

## КОНТАКТНО-ІМПУЛЬСНА ВЗАЄМОДІЯ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПАР ТЕРТЯ ГАЛЬМІВНИХ ПРИСТРОЇВ

<sup>1</sup>О.І. Вольченко, <sup>1</sup>Д.О. Вольченко, <sup>1</sup>С.І. Криштопа, <sup>1</sup>Д.Ю. Журавльов, <sup>2</sup>М.В. Кашуба

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42195,  
e-mail: public@nimg.edu.ua

<sup>2</sup>Надвірнянський коледж національного транспортного університету,  
78400, Івано-Франківська обл., м. Надвірна, вул. Соборна, 177, тел. 096 9279349,  
e-mail: nicks14@rambler.ru

*Розглянуто умови надійності роботи фрикційних вузлів гальмівних пристроїв у випадку обмеження часу гальмування, середніх питомих навантажень на взаємодіючих поверхнях тертя та робочих поверхневих температур. Показано вплив перерахованих параметрів на динамічні, електричні та теплові фактори імпульсного характеру. Розглянуто особливості ударної взаємодії важконавантажених фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма; миттєву силу тертя при взаємодії мікроділянок тертя з урахуванням сил опору та зсуву на плямах контакту з використанням базових функцій: нормального закону Пуассона та імпульсної функції Дірака; нанотрибологічні процеси при оцінці миттєвої сили тертя у фрикційних вузлах гальм. Контактно-імпульсна взаємодія металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв розглядається на макро-, мілі- та нанорівнях.*

Ключові слова: гальмівний пристрій, металополімерні пари тертя, дискретний елементарний контакт, імпульси; нормальна сила; сила тертя; сила опору зсуву, нанотрибологія, мікроплями контакту.

*Рассмотрены условия надежности работы фрикционных узлов тормозных устройств при ограничении времени торможения, средних удельных нагрузках, на взаимодействующих поверхностях трения и рабочих поверхностных температур. Показано влияние перечисленных параметров на динамические, электрические и тепловые факторы импульсного характера. Рассмотрены особенности ударного взаимодействия труднонагруженных фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза; мгновенную силу трения при взаимодействии микрочастинок трения с учетом сил сопротивления и сдвига на пятнах контакта с использованием базовых функций: нормального закона Пуассона и импульсной функции Дирака; нанотрибологические процессы при оценке мгновенной силы трения во фрикционных узлах тормозов. Контактно-импульсное взаимодействие металополимерных пар трения тормозных устройств рассматривается на макро-, мيلي и нануровнях.*

Ключевые слова: тормозное устройство, металлополимерные пары трения, дискретный элементарный контакт, импульсы, нормальная сила, сила трения, сила сопротивления сдвига, нанотрибология, микропятна контакта.

*The conditions of the reliable operation of brake devices friction assemblies are considered under the braking time limitation, average specific load on the interactive surfaces of friction and working superficial temperatures. The influence of the abovementioned parameters of the dynamic, electrical and thermal factors of pulse character is shown. The state of the problem and the purpose of work are formulated and it allowed in the future to consider the following questions: the features of shock interaction of heavy-loaded friction assemblies of band shoe brake. The instantaneous force of friction in the interaction microsections taking into account the shear strength on the spots of contact by using the base function of the Poisson's standard law and Dirac pulse; nanotribologic processes in the estimation of instantaneous force of friction in the friction assemblies of brakes. Contact-pulse interaction of metal-polymer friction pairs of braking devices is considered on macro-, micro- and nanolevel.*

Keywords: braking device, metalopolymer friction pair, discrete elementary contact, pulses, normal force, friction force, shear strength, nanotribology, contact microspots.

