

жень з 10 до 40 % за весь період експлуатації середнє напрацювання до відмови зменшується до 6 % (див. рисунок).

3. При збільшенні коефіцієнта динамічного навантаження зубців k_d з 1,1 до 1,3, тобто в 1,2 рази, середнє напрацювання до відмови зменшується в середньому на 5 %. Це зменшення зростає із збільшенням коефіцієнта k_2 .

1. Сухоруков Ю.Н. Модификация эвольвентных цилиндрических зубчатых колес: Справочник. К., 1992. 2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М., 1977. 3. Кузьо И.В., Кичма А.А., Микольский Ю.Н. Динамические нагрузки в зацеплении открытой зубчатой передачи привода вращающейся печи // Вестн. Львов. политехн. ин-та. 1979. № 134. С.23–25.

УДК 539.377:536.12

Величко Л.Д., Сорочак О.З.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра теоретичної механіки та економіки

ОПТИМІЗАЦІЯ НАГРІВАННЯ ЦЕМЕНТНОЇ ПЕЧІ

© Величко Л.Д., Сорочак О.З., 2000

Розглянута задача оптимального за швидкодією керування нагріванням цементної печі при обмеженнях на тангенціальні термонапруження і температуру середовища нагрівання. Зроблено висновок про те, що в початковий період нагрівання цементної печі температура середовища нагрівання може дорівнювати максимальному значенню протягом певного часу, тривалість якого визначається механічними і теплофізичними характеристиками корпусу і футерівки, що дає змогу скоротити тривалість нагрівання обертової печі.

У процесі нагрівання цементної печі має місце нестационарний тепловий режим, який характеризується вищими температурними напруженнями у футерівці і корпусі, ніж в стаціонарному режимі. Найбільші температурні напруження будуть у футерівці, яка розташована у зоні спікання. З метою запобігання утворення тріщин у футерівці внаслідок термонапружень, швидкість нагрівання цементної печі не може бути довільною. У даній роботі розглядається задача оптимального за швидкодією керування нагріванням цементної печі при обмеженнях на тангенціальні термонапруження і температуру середовища нагрівання.

При математичному моделюванні даної задачі передбачалось, що виконуються такі основні завдання:

- футерівка (цегла + розчин) вважається однорідним ізотропним тілом з модулем пружності E_1 , коефіцієнтом Пуансона γ_1 , коефіцієнтом лінійного теплового розширення α_1 ;

- аналогічно допускається, що корпус печі – ізотропне тіло з модулем пружності E_2 , коефіцієнтом Пуансона γ_2 , коефіцієнтом лінійного теплового розширення α_2 ;
- теплофізичні і механічні величини, які характеризують властивості футерівки і корпусу, є сталими, тобто не залежать від температури, напружень та інших факторів;
- футерівка встановлена без зазорів і при початковій температурі $T_0=0$ °C знаходиться у контакті з корпусом. Між корпусом і футерівкою існує реальний механічний контакт, тобто виконується рівність радіальних напружень і переміщень у зоні контакту;
- між корпусом і футерівкою має місце "неідеальний" тепловий контакт;
- виконується гіпотеза плоских перетинів;
- температурне поле залежить тільки від часу і радіуса.

Задачу оптимального за швидкодією керування нестационарним температурним полем футерівки й корпусу в зоні спікання з врахуванням вище наведених гіпотез можна сформулювати так.

Нехай між середовищем нагрівання й футерівкою здійснюється конвекційний теплообмін [3]

$$\frac{\partial T_1(r_1, \tau)}{\partial \rho} - H_1 [T_1(r_1, \tau) - t_1(\tau)] = 0. \quad (1)$$

Необхідно знайти таку функцію керування $t_1(\tau)$, обмежену зверху

$$t_1(\tau) \leq u(\tau), \quad (2)$$

щоб при обмеженнях на тангенціальні термопружні напруження у цементній печі

$$\sigma_1(T) \leq \sigma_{\varphi\varphi}(T) \leq \sigma_2(T) \quad (3)$$

за мінімальний час τ_0 нагріти тіло з початкового стану

$$T(\rho, 0) = f(\rho), \quad \rho \in [r_1, r_2] \quad (4)$$

до кінцевого $T(\rho, \tau_0)$, який характеризується умовою

$$\max_{\rho} T(\rho, \tau_0) = T_0, \quad \rho \in [r_1, r_2]. \quad (5)$$

При цьому температурне поле $T(\rho, \tau)$ задовольняє рівняння теплопровідності [2]

$$\frac{\partial^2 T_1(\rho, \tau)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_1(\rho, \tau)}{\partial \rho} = \frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1(\rho, \tau)}{\partial \tau}, \quad \rho \in [r_1, r_k]; \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 T_2(\rho, \tau)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_2(\rho, \tau)}{\partial \rho} = \frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2(\rho, \tau)}{\partial \tau}, \quad \rho \in [r_k, r_2]; \quad (7)$$

