

УДК 621.891

С.І.Криштопа

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПОВЕРХНЕВИХ І ПРИПОВЕРХНЕВИХ  
ШАРІВ МЕТАЛЕВИХ ФРИКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЛЬМІВНИХ ПРИСТРОЇВ**

*У матеріалах статті розглядається енергонавантаженість пар тертя барабанно-колодкових гальм транспортних засобів. Зроблені теоретичні дослідження фрикційної взаємодії металополімерних пар тертя. Детально аналізується процеси і явища, що відбуваються в гальмівних механізмах транспортних засобів. Розроблена математична модель визначення термічних напружень пар тертя в результаті фрикційної взаємодії барабанно-колодкових гальм транспортних засобів.*

*Ключові слова:* гальмівні механізми, матеріали пар тертя, фрикційна взаємодія, трибопроцеси, пляма контакту, геометричні і експлуатаційні параметри.

*Рис 4. Форм 26. Літ 6.*

*В материалах статьи рассматривается энергонагруженность пар трения барабанно-колодочных тормозов транспортных средств. Сделаны теоретические исследования фрикционного взаимодействия металлополимерных пар трения. Детально анализируются процессы и явления, происходящие в тормозных механизмах транспортных средств. Разработана математическая модель определения термических напряжений пар трения в результате фрикционного взаимодействия барабанно-колодочных тормозов транспортных средств.*

*Ключевые слова:* тормозные механизмы, материалы пар трения, фрикционное взаимодействие, трибопроцессы, пятно контакта, геометрические и эксплуатационные параметры.

*In materials of the article energy loading is examined and steam wearing friction properties of a drum-block brakes of transport vehicles. Steam the done theoretical researches of friction co-operation of metal polymer friction. Taking into account modern achievements of material knowledge and analytical dependences the developed criteria of estimation of being of surfaces of friction and indicated possible ways of management by intensity of electric thermal mechanic destruction in the pairs of friction. The conducted calculations showed that considerable influence on the basic indexes of quality of superficial layer of rim of brake pulley has speed of thermal process. Speed of electric thermal mechanic processes stipulates the substantial change of character of structural transformations in superficial and plane layers and also physic-mechanical properties of material to the rim of drum. Analysis of the tense being of superficial layer to the rim to the drum at braking showed that forces of friction were instrumental in strengthening of superficial layer and origin of remaining tensions of compression. Temperature deformations over are brought to development in the superficial layer of effect of the reduction of durability, related to formation of remaining wricked tensions. The offered theoretical model of mechanism of destruction as a result of the electric thermal mechanic loading during friction confirms supposition about formation of superficial layer on a rim to the drum with low density of distributions and intensive cracks formation in plane layers. As electric thermal mechanic action affects the character of change of speeds of heating and cooling and also temperatures after a thickness to the drum it can be used for research of influencing of terms of the forced cooling on kinetics of thermal process. In detail processes and phenomena which take place in the brake mechanisms of transport vehicles are analyzed. Developed mathematical model of determination of thermal tensions steam friction as a result of friction co-operation of a drum-block brakes of transport vehicles.*

*Keywords:* brake mechanisms, materials of friction pairs, contact-impulsive co-operation, tribology processes, spot contact, geometrical and operating parameters.

**Постановка проблеми.** При оцінці енергонавантаженості металополімерних пар тертя барабанно-колодкових гальм транспортних засобів не завжди розглядають різні типи контактів їх взаємодії, які і визначають енергетичні рівні робочих шарів елементів тертя. Крім того, в процесі гальмування на поверхнях тертя формуються механічні, електричні, магнітні, теплові і хімічні поля, які необхідно розглядати спільно.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Бурхливий розвиток нанотрибології за останнє десятиріччя вимагає вдосконалення методів розрахунку енергонавантаженості металополімерних пар тертя барабанно-колодкових гальм транспортних засобів. При цьому необхідно розглядати поверхневі шари пари «накладка – метал» [1], оскільки тільки в них відбувається ряд перетворень механічного, теплового і хімічного характеру [2], які істотно знижують не тільки ефективність, але і сприяють планомірному руйнуванню поверхневого шару полімерної накладки [3]. Робоча поверхня останньої знаходиться в метастабільному стані в інтервалі температур вище допустимою для її матеріалів, що істотно позначається на її електронних властивостях, і як наслідок, на зносо-фрикційних характеристиках [4]. Розрахунку температурних полів під час тертя присвячений ряд робіт, в яких реалізовані наступні методи: аналітичний, чисельний, аналоговий, графічний, експериментальний і ін. [5, 6]. Проте ні в одному з методів не враховується, що теплоутворення відбувається не тільки на поверхні тертя, але і в матеріалі фрикційних накладок за рахунок термодеструкційних процесів, що спостерігаються при температурах вище допустимої для матеріалу пар тертя.