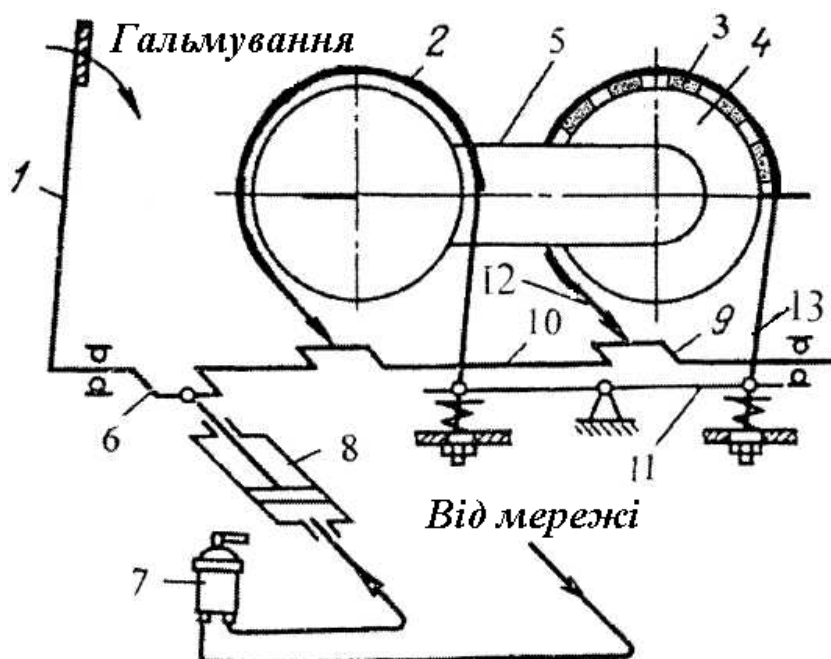
**Вступ.** Однією з основних умов надійності роботи фрикційних вузлів гальмівних пристроїв є обмеження: часу гальмування, середніх питомих навантажень та робочих поверхневих температур. Обмеження на першому та третьому експлуатаційному параметрах є очевидним. Що стосується другого експлуатаційного параметра, то закономірності зміни епюру питомих навантажень на плямах мікроконтакту та їхніх величин в металополімерних парах тертя гальмівних пристроїв у взаємозв'язку зі швидкістю ковзання та поверхневою температурою впливає на:

– напружено-деформований стан матеріалів під дією імпульсних нормальних сил та сил тертя;

– напружено-деформований стан, викликаний зміною структури поверхневих та приповерхневих шарів матеріалів (дефектами);

– технологічну піддатливість спряжених поверхонь на окремих ділянках їх контактної імпульсної взаємодії;

– генеровані плями та зворотні електричні струми при контактній імпульсній взаємодії мікроділянок поверхонь;



1 – важіль керування гальмом; 2 – гальмівна стрічка; 3 – фрикційна накладка; 4 – гальмівний шків; 5 – барабан лебідки; 6, 9 і 10 – мотильові шийки колінчастого вала; 7 – кран бурильника; 8 – пневмоциліндр; 11 – балансір; 12, 13 – набігаюча та збігаюча гілки гальмівної стрічки

Рисунок 1 – Кінематична схема стрічково-колодкового гальма бурової лебідки

– роботу виходу електронів із металевого фрикційного елемента та іонів з приповерхневого шару полімерних накладок;

– електротермічний напружено-деформований стан матеріалів пар тертя під дією імпульсних електричних струмів і, як наслідок, миттєвих теплових потоків;

– швидкість зміни динамічного коефіцієнта тертя, і, як наслідок, гальмівного моменту;

– час циклів руйнування мікроділянок та середні розміри частинок, які від них звільнюються.

Однак в такій постановці вирішення даної задачі у відомих роботах [1-4] не розглядалося у зв'язку з тим, що не було теоретичного і експериментального підходу до контактної-імпульсної взаємодії мікроступів металополімерних пар тертя. Викликано це було тим, що розглядалася флуктуаційна зміна параметрів тертя плям дискретного контакту, а не імпульсна.

**Стан проблеми.** Контактно-імпульсна дискретна взаємодія пар тертя гальмівних пристроїв дає можливість розглядати в часі відхилення величин нормальної сили, сили тертя, електричного струму, теплових потоків та параметрів, що їх супроводжують при відхиленні від середніх значень. В такій постановці у відомих працях [1-4] дана проблема не вивчалась.

**Мета роботи** – вивчити та дослідити дискретний елементарний металополімерний контакт, який знаходиться під дією імпульсної нормальної сили тертя на одній із стадій розвитку, тобто взаємодії.

**Особливості ударної взаємодії важко-навантажених фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма.** Розрахунок експлуатаційних параметрів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок вимагає правильного врахування зміни у часі навантаження в процесі гальмування. В конструкціях фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма нормальне зусилля, яке реалізується за рахунок розтягу гальмівних стрічок, з розміщеними на ній фрикційними накладками, збільшується з моменту дотику їхніх робочих поверхонь з біговою дорожкою шківа.

