплавлення проходить одночасно по всій зоні зміцнення з використанням теплових і електромагнітних екранів, але без обертання

© Ч. В. Пулька, В. М. Барановський, В. Я. Гаврилюк, В. С. Сенчишин, 2015

деталі відносно індуктора. За такого способу відновлення робочих органів підвищується продуктивність праці в 4–5 рази та майже відсутня деформація робочих поверхонь, тобто усувається необхідність проведення додаткової операції рихтування.

На основі проведених досліджень було встановлено, що відомий спосіб наплавлення можна вдосконалити шляхом підведення питомої потужності нагрівання за відповідним законом і тим самим досягнути зменшення електроенергії, необхідної для процесу наплавлення.

Мета досліджень – зменшення затрат енергії для відновлення поверхонь робочих органів методом наплавлення шляхом розробки математичної моделі та оптимізації параметрів процесу.

Результати досліджень. У тонкому фасонному диску (рис. 1) на заштрихованій області необхідно створити температуру $T_{зд}$, яка забезпечить якісне наплавлення за мінімальних затратах енергії.

Для запобігання втрат тепла всю область диска, крім зони наплавлення термічно ізолюємо, тобто встановлюємо тепловий екран (рис. 1).

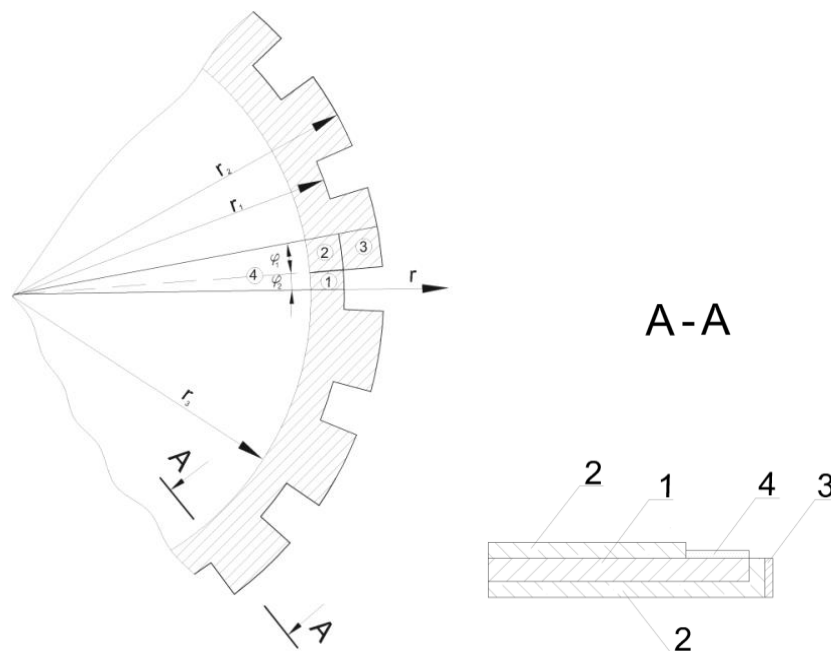


Рис. 1. Фасонний диск: 1 – диск; 2 – тепловий екран; 3 – електромагнітний екран; 4 – наплавлений метал).

Рівняння теплопровідності для елемента диска з урахуванням усередненої температури і питомої потужності за його товщиною має вигляд [3]:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} - mT + \frac{W(r, \varphi, t)}{\lambda_D}, \quad (1)$$

де: $T = T^* - T_c$ – температура диска та середовища, $T^* = const$, $T_c = const$; $m = B_i / 2h^2$, $B_i = 2hk$ – критерій Біо, $2h$ – товщина диска; $k = \alpha / \lambda$, α – коефіцієнт тепловіддачі, λ – теплопровідність матеріалу диска; $W(r, \varphi, t)$ – функція розподілу питомої потужності джерела; $\lambda_D = ca\gamma$, c – питома теплоємність, a – теплопровідність, γ – густина.

