

Ляшенок А.В., Дорундяк Л.М., Дадак Ю.Р., Крупа В.М. Применение циклонов на предприятиях деревообрабатывающей отрасли

Проанализированы причины снижения популярности циклонов. Описаны требования к таким аппаратам и их место в структуре современного деревообрабатывающего предприятия. Проведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков различных типов пылеочистителей, применяемых в деревообработке. Определены перспективы использования обеспыливающих систем на базе циклонных сепараторов.

Lyashenyk A.V., Dorundyak L.M., Dadak Yu.R., Krupa V.M. Application of cyclones on the enterprises of woodworking industry

The paper analyzes the reasons for cyclone popularity decrease. The demands towards such apparatuses and their place in the structure of contemporary woodworking company are described. The paper provides comparative analysis of the advantages and disadvantages of different types of dust collectors used in wood technology. The authors determine the perspective of air-separating systems usage on the basis of cyclone separators.

УДК 539.375 *Доц. Л.О. Тисовський, канд. фіз.-мат. наук – НЛТУ України, м. Львів; асист. А.Є. Рудь, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"*

**ВИЗНАЧЕННЯ КОНТАКТНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ
ПІД ЧАС ЗМІЦНЕННЯ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ
ВИСОКОШВИДКІСНИМ ТЕРТЯМ**

Побудовано математичну модель для задачі про визначення контактної температури під час зміцнення сталевих деталей високошвидкісним тертям. Розв'язок зведено до інтегрального рівняння Фредгольма II роду відносно невідомої інтенсивності теплового потоку на ділянці контакту та зазначено шляхи числового аналізу вказаного рівняння.

Фізична постановка задачі. Оброблення високошвидкісним тертям є одним з найперспективніших методів поверхневого зміцнення сталевих деталей. Цей метод характеризується високою ефективністю та низькою собівартістю оброблення. Суть методу полягає у імпульсивній дії високих температур та тисків, що виникають внаслідок тертя інструмента-диска по поверхні заготовки. Поверхневі шари металу заготовки швидко нагріваються до температур вище точки A_{C3} . За рахунок тиску та високої швидкості нагрівання формується дрібнодисперсна гама-фаза, що не схильна до росту. Після проходження інструмента-диска поверхневі шари швидко охолоджуються за рахунок відведення тепла у середину не нагрітого металу. Результатом такої дії є утворення структури дрібнодисперсного мартенситу з великою кількістю залишкового аустеніту, твердість якої досягає 13 ГПа.

Водночас процеси, що відбуваються в поверхневих шарах металу заготовки, належним чином не досліджені. Тривають дискусії щодо чинників утворення зміцненої структури. Моделювання процесу зміцнення тертям ускладнюється величезною кількістю факторів впливу та складною їх взаємодією між собою. Визначення величини температури поверхневих шарів металу заготовки є головним завданням для моделювання процесу зміцнення високошвидкісним тертям. Спроби теоретичного визначення температури в зоні контакту диск-заготовка виконували практично всі дослідники високошвидкісного

тертя. Але, як і у роботі [1], ці моделі мали чимало спрощень та не отримали практичного застосування.

Отож, розглянемо принципову схему взаємодії інструмента-диска з поверхнею заготовки, що обробляється (рис. 1). Інструмент-диск 1 обертається з коловою швидкістю V та одночасно притискається до поверхні заготовки 2 із силою F . Заготовка рухається зі швидкістю подачі V_s .