**Мета дослідження** – оцінка навантаженості та зносо-фрикційних властивостей поверхневих шарів металополімерних пар тертя барабанно-колодкових гальм транспортних засобів, виходячи з їх фізико-хімічного стану та комплексу складних електротермомеханічних і фізико-хімічних процесів в поверхневих і приповерхневих шарах металополімерних фрикційних вузлів.

**Процеси фрикційної взаємодії поверхонь пар тертя барабанно-колодкових гальм транспортних засобів**

При дослідженні і аналізі параметрів тертя особливо детальному вивченню підлягає контакт-імпульсна взаємодія мікровиступів поверхонь тертя. Процес протікає в три стадії: власне взаємодія мікровиступів; зміни, що відбуваються на плямах контакту поверхонь тертя; руйнування плям контакту. На вказаних стадіях контакт-імпульсної взаємодії поверхневих і приповерхневих шарів металополімерних пар тертя властиві їм процеси відбуваються на різних енергетичних рівнях з нестійкими зовнішніми і внутрішніми параметрами, які оцінюються за мікро-, мілі- і нанощкалами.

Розглянемо теплові процеси як результат дії електротермомеханічного навантаження на гальмівний барабан барабанно-колодкових гальм транспортних засобів. В процесі гальмування теплові хвилі не мають достатнього часу, щоб глибоко проникнути вглиб циліндричного ободу гальмівного барабана. В цьому випадку можна вважати, що температура в поверхневих шарах змінюється за товщиною як в напівнескінченному тілі з джерелом тепловиділення потужністю  $Q$ . Згідно цього одновимірне рівняння теплопровідності має вигляд

$$\frac{\partial \Delta \vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial \Delta \vartheta}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Рівнянню (1) повинні задовольняти наступні початкові і граничні умови:

$$\left. \begin{aligned} A_{r1} \lambda \frac{\partial \Delta \vartheta}{\partial z} - A_{r2} \sigma' \Delta \vartheta + Q; \\ \Delta \vartheta(x, 0) = 0 \end{aligned} \right\} \text{при } x = 0. \quad (2)$$

Ввівши позначення, переходимо до безрозмірних координат:

$$\Delta \vartheta = \frac{\vartheta(x, t) - \vartheta_{cp}}{\vartheta_{cp}}; \quad \bar{x} = \frac{x}{b}; \quad \bar{t} = \frac{at}{b^2} = Fo;$$

$$k = \frac{A_{r2}}{A_{r1}}; \quad Q = Qb / A_{r1} \lambda \vartheta_{cp}; \quad Bi = \sigma' b / \lambda,$$

де  $\Delta \vartheta$ ;  $\vartheta(x, t)$ ;  $\vartheta_{cp}$  – температури: перепаду; поточна; середовища;  $\Delta \vartheta$  – безрозмірний перепад температури;  $Fo$  – критерій Фур'є;  $A_{r1}$ ,  $A_{r2}$  – поверхні: полірована тепло-поглинаюча і матова охолоджувана;  $Q$  – кількість теплоти, що виділилася під час тертя;  $Bi$  – критерій Біо;  $a$ ,  $\lambda$  – коефіцієнти температуропровідності і теплопровідності матеріалу обода шківів;  $\sigma'$  – коефіцієнт тепловіддачі між поверхнями шківів і повітрям;  $t$  – поточна координата часу або тривалість гальмування;  $k$  – динамічний коефіцієнт взаємного перекриття;  $\bar{x}$  – безрозмірна товщина ободу шківів;  $b$  – ефективна глибина проникнення теплоти.