У нашому випадку критерій B_i відрізняється від нуля при $r \geq r_3$, а за $r < r_3$ критерій $B_i = 0$. У зв'язку з тим, що температурне поле створюється за допомогою кільцевих індукторів, воно матиме розподіл одночасно по всій зоні наплавлення, за якого в диску на лініях $\varphi = 0$ і $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ (рис. 1) відсутні потоки тепла в кільцевому напрямку, тобто при цьому $\partial T / \partial \varphi = 0$. На всіх інших лініях, які розділяють області 1, 2, 3, 4 рівні температури і потоки тепла, а на вільних торцях має місце умова конвективного теплообміну. Також відсутній потік тепла $\lambda(\partial T / \partial r)$ через центр диска.

Запишемо наступні граничні умови та умови спряження:

$$\partial T_4 / \partial r = 0 \text{ при } r = 0; \quad (2)$$

$$T_2 = T_3; \partial T_2 / \partial r = \partial T_3 / \partial r; \partial T_1 / \partial r + kT_1 = 0 \text{ при } r = r_1; \quad (3)$$

$$\partial T_3 / \partial r + kT_3 = 0 \text{ при } r = r_3; \quad (4)$$

$$T_1 = T_4; \partial T_1 / \partial r = \partial T_4 / \partial r; T_2 = T_4; \partial T_2 / \partial r = \partial T_4 / \partial r \text{ при } r = r_3; \quad (5)$$

$$\partial T_2 / \partial \varphi = 0; \partial T_3 / \partial \varphi = 0; \partial T_4 / \partial \varphi = 0 \text{ при } \varphi = \varphi_1 + \varphi_2; \quad (6)$$

$$T_1 = T_2; \partial T_1 / \partial r = \partial T_2 / \partial r; \partial T_3 / r \partial \varphi - kT_3 = 0 \text{ при } \varphi = \varphi_1; \quad (7)$$

$$\partial T_1 / \partial \varphi = 0; \partial T_4 / \partial \varphi = 0 \text{ при } \varphi = 0. \quad (8)$$

Тут і в подальшому величини з індексами 1, 2, 3, 4 відповідають областям диска 1, 2, 3, 4 (рис. 1).

Початкові умови будуть наступними:

$$T_1 = 0; T_2 = 0; T_3 = 0; T_4 = 0 \text{ при } t = 0. \quad (9)$$

В кінці наплавлення, після припинення подачі енергії від теплових джерел, температура в зоні наплавлення повинна бути рівна заданій $T_{3\partial}$, тобто:

$$T_1 = T_{3\partial}; T_2 = T_{3\partial}; T_3 = T_{3\partial} \text{ при } t = \tau, r \geq r_3. \quad (10)$$

Якщо потужність теплових джерел задана, тоді шляхом розв'язку рівняння (1) за граничних умов (2)-(8) і тимчасових умов (9) отримаємо розподіл температури в диску.

У нашому випадку потужність теплових джерел не задана. Тому закон зміни теплових джерел знаходимо з умови мінімуму енергії, яка необхідна для наплавлення, тобто:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\tau \left(\int_{r_2}^{r_1} W_1^2 r dr d\varphi + \int_{r_2}^{r_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} W_2^2 dr d\varphi + \int_{r_1}^{r_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_1 + \varphi_2} W_3^2 dr d\varphi + \int_0^{r_2} \int_0^{\varphi_1 + \varphi_2} W_4^2 dr d\varphi \right) dt \rightarrow \min. \quad (11)$$

Використовуючи метод множників Лагранжа [4] для визначення режимів накладання питомих потужностей, отримуємо формули:

$$W_i = \bar{T}_i / \lambda_D, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (12)$$

де: \bar{T}_i задовольняють диференціальному рівнянню:

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{T}_i}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{a} \frac{\partial \bar{T}_i}{\partial t} - m \bar{T}_i = 0, \quad (13)$$