обмеженню

$$T(\rho, \tau) \leq T_0, \quad \rho \in [r_1, r_2], \quad \tau > 0, \quad (8)$$

некерованому теплообміну на зовнішній поверхні печі (корпусу)

$$\frac{\partial T_2(r_2, \tau)}{\partial \rho} + H_2 [T_2(r_2, \tau) - t_2(\tau)] = 0, \quad (9)$$

а в зоні контакту футерівки й корпусу, за гіпотезами, виконується співвідношення

$$\beta_1 \frac{\partial T_1(r_k, \tau)}{\partial \rho} = \beta_2 \frac{\partial T_2(r_k, \tau)}{\partial \rho}; \quad (10)$$

$$\beta_1 \frac{\partial T_1(r_k, \tau)}{\partial \rho} = H_3 [T_2(r_k, \tau) - T_1(r_k, \tau)], \quad (11)$$

де ρ – радіальна координата; τ – час; $T_1(\rho, \tau)$ – температурне поле футерівки; $T_2(\rho, \tau)$ – температурне поле корпусу; H_1, H_2, H_3 – критерії Біо; β_1, β_2 – коефіцієнти теплопровідності відповідно для футерівки й корпусу; a_1, a_2 – коефіцієнти температуропровідності відповідно для футерівки й корпусу; r_1, r_2 – внутрішній і зовнішній радіуси цементної печі; $r_k - r_1$ – товщина футерівки; $\sigma_{\phi\phi}(T)$ – розрахункові тангенціальні термодпружні напруження; $\sigma_1(T)$ – гранично допустимі напруження на стискування; $\sigma_2(T)$ – гранично допустимі напруження на розтягування; $t_1(\tau)$ – температура середовища нагрівання; $t_2(\tau)$ – температура повітря біля цементної печі.

Оптимальне за швидкодією керування нагріванням цементної печі при виконанні співвідношень (1)–(9) буде здійснюватися, якщо нагрівання на окремих етапах підпорядковується умовам [2]:

$$t_1(\tau) = u(\tau);$$

$$\sigma_1(T) \leq \sigma_{\phi\phi}(T) \leq \sigma_2(T)$$

або

$$t_1(\tau) \leq u(\tau);$$

$$\sigma_1(T) = \sigma_{\phi\phi}(T) < \sigma_2(T),$$

або

$$t_1(\tau) \leq u(\tau);$$

$$\sigma_1(T) < \sigma_{\phi\phi}(T) = \sigma_2(T)$$

тобто, коли нагрівання здійснюється по верхній границі обмеження на керування або за гранично допустимими температурними напруженнями.

При побудові оптимального за швидкодією керування нагріванням цементної печі за вихідні дані для розрахунку приймалися: $a_1 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $a_2 = 1,217 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$; $\alpha_2 = 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$; $E_1 = 3,43 \text{ ГПа}$; $\gamma_1 = 0,15$; $E_2 = 205,94 \text{ ГПа}$; $\gamma_2 = 0,3$; $2r_1 = 3,5 \text{ м}$; $r_k - r_1 = 0,25 \text{ м}$; $2r_2 = 4,06 \text{ м}$; $H_1 = 47$; $H_2 = 1$; $f(\rho) \equiv 0$; $u(\tau) \equiv 1600 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_2(\tau) = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_2 = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$; $H_3 = 55$; $\sigma_1 = -20,59 \text{ МПа}$.

На рис.1 кривою 6 показано зміну температури середовища нагрівання при оптимальному за швидкодією керування нагріванням цементної печі, кривими 2, 4 – зміну температури зовнішньої $T(r_k, \tau)$ і внутрішньої $T(r_1, \tau)$ поверхонь футерівки.

На першому етапі нагрівання $0 \leq \tau \leq \tau_1 = 2 \text{ год}$. температура середовища нагрівання дорівнює гранично допустимому значенню, тобто $t_1(\tau) = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$, бо на даному етапі нагрівання термодпружні напруження не лімітують швидкості нагрівання. У момент часу $\tau = \tau_1$ тангенціальне напруження на поверхні $\rho = r_1$ досягнули гранично допустимої величини, тому другий етап нагрівання здійснюється при виконанні умови

$$\sigma_{\phi\phi}(r_1, \tau) = \sigma_1(T) \Big|_{\rho=r_1} = -20,59 \text{ МПа}, \quad \tau_1 \leq \tau \leq \tau_3 = 8,9 \text{ год}.$$

У момент часу $\tau = \tau_3 = 8,9 \text{ год}$ температура середовища нагрівання при оптимальному керуванні досягає гранично допустимої величини $t(\tau_3) = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ і виконання цього рівняння є умовою завершення другого етапу нагрівання.