Згідно з кінематичною схемою (рис. 1) фрикційні накладки 3 встановлено на гальмівних стрічках 2, які одним кінцем (з боку збігаючої гілки 13) прикріплені до балансіра 11, а іншим (з боку набігаючої гілки 12) – до мотильових шийок 6 і 9 колінчастого вала 10.

Серійні стрічково-колодкові гальма бурової лебідки працюють так. Переміщення важеля 1 здійснюється поворот колінчастого вала 10, в результаті чого бурильник затягує гальмівні стрічки 2 з фрикційними накладками 3, і вони сідають на гальмівні шківні 4. Для процесу гальмування стрічково-колодковим гальмом (див. рис. 1) характерні такі стадії: початкова (перша), проміжна (друга) і завершальна (третья). Зупинимося на кожній із них окремо.

На початковій стадії гальмування фрикційні накладки 3, розміщені в середній частині гальмівної стрічки 2, взаємодіють з робочою поверхнею гальмівного шківа 4. Фронт взаємодії розширюється у бік фрикційних накладок 3 набігаючої гілки 1 гальмівної стрічки 2.

Проміжна стадія гальмування характеризується подальшим поширенням фронту взаємодії у бік фрикційних накладок 3 збігаючої гілки II гальмівної стрічки 2.

Кінцева стадія гальмування характеризується тим, що майже всі нерухомі накладки 3 гальмівної стрічки 2 взаємодіють з робочою поверхнею шківів 4, що обертається. Під час пригальмовувань послідовність входження поверхонь тертя в контакт повторюється. Повний цикл гальмування завершується зупинкою гальмівних шківів 4 з барабаном 5. Керування гальмом бурової лебідки здійснюють також подачею стисненого повітря крізь кран 7 бурильника в пневматичний циліндр 8, шток якого сполучений з однією із мотильових шийок колінчастого вала 10 гальма. Величину тиску стисненого повітря в пневмоциліндрі 8 регулюють поворотом крана 7 бурильника.

У разі нерівномірного зношування фрикційних накладок 3, встановлених на стрічках 2, балансир 11 у момент гальмування трохи відхиляється від горизонтального положення і вирівнює навантаження на збігаючій гілці II гальмівних стрічок 2, забезпечуючи при цьому рівномірне і одночасне охоплення ними гальмівних шківів 4. Завдяки кульовим шарнірам передача навантажень від гальмівних стрічок 2 до балансира 11 при цьому не змінюється.

До м'яких матеріалів пари тертя відносяться фрикційні накладки з тканин (ЛАТ-1, ЛАТ-2, ЛАТ-3), вальцованих (ЭМ-1 (8-45-62), ЭМ-2 (6КВ-10, 6КВ-56а), ЭМ-3 (6-147Н-59)), пресованих (КФ-1, КФ-2, КФ-3, КФ-4) та інших матеріалів азбофрикційного типу вітчизняних DAfmi, BransMaster (Україна) та закордонних QH, Zucas, APZockheed, Ferodo (Великобританія); ATE, Bosch (Німеччина); Samko (Італія); Roulunds (Угорщина) та Поліедр, ВАТИ, STS, ТИИР, ЕЗАТИ (Росія) фірм. У зв'язку з тим, що через меншу твердість час удару для матеріалів фрикційної накладки збільшується, то під час розрахунку нормальних навантажень для таких пар тертя слід враховувати ударну взаємодію, пов'язану зі стисканням фрикційних накладок при розтягуванні гальмівної стрічки.

На основі викладених вище положень приймаємо розрахункову схему (рис. 2). Фрикційна накладка товщиною  $h$  подається у вигляді пружини з жорсткістю  $c_1$ . Диференціальне рівняння руху накладки в процесі її взаємодії з робочою поверхнею шківів, без врахування його тангенційної швидкості має вигляд

$$m\ddot{y} = N(t) - c_1 y, \quad (1)$$

де  $m$  – зведена до фрикційної накладки маса ділянки гальмівної стрічки, по якій вона переміщується;

$y$  – переміщення накладки масою  $m_1$  відносно гальмівної стрічки;

$N(t)$  – нормальне зусилля, яке діє на накладку. Зусилля  $N(t)$  залежить від жорсткості ділянки гальмівної стрічки.