граничним умовам і умовам спряження, аналогічним (2)–(8) та тимчасовій умові:

$$\bar{T}_4 = 0 \quad \text{при} \quad t = \tau. \quad (14)$$

Застосувавши до рівнянь (1) і (13) перетворення Лапласа за формулою $\tilde{f} = \int_0^\infty f e^{-st} dt$ та враховуючи при цьому початкові умови, отримуємо:

$$\frac{\partial^2 \tilde{T}_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{T}_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \tilde{T}_i}{\partial \varphi^2} - \left(m + \frac{s}{a} \right) \tilde{T}_i + \frac{\tilde{W}_i}{\lambda_D} = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\bar{T}}_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\bar{T}}_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{\bar{T}}_i}{\partial \varphi^2} - \left(m - \frac{s}{a} \right) \bar{\bar{T}}_i - \frac{\bar{T}_i^0}{a} = 0, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (16)$$

де: \bar{T}_i^0 – значення множників Лагранжа при $t = 0$.

Необхідно також відмітити, що функції \tilde{T}_i , $\bar{\bar{T}}_i$ повинні задовольняти граничним умовам та умовам спряження (2)–(8), в яких над функціями необхідно поставити знак \sim .

Оскільки в областях 1, 2, 3 (рис. 1) в кінці наплавлення $t = \tau$ необхідно мати задану температуру $T_{зд}$, величини \bar{T}_1^0 , \bar{T}_2^0 , \bar{T}_3^0 необхідно визначити із умов (10). В області 4 достатньо \bar{T}_4^0 знайти із умови (14). Після знаходження функцій \tilde{T}_i , $\bar{\bar{T}}_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$), їх оригінали визначаємо за теоремою згортання, а необхідні питомі потужності зовнішніх теплових джерел \tilde{W}_i за формулами (12).

Розв'язок системи рівнянь (15), (16) за вказаних граничних умов і умов спряження є доволі складним і громіздким. Тому в області наплавлення введемо усереднені значення величин \tilde{T}_i , прийнявши їх незалежними від координат. Тоді згідно з (12) і (15) приймаємо $\tilde{W}_1 = \tilde{W}_2 = \tilde{W}_3$, $\bar{\bar{T}}_1 = \bar{\bar{T}}_2 = \bar{\bar{T}}_3$, які також не залежать від координат.

Із (15) і (16) з урахуванням (12) знаходимо:

$$\bar{\bar{T}} = 2 \frac{\bar{T}^0}{s - am}; \quad \tilde{T} = 2 \frac{\bar{T}^0 a}{\lambda_D^2 (s^2 - a^2 m^2)}. \quad (17)$$

Оригінали останніх величин з урахуванням умови $T(t = \tau) = T_{зд}$, тобто шукані функції будуть мати вигляд:

$$\bar{T} = 2\bar{T}^0 e^{atm}; T = 2 \frac{\bar{T}^0}{\lambda_D^2} sh(atm), \quad (18)$$

де: $\bar{T}^0 = T_{30} \lambda_D^2 m / 2 sh(am\tau)$, а питомі потужності, які знайдено за допомогою (12), мають вигляд:

$$W = W_1 = W_2 = W_3 = \frac{\lambda_D m}{sh(am\tau)} T_{30} e^{amt}. \quad (19)$$

На основі аналізу (18), (19) встановлено, що для отримання необхідної температури в зоні наплавлення за час τ за мінімальних затрат енергії, питому потужність теплових джерел необхідно змінювати за законом (19). Оскільки область $0 \leq r \leq r_3$ термічно ізольована та не підлягає наплавленню, використання теплових джерел в цій області недоцільне, тобто тут $W_4 = 0$.

Температурне поле в області $0 \leq r \leq r_3$ знаходимо за допомогою рівняння (15), в якому необхідно прийняти $W_4 = 0$, а на краю області $r = r_3$ температура змінюється за відомим законом $T_4 = T$, де T задано співвідношенням (18).

З урахуванням симетрії температурного поля маємо:

$$\tilde{T}_4 = AI_0(x) + Bk_0(x), \quad (20)$$

де: $x = ar$, $a = \sqrt{s/a}$; $I_0(x)$, $k_0(x)$ – модифіковані функції Бесселя і Ганкеля нульового порядку.