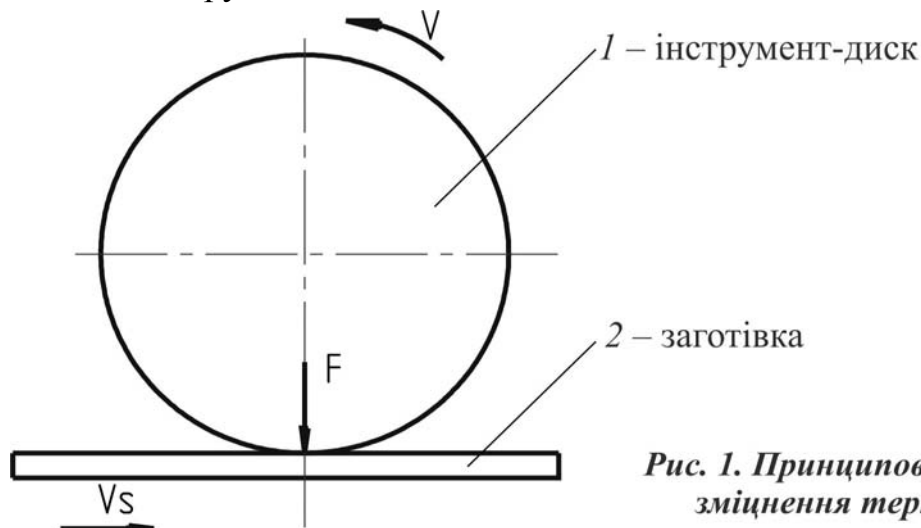


Рис. 1. Принципова схема зміцнення тертя

Математична постановка задачі. Не порушуючи загальності, будемо вважати, що контактуючі тіла є півплощинами (півпросторами). Таким чином, розглядаємо таку задачу.

Дві півплощини рухаються із швидкостями V_1 , V_2 відповідно і одночасно притискаються одна до одної із силою P . Припускаємо, що механічні і теплофізичні характеристики тіл різні і не залежать від температури. На ділянці контакту $[a, b]$ (яка вважається відомою) за рахунок сил тертя, що визначають за законом Амонтона, відбувається теплоутворення, причому кількість тепла, що виділяється є пропорційною швидкості руху тіла, коефіцієнта тертя і нормальному контактному тиску.

Вважаємо також, що між півплощинами реалізується неідеальний тепловий контакт, а поза ділянкою контакту відбувається теплообмін за законом Ньютона. Для розв'язання цієї задачі припустимо, що контактний тиск $p(x)$ є відомою функцією координати x , зокрема, він може бути постійним (рис. 2).

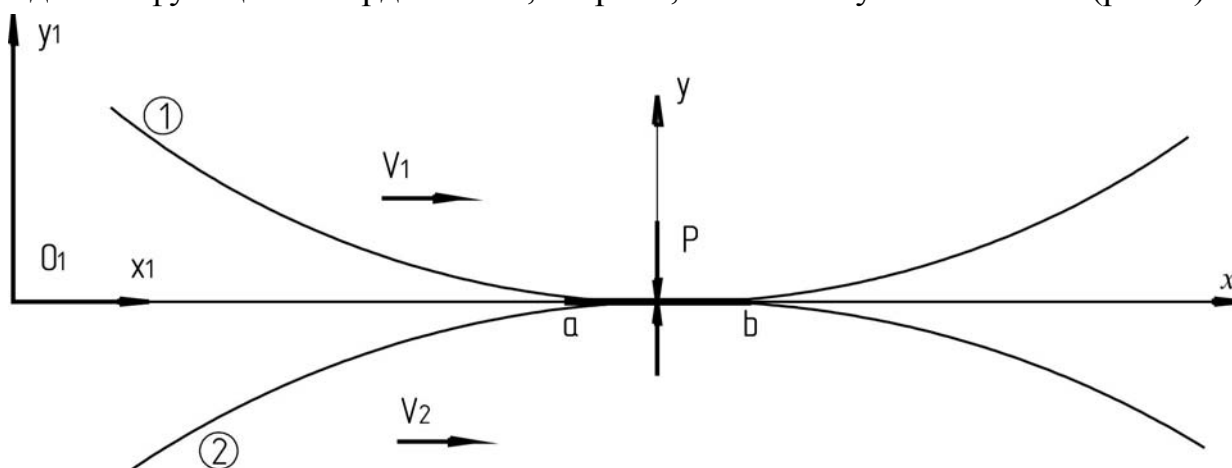


Рис. 2. Принципова схема контакту двох півплощин

Введемо в розгляд дві системи координат: нерухому $O_1x_1y_1$ і рухому Oxy , жорстко зв'язану з ділянкою контакту. Зв'язок між системами координат задаємо співвідношенням