Якщо прийняти, що за незначної товщини стискання накладки підпорядковується закону Гука, можна записати

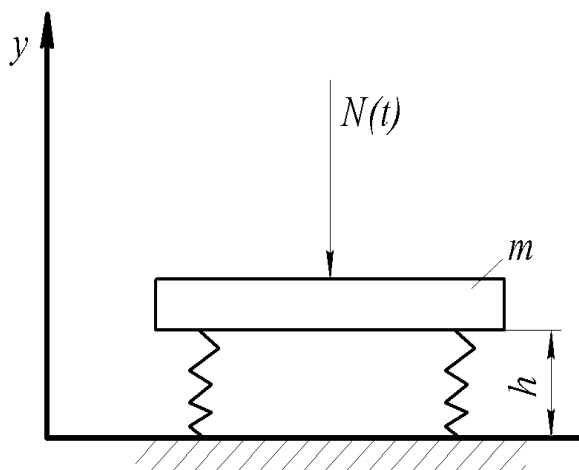


Рисунок 2 – Розрахункова схема нормального навантаження для м'якої пари тертя “накладка-шків”

$$c_1 = AE / h, \quad (2)$$

де  $A$  – номінальна площа тертя пари “накладка-шків”;

$E$  – модуль пружності накладки.

Аналіз свідчить, що розв'язок рівняння (1) має практичний зміст в тому випадку, коли зусилля натягів набігаючої та збігаючої ділянок гальмівної стрічки збільшується плавно. В загальному випадку це зусилля можна виразити лінійною функцією

$$N(t) = N(t_0) + uc_2 t, \quad (3)$$

де  $N(t_0)$  – нормальне зусилля, яке діє в момент дотику поверхні фрикційної накладки до робочої поверхні гальмівного шківів;

$c_2$  – жорсткість гальмівної стрічки;

$u$  – деформація ділянки гальмівної стрічки.

Якщо вираз (3) підставити в рівняння (1) та розв'язати останнє, отримуємо

$$y = c_1 \cos\left(\sqrt{\frac{c_1}{m}}t\right) + c_2 \sin\left(\sqrt{\frac{c_1}{m}}t\right) + \frac{uc_2}{c_1}t + \frac{N(t_0)}{c_1}. \quad (4)$$

Рівняння (4) розглянемо разом з початковими умовами:  $t=0; y=0$  та  $y=V_n$  (5), де  $V_n$  – швидкість руху накладки в момент дотику зі шківом, яка залежить від піддатливості ділянки гальмівної стрічки, а також від довжини поздовжніх паців в стрічці, якими переміщуються кріпильні планки з накладкою.

Після визначення сталих інтегрування отримуємо

$$y = \frac{N(t_0)}{c_1} \left[ 1 - \cos\left(\sqrt{\frac{c_1}{m_1}}t\right) \right] + \left( V_n - \frac{u}{c_1} \right) \sqrt{\frac{m_1}{c_1}} \sin\left(\sqrt{\frac{c_1}{m_1}}t\right) + \frac{uc_2}{c_1}t. \quad (5)$$

Якщо величину стискання накладки ( $y$ ) помножити на її жорсткість, то отримаємо точне значення нормального зусилля при взаємодії м'якої пари тертя “накладка-шків”.

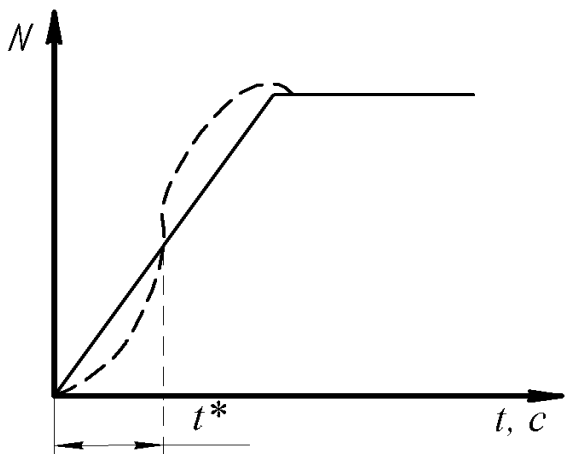
$$N = N(t_0) \left[ 1 - \cos \left( \sqrt{\frac{c_1}{m_1}} t \right) \right] + (V_n - \frac{u}{c_1}) \sqrt{\frac{m_1}{c_1}} \sin \left( \sqrt{\frac{c_1}{m_1}} t \right) + \frac{uc_2}{c_1} t. \quad (6)$$