Диференціальне рівняння (1), початкові і граничні умови (2) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \bar{\Delta \vartheta}}{\partial \bar{t}} = a \frac{\partial \bar{\Delta \vartheta}}{\partial \bar{x}^2}; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{\Delta \vartheta}}{\partial \bar{x}} - k Bi \bar{\Delta \vartheta} + Q; \\ \bar{\Delta \vartheta}(\bar{x}, 0) = 0 \end{aligned} \right\} \text{при } \bar{x} = 0, (\bar{z} = 0). \quad (4)$$

Переходячи до узагальненого параметра, диференціальне рівняння (3) можна представити у вигляді:

$$4z \frac{\partial^2 \bar{\Delta\vartheta}}{\partial z^2} + (2+z) \frac{\partial \bar{\Delta\vartheta}}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Вирішити рівняння (5) можна наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{\Delta\vartheta}}{\partial z} &= c_1 e^{-\frac{1}{4}z} z^{-\frac{1}{2}}; \\ \frac{\partial \bar{\Delta\vartheta}}{\partial x} &= \frac{2x}{t} \cdot \frac{\partial \bar{\Delta\vartheta}}{\partial z} = \frac{2c_1 e^{-\frac{1}{4}z}}{\sqrt{t}}; \\ \bar{\Delta\vartheta} &= c_1 \int e^{-\frac{1}{4}z} z^{-\frac{1}{2}} dz + c_2. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Рішення (6) повинне задовольняти умовам (4) при  $z=0$ :

$$\frac{2a}{\sqrt{t}} - kBi \left[ \left( a \int e^{-\frac{1}{4}z} z^{-\frac{1}{2}} dz \right)_{z=0} + c_2 \right] + Q = 0; \quad (7)$$

при  $z = \infty$ ;  $\Delta\vartheta = 0$ .

Рішенням диференціального рівняння (6), яке задовольняє умовам (7), буде:

$$\bar{\Delta\vartheta} = \frac{\bar{Q}}{kBi + \frac{1}{\sqrt{\pi t}}} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{\bar{x}}{2\sqrt{t}} \right) \right] = \frac{\bar{Q}}{kBi + \frac{1}{\sqrt{\pi t}}} \operatorname{erfc} \left( \frac{\bar{x}}{2\sqrt{t}} \right), \quad (8)$$

де  $\operatorname{erfc} \left( \frac{\bar{x}}{2\sqrt{t}} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-\frac{1}{4}z} z^{-\frac{1}{2}} dz = 4 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^U e^{-U^2} dU$  – інтеграл Гауса.

Температура поверхні нагрівання визначається з (8) при  $x=0$ :

$$\Delta\vartheta_H(t) = - \frac{\bar{Q}}{kBi + \frac{1}{\sqrt{\pi t}}}. \quad (9)$$

З (9) неважко визначити перепад температури (при  $\bar{t} = \infty$ ), відповідний сталому стану

$$\bar{\Delta\vartheta} = \frac{\bar{Q}}{kBi}, \quad (10)$$

При повторно-короткочасному режимі гальмування процес носить періодичний характер: до наступного гальмування може відбуватися охолодження пари тертя до початкової температури або вона залишається вище початкової, причому від гальмування до гальмування поверхнева температура збільшується.

Час охолодження, як правило, у декілька разів перевищує час гальмування. Для таких умов визначення перепаду температури в процесі охолодження ободу шківів представляє особливий інтерес. Для цього випадку рівнянню (1) повинні задовольняти наступні граничні умови:

при  $x = z = 0$ ,

$$A_1 \lambda \frac{\partial \bar{\Delta\vartheta}}{\partial x} - A_2 \delta' \bar{\Delta\vartheta} = 0; \quad (11)$$