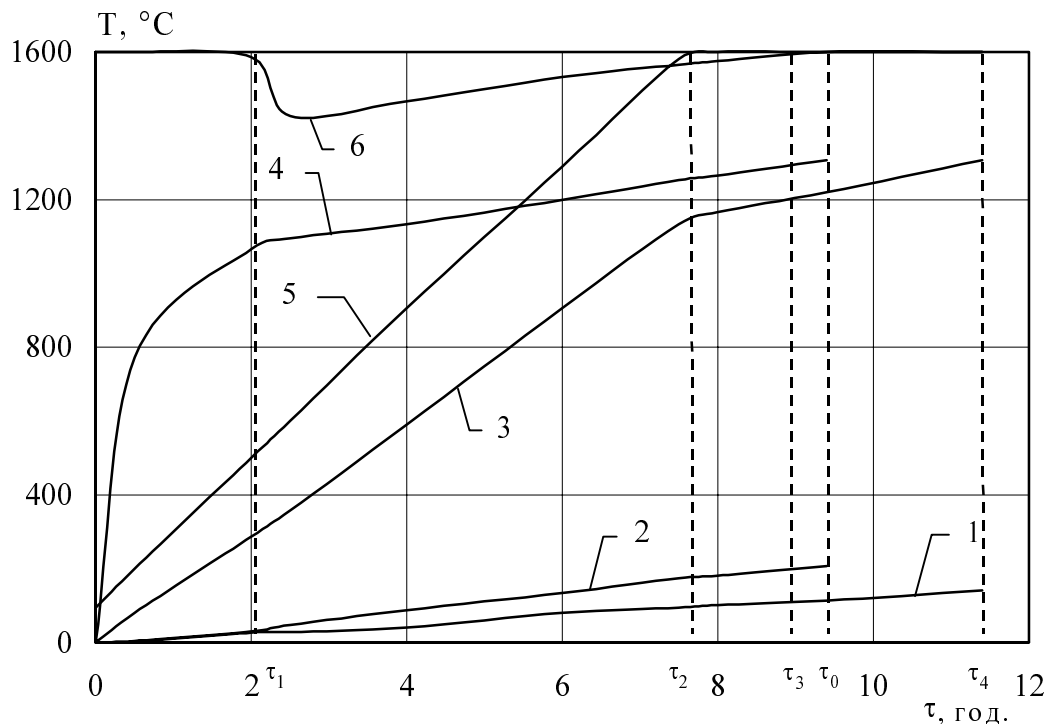


Рис.1. Режими зміни температурних полів

На наступному етапі нагрівання температура середовища нагрівання дорівнюватиме:

$$t_1(\tau) = u(\tau) = 1600^\circ \text{C}, \quad \tau_3 \leq \tau \leq \tau_0 = 9,4 \text{ год.}$$

бо температурні напруження не будуть обмежувати швидкості нагрівання. У момент часу $\tau = \tau_0 = 9,4$ год. температура на внутрішній поверхні футерівки досягає величини T_0 , тобто $T(r_1, \tau_0) = T_0 = 1300^\circ \text{C}$, і виконання даного рівняння є умовою завершення нагрівання.

Кривою 5 показано зміну температури середовища нагрівання за законом

$$t_1(\tau) = [100^\circ \text{C} + 200^\circ \text{C} \cdot \tau] \cdot [s(\tau) - s(\tau - \tau_2)] + 1600^\circ \text{C} \cdot s(\tau - \tau_2), \quad (12)$$

а кривими 1, 3 показано зміну температури на зовнішній $T(r_k, \tau)$ і внутрішній $T(r_1, \tau)$ поверхнях футерівки, де $s(\tau)$ – одинична функція Хевісайда [1]

$$s(\tau) = \begin{cases} 1 & \tau > 0 \\ 0 & \tau \leq 0 \end{cases}.$$

На рис.2 кривими 2, 3 показано розподіл тангенціальних термопружних напружень $\sigma_{\varphi\varphi}(\rho, \tau)$ в радіальному напрямку у моменти часу $\tau = \tau_1 = 2$ год. $\tau = \tau_0 = 9,4$ год. Кривою 1 показано розподіл тангенціальних термопружних напружень при лінійному законі зміни середовища нагрівання (12) в момент часу $\tau = \tau_2 = 7,5$ год.