Температура в центрі диска повинна бути обмежена, тому приймаємо $B = 0$. Задовольнивши вимоги $\tilde{T}_4 = \tilde{T}$ при $r = r_3$ для \tilde{T}_4 отримаємо наступний вираз:

$$\tilde{T}_4 = \frac{I_0 \sqrt{rs/a}}{sh(am\tau)(s^2 - a^2 m^2) I_0(\sqrt{r_2 s/a})} am T_{30}. \quad (21)$$

Застосувавши теорему згортання з (21) визначимо температуру T_4 :

$$T_4 = \left(\frac{I_0 \sqrt{mr}}{2am I_0(\sqrt{mr_2})} e^{amt} - \frac{J_0(\sqrt{mr}) e^{-am\tau}}{2am J_0(\sqrt{mr_2})} + \right. \\ \left. J_0 \left(a_k \frac{r}{r_2} e^{-a \left(\frac{a_k^2}{r_2^2} \right) \tau} \right) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{r_2}{a \left[\left(\frac{a_k^2}{r_2^2} \right)^2 - m^2 \right] \frac{r_2^2 J_1(a_k)}{2a_k}} \right) \frac{am}{sh(am)} T_{30}, \quad (22)$$

де: $J_0(x)$, $J_1(x)$ – функції Бесселя першого роду і першого порядку;

a_k – корені рівняння; $J_0(a_k) = 0$.

Для оцінки економії електроенергії, яка досягається завдяки зміні питомої потужності, за оптимальним (енергоощадним) законом знайдемо постійну питому потужність, що визначається за формулою (19) яка необхідна для нагрівання диску за час t до заданої температури $T_{з0}$ в зоні наплавлення:

$$T = \frac{W}{\lambda_D m} (1 - e^{-amt}), \text{ або } W = \frac{T_{з0} \lambda_D m}{1 - e^{-amt}}. \quad (23)$$

Тому, що питома потужність змінюється за законом (19), тоді питома енергія визначається:

$$N_1 = \int_0^\tau \frac{T_{з0} \lambda_D m}{sh(am\tau)} e^{amt} dt = \frac{T_{з0} \lambda_D}{sh(am\tau) a} (e^{am\tau} - 1). \quad (24)$$

У випадку постійної питомої потужності, яка визначається за формулою (25), отримуємо:

$$N_2 = \frac{T \lambda}{1 - e^{-am\tau}} m \tau. \quad (25)$$

Тоді економію електроенергії знайдемо за формулою:

$$\Delta \frac{N_1 - N_2}{N_2} 100\% = \left\{ 1 - \frac{2[sh(am\tau) - 1]}{am\tau sh(am\tau)} \right\} 100\%. \quad (26)$$

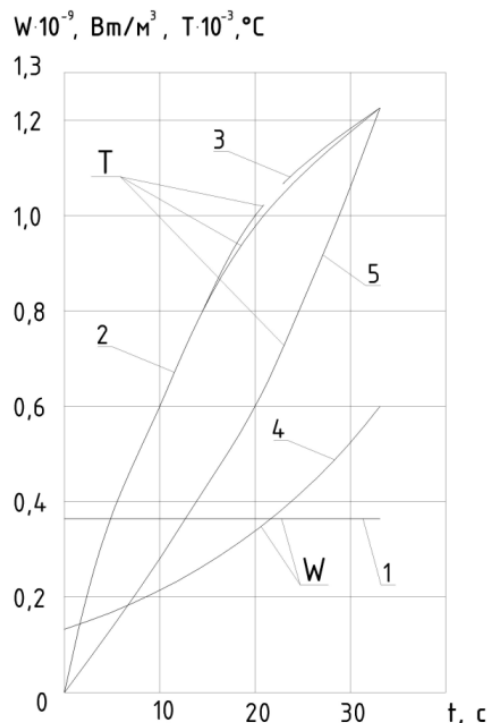


Рис. 2. Зміна питомої потужності і температури в зоні наплавлення залежно від часу: 1, 2 – теоретична питома потужність і температура; 3 – експериментально визначена температура; 4, 5 – оптимальна питома потужність і температура.

На основі результатів теоретичних досліджень і експериментальних даних отримано залежності питомої потужності об'ємних теплових джерел і температури в зоні наплавлення від її часу для випадку наплавлення порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1 на диск зі сталі Ст3 (рис. 2).