при  $z = \infty$ ,  $\left( \frac{\bar{t}}{t} \right) = 0$

$$\bar{\Delta\vartheta}(\bar{x}, 0) = \Delta\vartheta_H. \quad (12)$$

Підпорядковував рішення (6) граничним умовам (11), остаточно одержуємо:

$$\Delta \bar{\vartheta}_0 = \Delta \bar{\vartheta}_H \left[ 1 - \frac{kBi}{kBi + \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{t}}}} \operatorname{erfc} \left( \frac{\bar{x}}{2\sqrt{\bar{t}}} \right) \right]. \quad (13)$$

Температура охолодження поверхні шківа визначається з умови  $\bar{x} = 0$

$$\Delta \bar{\vartheta}_0(t) = \frac{\Delta \bar{\vartheta}_H}{1 + kBi \sqrt{\pi \bar{t}}}. \quad (14)$$

Маючи закономірності розподілу перепаду температури при нагріванні (6) і охолодженні (13) ободу шківа, можна знайти термічні напруження, які виникають в ньому. У випадку одновимірної задачі, якщо припустити, що властивості матеріалу обода шківа не змінюються і він пружний, для безрозмірних напружень запишемо наступне рівняння:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma(1-\mu)}{E\alpha_0 \bar{\vartheta}_{cp} \bar{Q}} = \frac{\Delta \bar{\vartheta}_{cp}^* - \bar{\vartheta}(x,t)}{\bar{\vartheta}_H}, \quad (15)$$

де  $\sigma$  – напруження;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $E$  – модуль пружності;  $\alpha_0$  – коефіцієнт лінійного розширення,  $\Delta \bar{\vartheta}_{cp}^*$  – середня температура поверхні тертя.

Напруження  $\bar{\sigma}$  спрямоване у бік стиснення ободу при його тепловому розширенні. Середня температура по товщині ободу шківа при нагріванні визначається за формулою:

$$\Delta \bar{\vartheta}_{cp} = \int_0^1 \Delta \bar{\vartheta} \left( \frac{\bar{x}}{\bar{t}}, \bar{t} \right) d\bar{x} = \Delta \bar{\vartheta} \left( \frac{\bar{x}}{\bar{t}}, \bar{t} \right) \int_0^1 \operatorname{erfc} \left( \frac{\bar{x}}{2\sqrt{\bar{t}}} \right) d\bar{x}. \quad (16)$$

Інтеграл рівняння (16) має вигляд:

$$\Delta \bar{\vartheta}_{cp} = \frac{\bar{Q}}{kBi + \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{t}}}} \left[ \operatorname{erfc} \left( -\frac{1}{2\sqrt{\bar{t}}} \right) + 2\sqrt{\frac{\bar{t}}{\pi}} \left( 1 - e^{-\frac{1}{4\bar{t}}} \right) \right]. \quad (17)$$

При  $t \rightarrow \infty$  середня температура за товщиною ободу шківа прирівнюється до його сталої температури при нагріванні (10). Згідно (16) середня температура при охолодженні дорівнює:

$$\Delta \bar{\vartheta}_{cp} = \frac{1}{2\sqrt{\bar{t}}} - \frac{kBi}{kBi + \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{t}}}} \left[ \operatorname{erfc} \left( -\frac{1}{2\sqrt{\bar{t}}} \right) + 2\sqrt{\frac{\bar{t}}{\pi}} \left( 1 - e^{-\frac{1}{4\bar{t}}} \right) \right]. \quad (18)$$

Безрозмірне напруження будь-якого шару товщини ободу при нагріванні визначається за формулою:

$$\Delta \bar{\sigma}_H = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{Q}} = \frac{1}{kBi + \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{t}}}} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2\sqrt{\bar{t}}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{\bar{x}}{2\sqrt{\bar{t}}} \right) + 2\sqrt{\frac{\bar{t}}{\pi}} \left( 1 - e^{-\frac{1}{4\bar{t}}} \right) \right]. \quad (19)$$

Для оцінки безрозмірного напруження на будь-якій глибині (по нормалі до поверхні тертя) ободу гальмівного шківа, який працює в повторно-короткочасному режимі, використовуємо раніше одержані співвідношення.