$$x = x_1 - Vt_1$$

$$y = y_1$$

де: $V = |V_1 \pm V_2|$ – знак "-", якщо рух односпрямований, знак "+", якщо тіла рухаються в протилежних напрямках.

Зазначимо, що в рухомій системі координат всі шукані величини явно не залежать від часу t , тобто це квазістаціонарний випадок. Припускаємо, що деформації пружних півплощин не спричиняють змін температурного поля. У цьому випадку розв'язувану задачу розбивають на дві: задачу визначення температурного поля і плоску задачу теорії пружності у разі наявності температурного поля.

Метою дослідження є знаходження розв'язку першої задачі. У рухомій системі координат рівняння теплопровідності для розглядуваного випадку має вигляд [2]

$$\frac{\partial^2 T_i(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y)}{\partial y^2} + \frac{V}{K_i} \frac{\partial T_i(x, y)}{\partial x} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

Граничні умови задачі можна записати так:

$$(-1)^{i+1} \lambda_i \left. \frac{\partial T_i(x, y)}{\partial y} \right|_{y=0} = \begin{cases} q_i(x), & a \leq x \leq b, \quad y = 0 \\ h_i T_i(x), & x < a \quad \text{або} \quad x > b, \quad y = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$q_1(x) + q_2(x) = fVp(x), \quad a \leq x \leq b, \quad y = 0 \quad (3)$$

$$T_1(x) - T_2(x) = h_0 [q_1(x) - q_2(x)], \quad a \leq x \leq b, \quad y = 0. \quad (4)$$

У формулах (1-4) прийнято такі позначення: λ – коефіцієнт теплопровідності; h – коефіцієнт тепловіддачі; h_0 – контактний термоопір; f – коефіцієнт тертя; K – коефіцієнт температуропровідності.

Визначення контактної температури. Побудуємо функцію впливу для розглядуваної задачі, тобто знайдемо розв'язок задачі теплопровідності для пружної півплощини, на границі якої відбувається теплообмін за законом Ньютона і рухається з постійною швидкістю зосереджене джерело з одиничною густиною теплового потоку. Як наслідок, для температури на лінії контакту отримаємо

$$T_i(x) = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \int_a^b q_i(\xi) K_i(x - \xi) d\xi, \quad i = 1, 2. \quad |x| < \infty, \quad (5)$$

де $q_i(\xi)$ – невідомі інтенсивності теплового потоку на ділянці контакту.

$$K_i(x - \xi) = e^{\beta_i(x-\xi)} \int_0^\infty e^{-\beta_i|x-\xi|(\alpha_i+u)} \frac{\sqrt{u^2 + 2u}}{u^2 + 2u + \alpha_i^2} du, \quad \alpha_i = \frac{h_i}{\lambda_i\beta_i}; \quad \beta_i = \frac{V_i}{2k_i}. \quad (6)$$

Введемо позначення

$$q(x) = q_1(x) - q_2(x). \quad (7)$$

Тоді, враховуючи умову (3), для потоків тепла, що йдуть на ділянці контакту у верхню і нижню півплощини, отримаємо

$$q_1(x) = \frac{1}{2}[fVp(x) + q(x)], \quad q_2(x) = \frac{1}{2}[fVp(x) + q(x)]. \quad (8)$$

Перейдемо до безрозмірних змінних, ввівши нові змінні s, r за допомогою співвідношень

$$x = a_0s + b_0, \quad \xi = a_0r + b_0, \quad a_0 = \frac{b-a}{2}, \quad b_0 = \frac{b+a}{2}.$$

від інтервалу $[a, b]$ перейдемо до інтервалу $[-1, 1]$.