Для практичних розрахунків необхідно користуватися наближеним виразом, розклавши формулу (6) в степеневий ряд (ряд Маклорена). Якщо задовольнитися першими чотирма членами, то отримаємо поліном третьої степені, оскільки перший член ряду дорівнює нулю

$$N = v_n c_1 t + \frac{N(t_0) c_1 t^2}{2m} - \frac{V_n c_1^2 - uc_2 / c_1}{m} \frac{t^3}{6}. \quad (7)$$

Залежність нормального навантаження від часу проілюстрована графічно пунктирною лінією (див. рис. 3). Для зручності замінимо її лінійною залежністю. Знайдемо значення часу  $t^*$ , при котрому функція (рис. 7) має точку перегину. Розв'язавши рівняння  $d^2N/dt^2 = 0$ , отримуємо

$$t^* = N(t_0) / [V_n c_1 - uc_2 / c_1] \quad (8)$$



**Рисунок 3 - Залежність нормального навантаження від часу гальмування в парі тертя “накладка-шків” у стрічково-колодковому гальмі**

Залежність для визначення нормального навантаження при  $t=t^*$  буде такою

$$N^* = \frac{V_n c_1 N(t_0)}{V_n c_1 - uc_2 / c_1} + \frac{c_1 N(t_0)^3}{3m_1 (V_n c_1 - uc_2 / c_1)^2}. \quad (9)$$

За допомогою залежностей (8) та (9) отримуємо лінійну залежність зростання нормального навантаження (на рис. 3 позначено суцільною лінією):

$$N = \frac{V_n c_1 + c_1 [N(t_0)]^2}{3m_1 (V_n c_1 - uc_2 / c_1)} t. \quad (10)$$

Формула (10) є аналітичним виразом зростання нормального навантаження в даному виді гальма з м'якими парами тертя “накладка-шків” у разі збільшення різниці натягів набігаючої та збігаючої ділянок гальмівної стрічки. Розрахунок за залежністю (10) наведено в кінці роботи.

Коливання нормального зусилля, яке створюється за рахунок деформації гальмівної стрічки, тобто її розтягу, негативно впливає на процес гальмування фрикційними вузлами гальма. Крім того, коливальна зміна сил притискання фрикційних накладок, розташованих на набігаючій та збігаючій гілках гальмівної стрічки, на робочу поверхню гальмівного шківів обумовлює імпульсний характер миттєвих сил тертя і впливає суттєво на електричні та теплові характеристики у випадку їх контактної імпульсної взаємодії.

**Миттєва сила тертя при взаємодії металополімерних вузлів тертя.** Тертя та зношування металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв і процеси та явища, що їх супроводжують, суттєво залежать від характеристик мікрогеометрії фрикційного контакту. Характеристиками останнього є шорсткість та хвилястість, що обумовлені технологічною обробкою взаємодіючих поверхонь пар тертя, а також процесами тертя та зношування, що виникають при цьому. Відомо, що контакт є дискретним, і його фактична площа складає незначну частку від номінальної площі контакту, а миттєва сила тертя та зношування, пропорційні цій площі. Руйнування одиничних фрикційних зв'язків відбувається при зсуві на середньому діаметрі плями контакту. Перехід від відтиснення до різання визначається глибиною впровадження мікронерівностей, а отже, залежить від зближення поверхонь пар тертя. Крім того, на електричний струм, так і на тепловий режим вузла суттєво впливає число, розмір, та густина розподілу плям фактичного контакту, механічних та фізико-механічних властивостей матеріалів контактуючих плям та середовища, в якому вони взаємодіють.

Загалом експлуатаційний параметр фрикційного вузла є випадковим процесом  $z(t)$ . За кожного значення аргументу  $t=t_1$  випадковий процес стає випадковою величиною  $z(t_1)$ , якщо він не пов'язаний з попереднім процесом. Статистичні характеристики випадкових величин  $z(t_1)$  – математичне очікування  $m_z$ , дисперсія  $D_z$  – можуть змінюватися в часі (рис. 4 б) або залишатися сталими (рис. 4 а).