При нагріванні  $\bar{x} = 0$ , тобто на поверхні обода шківа:

$$\overline{\Delta\sigma_{1H}^*} = \frac{1}{kBi + \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{t}}}} \left[ 2\sqrt{\frac{\bar{t}}{\pi}} \left( 1 - e^{-\frac{1}{4\bar{t}}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{1}{2\sqrt{\bar{t}}} \right) \right]; \quad (20)$$

при  $\bar{x} = 1,0$

$$\overline{\Delta\sigma_{1H}^*} = \frac{2\bar{t}}{1 + kBi\sqrt{\pi \bar{t}}} \left( 1 - e^{-\frac{1}{4\bar{t}}} \right). \quad (21)$$

При охолодженні  $\bar{x} = 0$ :

$$\overline{\Delta\sigma_{10}^*} = \frac{kBi}{kBi + \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{t}}}} \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( 1 - e^{-\frac{1}{4\bar{t}}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{1}{2\sqrt{\bar{t}}} \right) \right]; \quad (22)$$

при  $\bar{x} = 1,0$

$$\overline{\Delta\sigma_{20}^*} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{kBi}{kBi + \frac{1}{\sqrt{\pi \bar{t}}}} \left( 1 - e^{-\frac{1}{4\bar{t}}} \right). \quad (23)$$

З використанням рівнянь (20)-(23) побудовані графічні залежності термічних напружень, що виникають при нагріванні і охолодженні обою шків для одного циклу (рис. 1 та рис. 2).

Аналіз графіків (див. рис. 1 а, б) показує, що при нагріванні температурні напруження на поверхні обою шків майже вдесятеро перевищують значення напружень, що виникають в його тілі. Напруження досягають максимуму, коли процес теплоізолюваний ( $Bi = 0$ ), і прирівнюється до нуля, коли теплообмін нескінченний ( $Bi \rightarrow \infty$ ). Істотний вплив на інтенсивність охолодження обою шківа оказує критерій ( $Bi$ ). Причому із збільшенням тривалості процесу гальмування його вплив зростає.

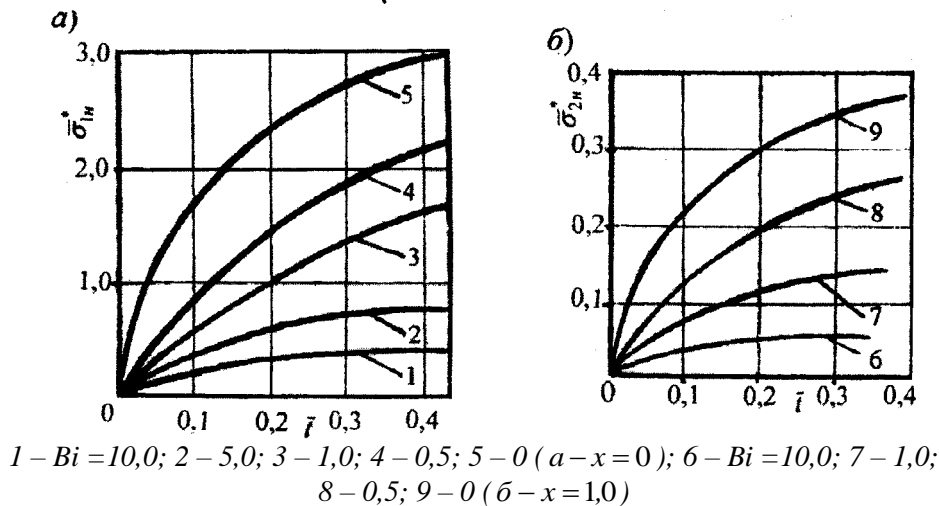
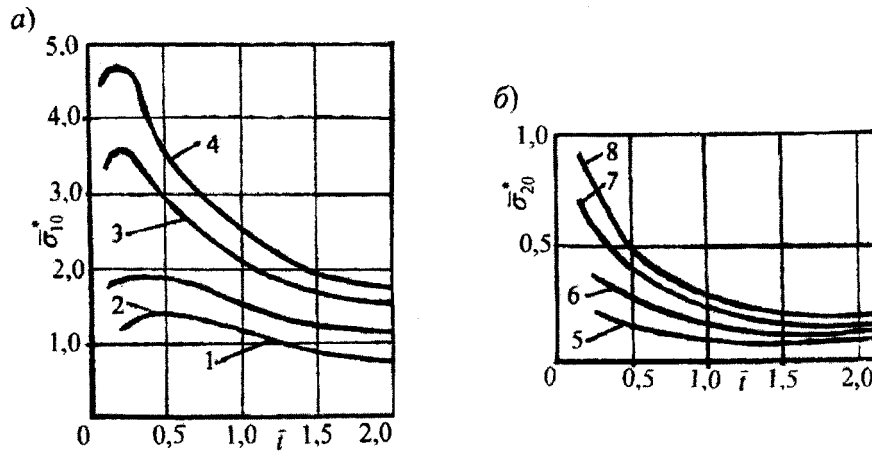