Розрахунки показують, що оптимальний (енергоощадний) режим нагрівання забезпечує економію 15...25% енергії (в залежності від наплавлювальних матеріалів). Наприклад, при наплавленні матеріалом ПГ-АН9 (НХ8С2Р3П) економія складає 23%, а при наплавленні матеріалом ПГ-С1-15%.

Характерною ознакою розподілу температурного поля по радіусу диска (рис. 3) є те, що при віддаленні від зони наплавлення до центра диска температура швидко спадає так, що починаючи з середини радіуса диска вона практично рівна температурі навколишнього середовища, тобто всередині цієї області диск майже не нагрівається.

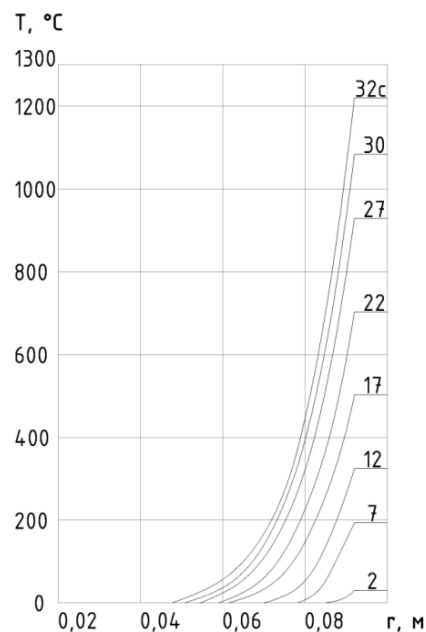


Рис. 3. Розподіл температури залежно від радіуса диска для різних проміжків часу наплавлення.

Висновок. Зміна в часі питомої потужності теплових джерел в зоні наплавлення тонких фасонних дисків за енергоощадним режимом забезпечує економію електроенергії в розмірі 15...25 % залежно від використовуваних наплавлювальних матеріалів.

Список літератури

1. Шаблій О. Н. Оптимизация индукционной наплавки тонких дисков с учетом теплового и электромагнитного экранирования / О. Н. Шаблій, Ч. В. Пулька, А. С. Письменный // Автоматическая сварка. – 2003. – № 9. – С. 22–25.

2. Патент № 93288 UA, МПК В23К 13/00. Пристрій для наплавлення тонкостінних деталей / Шаблій О. М., Пулька Ч. В., Базар М. С.; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя. – № а 200905554; заявл. 01.06.2009; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
4. Био М. Вариационные принципы в теории теплообмена / М. Био, А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.
5. Фролов В. В. Теоретические основы сварки / В. В. Фролов. – М.: Высшая школа, 1970. – 592 с.

В статье описано метод индукционной наплавки тонких фасонных дисков с использованием кольцевых индукторов путем применения тепловых и электромагнитных экранов. Разработано математическую модель, которая характеризует затраты энергии во время индукционной наплавки тонких стальных дисков.

Индукционная наплавки, стальной диск, электромагнитный экран, тепловое поле, энергия, математическая модель.

The paper describes the induction welding method of thin shaped disks with using of ring inductors by application of heat and electromagnetic screens. Developed a mathematical model that describes the energy consumption during the induction welding of thin steel disks.

Induction welding, steel disc, electromagnetic screen, thermal field, energy, mathematical model.

УДК 621.43.068.4

ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ШКІДЛИВИХ КОМПОНЕНТІВ У ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗАХ ДВИГУНІВ ЛІСО- І СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТРАКТОРІВ

О. А. Бешун, О. А. Марус, кандидати технічних наук

Розглянуто основні шкідливі компоненти відпрацьованих газів двигунів сучасних сільсько- і лісогосподарських тракторів, проаналізовано механізми, причини та умови їх утворення, а також шляхи мінімізації шкідливих викидів.

Екологія, двигун, дизель, токсичність, димність, відпрацьовані газу, викиди, норма, стандарт, Stage, Euro, Tier.

© О. А. Бешун, О. А. Марус, 2015