Повною характеристикою випадкової величини  $z(t)$  є закон розподілу, що має характер закону розподілу випадкового процесу. Загалом закон розподілу – функція двох змінних  $f=f(z/t)$  (рис. 4 а). При стаціонарному випадковому процесі (рис. 4 б) закон розподілу не залежить від  $t$ . Загальний випадок (рис. 4 а) зазвичай має місце у вузлах тертя, де суттєвими є всі три види нестабільності, винятком є процес (рис. 4 б), коли домінують випадкові флуктуації миттєвої сили тертя в металополімерних парах тертя, що виникають в результаті технологічної нестабільності.

Одновимірний закон розподілу випадкового процесу є достатньою характеристикою для тих задач, в яких його протікання за різних значень аргументу  $t$  розглядаються окремо.

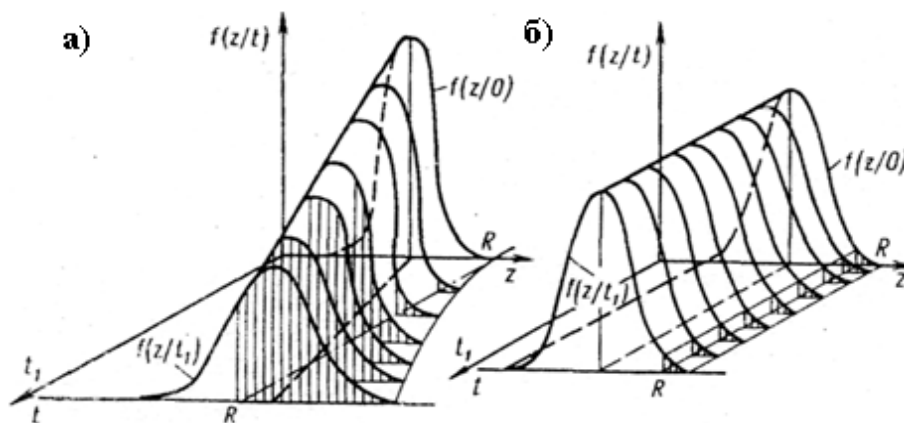


Рисунок 4 – Одновимірний закон розподілу випадкового процесу для характеристик, що залежать (а) і не залежать (б) від часу

Розглянемо з точки зору прогнозування оцінку параметрів закону розподілу флуктацій миттєвої сили тертя. В першому наближенні вважатимемо, що фізичною причиною виникнення флуктацій є стохастична природа контакту та його дискретність. Приймаємо, що існує два різних за опором зсуву (послідовний та одночасний) типи контакту та відома ймовірність їхньої появи з метою отримання виразу для визначення коефіцієнта варіації миттєвої сили тертя.

Дану задачу розглянемо в загальній постановці. Вважатимемо контактуючі поверхні шорсткими: фактична площа контактування в цьому випадку має вигляд окремих плям, загальною кількістю  $n$ , і які визначаються розподіленою випадковою величиною. Сила опору зсуву  $S_i$  на одиничній плямі залежить від її розмірів та інших супровідних чинників і теж розглядається як випадкова величина. Загальна сила тертя дорівнює

$$F = \sum_{i=1}^n S_i. \quad (11)$$

Приймаємо, що випадкові величини  $S_i$  є незалежними [5].

Нехай відомо закон розподілу сили опору зсуву для першої за рахунком одиничної плями  $\varphi_1(S)$ . В зв'язку з тим, що  $n$  не є сталою величиною, закон розподілу для інших плям зі збільшенням їхнього номера буде відрізнятися від  $\varphi_1(S)$ . Закон розподілу сили опору зсуву для  $i$ -ої плями запишеться так:

$$\varphi_i(S) = \varphi_1(S)p_i + \delta(S)(1 - p_i), \quad (12)$$

де  $p_i$  – ймовірність того, що  $i$  не більше  $n$ ;  $(1-p_i)$  – ймовірність того, що сила опору зсуву на плямах контакту має місце;

$\delta(S)$  – імпульсивна функція Дірака.

Якщо прийняти, що число  $n$  описується законом розподілу Пуассона [6], оскільки при цьому центри розсіювання параметра не зміщуються в часі

$$p_i = 1 - e^{-\bar{n}} \sum_{k=0}^{i-1} \frac{\bar{n}^k}{k!},$$

де  $\bar{n}$  – середня кількість плям контакту, на котрих реалізується сила опору зсуву та виникає миттєва сила тертя;

$e$  – основа натурального логарифму.