Рис. 1 а, б. Залежності величин безрозмірних напружень від величин безрозмірного часу гальмування при нагріванні обою барабана при різних значеннях критерію Біо

Аналіз графіків рис. 2 а і б показує, що при охолодженні величини термічних напружень на поверхні тертя обою майже в п'ять разів більше, ніж в його тілі. Причому напруження досягають максимуму, коли відбувається інтенсивний теплообмін ( $Bi \rightarrow \infty$ ) і вони мають мінімальне значення, коли поверхня обою теплоізолювана ( $Bi = 0$ ).

Розрахунки показують, що найбільші термічні напруження має поверхня тертя. При нагріванні обою шків розширення поверхневих шарів викликає напруження стиску. Коли обід

шківа охолоджується від робочої поверхні, стиск зовнішніх шарів викликає розтягування шарів його тіла, які знаходяться нижче. З урахуванням сучасних досягнень матеріалознавства і аналітичних залежностей (20)-(23), розроблені критерії оцінки стану поверхонь тертя і вказані можливі шляхи управління інтенсивністю електротермомеханічного руйнування в парах тертя.



1 –  $Bi=0,5$ ; 2 –  $1,0$ ; 3 –  $5,0$ ; 4 –  $\infty$ ; 5 –  $Bi=0,5$ ; 6 –  $1,0$ ; 7 –  $5,0$ ; 8 –  $(b-x=1,0)$

Рис. 2 а, б Залежності величин безрозмірного напруження від величин безрозмірного часу гальмування при вимушеному охолодженні ободу шківа при різних значеннях критерію Біо

Явища, що відбуваються при руйнуванні гальмівного барабана під дією теплоти, яка розвивається при терті, обумовлені не тільки високими температурами, але і напруженнями, що виникають від температурних градієнтів. Завдяки високим температурам і температурним градієнтам на поверхні тертя шківів можуть виникати напруження, які, як показав Т.А. Оберлс, значно перевищують напруги від сил тертя. Тому задача обліку термічних напружень не є простою задачею термоміцності. Вона є комплексною задачею теплової динаміки тертя і міцності, оскільки термічне руйнування є наслідком теплоутворення при терті. Ця обставина повинна бути врахована при виборі матеріалів для реального вузла тертя.

Основна частина виникаючих під час тертя напружень зосереджена в приповерхневих шарах металевих елементів тертя (рис. 3), що підтверджується відомою аналітичною залежністю між часом гальмування і ефективною глибиною проникнення теплоти  $b = 1,73\sqrt{at}$ . На плямах фактичного дотику, як це показано Г.А. Фазекасом, А.В. Чичинадзе, В. Черпелем, Ф. Пиггелем та ін., ці напруження стають пропорційними температурі спалаху і викликають сильний нагрів в тонких приповерхневих шарах, що приводить до утворення термічних плям і концентрації мікротріщин.

Тому можна вважати, що в процесі гальмування саме в приповерхневому шарі елементів тертя (залежність (20)) при дії електричного розряду і температурного спалаху  $\mathcal{G}_{всп}$  зароджуються тріщини, які обумовлені термічною втомою матеріалу. Ці тріщини розвиваються в результаті охолодження поверхневого шару і виникнення температурного градієнта від  $\mathcal{G}^*$ , коли термічні напруження в приповерхневому шарі досягають найбільших значень (22) і проходять через максимум (рис. 2 а). При підвищенні температури змінюється характер переміщення структурних складових в матеріалі, знижується міцність границь зерен і збільшується швидкість окислення.