Екстремальні радіальні термопружні напруження, як показали розрахунки, значно менші від окружних ($\sigma_{\rho\rho}/\sigma_{\varphi\varphi} \approx 0,05$).

Аналізуючи режим нагрівання цементної печі можна зробити такі висновки:

1. Максимальна і мінімальна температури футерівки при оптимальному за швидкістю режимі нагрівання у момент часу $\tau_0 = 9,4$ год становлять $\max_{\rho} T(\rho, \tau_0) = 1300^\circ \text{C}$,

$$\min_{\rho} T(\rho, \tau_0) = 221^\circ \text{C}, \quad \rho \in [r_1, r_k].$$

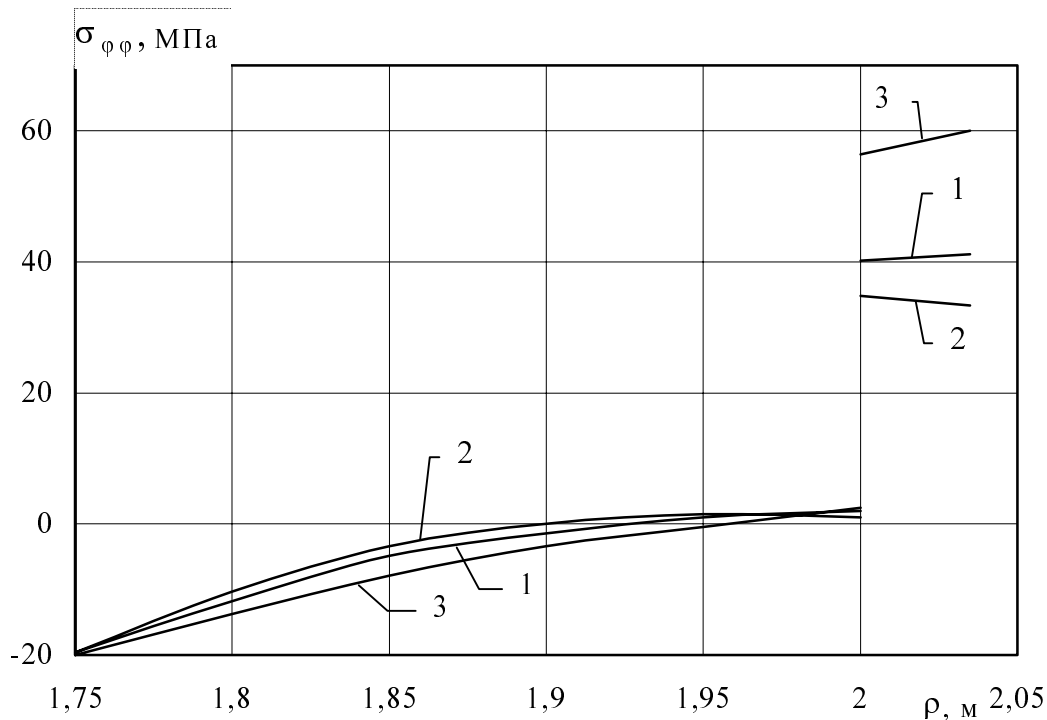


Рис.2. Розподіл тангенціальних напружень

2. Температура футерівки у момент часу $\tau_0=9,4$ год, при зміні середовища нагрівання за лінійним законом (12), характеризується величинами $\max_{\rho} T(\rho, \tau_0)=1215$ °С, $\min_{\rho} T(\rho, \tau_0)=113$ °С і максимальна температура у футерівці досягне величини $T(r_1, \tau_4)=1300$ °С у момент часу $\tau_4=11,4$ год.

3. Мінімальні тангенціальні термпружні напруження, при оптимальному за швидкістю режимі нагрівання залишаються постійними $\sigma_{\phi\phi}(r_1, \tau_0)=-20,59$ МПа упродовж часу $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_3$, а при лінійному законі зміни середовища нагрівання (12) досягають тільки величини $\sigma_{\phi\phi}(r_1, \tau_2)=-20$ МПа у момент часу $\tau=\tau_2$.

4. Радіальні термпружні напруження через незначну свою величину не лімітують швидкості нагрівання.

Резюме. У початковий період нагрівання цементної печі температура середовища нагрівання може дорівнювати максимальному значенню протягом певного часу, тривалість якого визначається механічними і теплофізичними характеристиками корпусу і футерівки, що дає змогу скоротити тривалість нагрівання оберткової печі.

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд. испр. М., 1986. 2. Вигак В.М. Оптимальное управление нестационарными температурными режимами. К., 1979. 3. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. К., 1970.