Якщо тепер перепозначити

$$\begin{aligned} \tilde{p}(r) &= \frac{p(a_0r + b_0)a_0}{p}; \quad \tilde{q}(r) = \frac{q_i(a_0r + b_0)a_0}{fVp}, \quad i = 1, 2 \\ \tilde{q}(s) &= \frac{q(a_0s + b_0)a_0}{fVp}, \quad Pe_i = \frac{\nu_i a_0}{rK_i}; \quad Bi_i = \frac{h_i a_0}{\lambda_i}; \quad \alpha_i = \frac{Bi_i}{Pe_i} \end{aligned}$$

де: Pe – число Пекле, параметр, що може бути інтерпретований як відношення швидкості тіла до швидкості дифузії тепла в тіло; Bi – число Біо, яке характеризує зв'язок між полем температури у твердому тілі і умовами тепловіддачі на його поверхні, то вираз для температури на лінії контакту тіл набуває вигляду

$$T_i(s) = \frac{fVp}{2\pi\lambda_i} \int_{-1}^1 \tilde{q}_i(r) K_i(s-r) dr, \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

$$\tilde{q}_1(r) = \frac{1}{2}[\tilde{p}(r) + \tilde{q}(r)], \quad \tilde{q}_2(r) = \frac{1}{2}[\tilde{p}(r) - \tilde{q}(r)], \quad (10)$$

$$K_i(s-r) = e^{Pe_i(s-r)} \int_0^\infty e^{-Pe_i|s-r|(1+u)} \frac{\sqrt{u^2 + 2u}}{u^2 + 2u + \alpha_i^2} du.$$

Підставимо співвідношення (9) в граничну умову (6). Після перетворень отримаємо

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \tilde{q}_1(r) K_1(s-r) dr - \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \int_{-1}^1 \tilde{q}_2(r) K_2(s-r) dr = H_0[\tilde{q}_1(s) - \tilde{q}_2(s)],$$

$$\text{де } H_0 = \frac{h_0\lambda_1}{a_0}.$$

Врахувавши (10), будемо мати

$$\frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \tilde{q}(r) \left[K_1(s-r) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} K_2(s-r) \right] dr - H_0 q(s) = \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \tilde{p}(r) \left[-K_1(s-r) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} K_2(s-r) \right] dr, \quad |s| < 1$$

або після перетворень остаточно отримуємо інтегральне рівняння Фредгольма II роду відносно невідомої $\tilde{q}(s)$

$$4\pi H_0 \tilde{q}(s) - \int_{-1}^1 \tilde{q}(r) K(s-r) dr = F(s), \quad |s| < \infty, \quad (11)$$

$$\text{де } K(s-r) = K_1(s-r) + \lambda K_2(s-r), \quad \lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

$$F(s) = \int_{-1}^1 \tilde{p}(r) L(s-r) dr, \quad L(s-r) = K_1(s-r) - \lambda K_2(s-r)$$

$$K_i(s-r) = e^{Pe_i(s-r)} \int_0^\infty e^{-Pe_i|s-r|(1+u)} \frac{\sqrt{u^2 + 2u}}{u^2 + 2u + \alpha_i^2} du, \quad \alpha_i = \frac{Bi_i}{Pe_i}, \quad i = 1, 2.$$

Зазначимо, що розглядувана задача (зокрема, рівняння (11)) є досить загальним і містить ряд частинних випадків, що мають самостійне практичне значення

- якщо $h_0 = 0$, то отримаємо рівність температур іл на ділянці контакту;
- якщо $h_i = 0$, то маємо випадок теплоізоляції за межами ділянки контакту;
- залежно від режимів роботи установки для фрикційного зміцнення можна розглянути різні випадки навантаження, зокрема вважати, що $p(x) = \text{const}$;
- одне з тіл, які констатують, можна вважати нерухомим.