Аналіз механізму зношування фрикційних пар показав, що в умовах циклічного нагрівання і вимушеного охолодження великий вплив на зародження і розвиток тріщин роблять як багатофазність структури, так і термічні властивості окремих фаз. Певну роль в руйнуванні матеріалу грає характер розподілу тріщин по поверхні.

Оскільки температури спалаху можуть швидко досягти декількох сотень градусів, то такий стрибок температури приводить матеріал в стан пластичності, коли опір тертю зменшується. Оскільки тривалість взаємодії на плямах фактичного контакту мікровиступів складає  $10^{-3}-10^{-6}$  с, то важливе значення мають не властивості статичної міцності поверхневого шару матеріалу пари тертя, а виникнення втомної міцності, якщо врахувати, що кристалічні грати твердого тіла реагують на дії через  $10^{-5}-10^{-8}$  с. Тому перебудова поверхневого шару під дією зовнішніх

електричних і теплових навантажень відбувається саме при переважанні температурного поля, і до моменту досягнення сталої температури поверхневий шар ободу шківів вже знаходиться під дією тих або інших залишкових напружень.

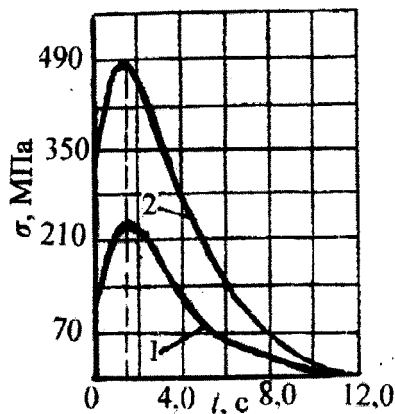


Рис. 3 Зміна поверхневих напружень в матеріалі ободу шківів, викликані температурами спалаху та температурними градієнтами в процесі гальмування: крива 1 –  $\sigma_z$ ; крива 2 –  $\sigma_s$ .

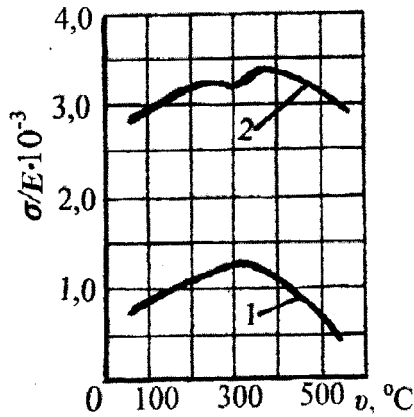


Рис. 4 Ефект впливу поверхневої температури на відносні деформації матеріалу ободу шківів: крива 1 –  $\sigma_{II}/E$ ; крива 2 –  $\sigma_s/E$ .

Проведені розрахунки показали, що значний вплив на основні показники якості поверхневого шару ободу гальмівного шківів оказує швидкість протікання теплового процесу. Швидкість електротермомеханічних процесів обумовлює істотну зміну характеру структурних перетворень в поверхневих і приповерхневих шарах, а також фізико-механічних властивостей матеріалу ободу барабана. В процесі тертя зона пластичної деформації не обмежується об'ємом мікронерівностей, а тягнеться углиб матеріалу. При цьому матеріал поверхневого і приповерхневого шарів має невисоку густину дислокацій. При ковзанні дислокації нагромаджуються на деякій відстані від поверхні, відбувається підвищення їх густини, що приводить до утворення мікропорожнин в приповерхневому шарі ободу шківів.

Аналіз напруженого стану поверхневого шару ободу барабана при гальмуванні показав, що сили тертя сприяють зміцненню поверхневого шару і виникненню залишкових напружень стиску. Температурні деформації призводять, як правило, до розвитку в поверхневому шарі ефекту зменшення міцності, пов'язаного з утворенням залишкових напружень розтягу.

На глибину нагрівання поверхневих шарів ободу барабана, як витікає з формул (22) і (23), оказує істотний вплив інтенсивність вимушеного охолодження (критерій Біо). При однакових параметрах теплового джерела максимальна глибина прогрівання поверхневого шару до заданої температури при охолодженні завжди менше, ніж без охолодження. Наявність тепловіддачі збільшує швидкість вимушеного охолодження поверхні матеріалу, але у міру віддалення від поверхні вплив охолодження зменшується. Це особливо важливо для пар тертя гальм, що працюють в повторно-короткочасному режимі.

Оскільки електротермомеханічна дія впливає на характер зміни швидкостей нагрівання і охолодження, а також температур за товщиною барабана, його можна використовувати при дослідженні впливу умов вимушеного охолодження на кінетику теплового процесу.

Запропонована теоретична модель механізму руйнування в результаті електротермомеханічного навантаження під час тертя підтверджує припущення про утворення поверхневого шару на ободі барабана з низькою густиною дислокацій і інтенсивним тріщиноутворенням в приповерхневих шарах, що добре узгоджується з результатами експериментальних досліджень Ц. Су. Заслужують уваги також роботи Л.М. Рибаківської і Л.І. Куксенової, присвячені методу рентгенографічного дослідження структурних змін в тонкому поверхневому шарі металу під час тертя.

Відомо, що електротеплові і зовнішні навантаження, що прикладені до твердого тіла, викликають напруження міжатомних зв'язків, які через гетерогенність будови більшості твердих

тіл можуть носити локальний характер. Саме на фактичних плямах дотику мікровиступів відбуваються локальні перенапруження, найбільш інтенсивно йде термофлуктуаційний процес розриву міжатомних зв'язків, що приводить до руйнування твердого тіла. Згідно кінетичної концепції міцності електротепловий рух атомів, характеристикою якого є температура, грає істотну роль в руйнуванні твердого тіла.

На рис. 4 показаний вплив температури на відносні деформації  $\frac{\sigma}{E}$  обода шків (де  $\sigma_n$  – границя міцності;  $\sigma_s$  – напруга, що викликана електротемпературними імпульсами). Цей ефект може бути корисним при побудові різних схем розрахунку залишкових мікронапружень, без знання яких неможливо дати повну оцінку стану поверхневого шару матеріалу, що працює в умовах повторно-короткочасного режиму навантаження.

**Висновки.** Явища теплового руйнування матеріалів пар тертя при гальмуванні є тим механізмом, впливаючи на який можна управляти процесами тертя і зношування. Знаючи основні внутрішні параметри теплового руйнування і вплив на них конструкції, матеріалів, параметрів гальмівних механізмів, режимів гальмування, інтенсивності вимушеного охолодження та ін., можна обґрунтовано управляти цим явищем. Розгляд теоретичної моделі процесу зношування (руйнування) пар тертя барабанно-колодкових гальмівних механізмів транспортних засобів в результаті електротермомеханічного навантаження показує, що на поверхневих шарах металевго елемента тертя густина дислокацій низька, це призводить до тріщиноутворення в його приповерхневих шарах. Розроблена математична модель може служити основою при проектуванні барабанно-колодкових гальмівних механізмів транспортних засобів.

1. Вольченко Д.А. Научные основы управления износо-фрикционными свойствами металлополимерных пар трения тормозов для предотвращения термостабилизационного явления: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.04/ Вольченко Дмитрий Александрович. – Киев, 2012. – 424 с. – На укр. яз.
2. Основы трибологии / Под ред. Чичинадзе А.В. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
3. Киндрачук М. В. Нанотрибология при контактно-термическом взаимодействии в металлополимерных парах трения тормозных устройств / М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, С. И. Криштопа, Д. Ю. Журавлев // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. НАУ – Київ: НАУ, 2012. – Вип. 58. – С. 5-16.
4. Барабанно-колодочные тормозные устройства: Монография / А.А.Петрик, А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко. – В 2-х томах. Том 1. – Краснодар, 2006. – 263.
5. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов - М.: Машиностроение, 1989. - 328 с.
6. Харламов П.В. Трибоспектральная идентификация и прогнозирование критического состояния подсистемы «тормозной диск – колодка» автомобиля: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Харламов Павел Викторович. – Ростов на Дону, 2009. – 172с.

Стаття надійшла до редакції 13.04.2014.