Алгоритм числового аналізу задачі. Знайти точний аналітичний розв'язок інтегрального рівняння Фредгольма II роду (11) на сьогодні не вдається, проте є ряд числових методів розв'язування таких рівнянь. Серед них найдієвішим є метод механічних квадратур, суть якого полягає в тому, що інтеграли замінюються скінченними сумами, а для функцій будують певні інтерполяційні поліноми.

Для обчислення інтеграла використовують квадратурну формулу

$$\int_{-1}^1 \varphi(r) dr = \sum_{j=1}^n A_j \varphi(r_j),$$

де: $r_j, j = \overline{1, n}$ – деякі точки з відрізка $[-1; 1]$; A_j – коефіцієнти, які не залежать від функції $\varphi(r)$

Якщо в рівнянні (11) прийняти $s = s_i, i = \overline{1, n}$, то отримаємо основне для цього методу співвідношення

$$4\pi H_0 \tilde{q}(s_i) - \int_{-1}^1 \tilde{q}(r) K(s_i - r) dr = F(s_i), \quad i = \overline{1, n},$$

з якого після заміни інтеграла скінченною сумою отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь

$$4\pi H_0 \tilde{q}(s_i) - \sum_{j=1}^n A_j K(s_i - r_j) \tilde{q}(r_j) = F(s_i), \quad i = \overline{1, n}.$$

Розв'язавши цю систему, отримаємо значення функції $\tilde{q}(s_i) = q_i$ та функції $\tilde{q}(s)$ у вузлах $s_1, s_2, \dots, s_n$. Потім, використовуючи інтерполяційні поліноми, визначають значення функції у довільній точці відрізка $[-1, 1]$. Досить часто за аналітичний вираз наближеного розв'язку рівняння приймають функцію

$$q(s) = \frac{1}{4\pi H_0} F(s) + \sum_{j=1}^n A_j K(s_i - r_j) q_i, \quad (12)$$

яка у вузлах $r_1, r_2, \dots, r_n$ набуває значення $q_1, q_2, \dots, q_n$.

Підставивши вираз для інтенсивності теплового потоку (11) у співвідношення (5), зможемо обчислити температури співдотичних тіл на лінії контакту. Зазначимо також, що деякі алгоритми і методи наближеного розв'язку інтегральних рівнянь Фредгольма II роду наведено в роботі [3].

Література

1. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна / Ю.И. Бабей. – К. : Вид-во "Наук. думка", 1988. – 237 с.
2. Коренев Б.Г. Задачи теории теплопроводности и термоупругости. Решение в бесселевых функциях / Б.Г. Коренев. – М. : Изд-во "Наука", 1990. – 400 с.
3. Верлань А.Ф. Интегральные уравнения. Методы, алгоритмы, программы : справ. пособ. / А.Ф. Верлань, В.С. Сизинев. – К. : Вид-во "Наук. думка", 1986. – 543 с.

Тысовский Л.О., Рудь А.Е. Определение контактной температуры при укреплении стальных деталей высокоскоростным трением

Построена математическая модель для задачи об определении контактной температуры во время укрепления стальных деталей высокоскоростным трением. Решение возведено к интегральному уравнению Фредгольма II роду относительно неизвестной интенсивности теплового потока на участке контакта и отмечены пути числового анализа указанного уравнения.

Tysovskiy L.O., Rud' A.E. Determination of contact temperature during hardening of steel details by a high-speed friction

A mathematical model is built for a task about determination of contact temperature during strengthening of steel details by a high-speed friction. A decision is erected to integral equalization of Fredholm II family in relation to unknown intensity of thermal stream on the area of contact and the ways of numerical analysis of the indicated equalization are marked.