Скориставшись властивостями математичного очікування (залежність 13) та дисперсії (залежність 14) (табл. 1) для суми незалежних величин [5, 6], одержали характеристики розподілу на плямах контакту (залежності 15 та 16) і, відповідно, стандарт розподілу  $\sigma_F = \sqrt{D_F}$  та коефіцієнт варіації  $v_F = \sigma_F / m_F$ .

Точність оцінки характеристики розподілу згідно з виразами (15) та (16) залежить від прийнятого значення числа  $n$ ; ряди в правій частині формул, як правило, швидко сходяться,  $n$  можна прийняти рівним (2...3)  $\bar{n}$ , а за даними Б.Н. Дьомкіна – 20-25.

За великих значень  $\bar{n}$  розрахунок за залежностями (15) і (16) працемісткий внаслідок використання одиничної ймовірності густини розподілу для кожної плями контакту, тому перейдемо до безпосереднього розподілу. В цьому випадку після перетворення виразів (11) і (12) маємо

$$F = \int_0^{\infty} S(i) di;$$

$$\varphi_*[S(i)] = \varphi(S)p(i) + \delta(S)[1 - p(i)].$$

Число плям контакту повинно бути апроксимовано безперервним розподілом вигляду

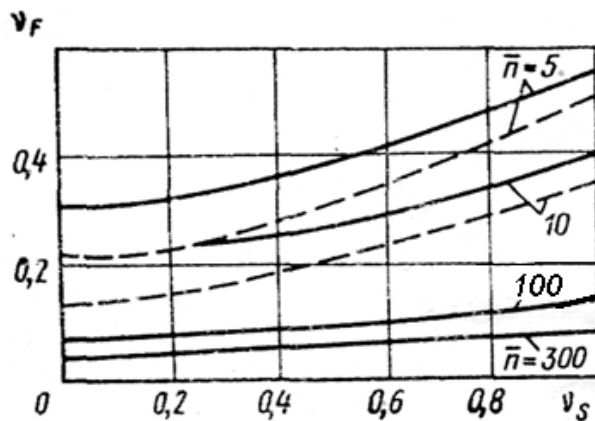
$$\chi(n). \text{ Тоді ймовірність } p(i) = 1 - \int_0^i \chi(n) dn.$$

Математичне очікування двох параметрів ( $S$  та  $F$ ), а також їхні дисперсії згідно з табл. 1 визначаються за залежностями відповідно 17, 19 та 18 і 20.

На рис. 5 наведено розрахункові залежності коефіцієнта варіації  $v_F$  миттєвої сили тертя від коефіцієнта варіації  $v_S$  сили зсуву на одиничній плямі контакту для різних значень середнього числа плям контакту  $\bar{n}$ . Розглянемо випадок дискретного та безперервного розподілу  $n$ .

Таблиця 1 – Характеристики плям контакту взаємодії металополімерних пар тертя

Математичне очікування (m) та дисперсія (D) сил опору зсуву (S) та тертя на плямах контакту за ймовірностями густини розподілу	
одиночної	безперервної
$m_{S_i} = M[S_i] = p_i m_{S_i};$ (13)	$m_S(i) = p(i) m_S;$ (17)
$D_{S_i} = D[S_i] = p_i [D_{S_i} + m_{S_i}^2 (1 - p_i)];$ (14)	$D_S[S(i)] = p(i) \{D_S + m_S^2 [1 - p(i)]\};$ (18)
$m_F = M[F] = m_{S1} [n - e^{-\bar{n}} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\bar{n}^k}{k!} (n - k)];$ (15)	$m_F = m_S \int_0^{\infty} p(i) di;$ (19)
$D_F = D[F] = \left( D_{S1} + m_{S1}^2 \sum_{i=1}^n p_i - m_{S1}^2 \sum_{i=1}^m p_i^2 \right);$ (16)	$D_F = \int_0^{\infty} D[S(i)] di = (D_S + m_S^2) \int_0^{\infty} p(i) di - m_S^2 \int_0^{\infty} p^2(i) dt.$ (20)



суцільна лінія – безперервний розподіл  $\bar{n}$  (експоненціальний закон);  
штриховка – дискретний розподіл  $\bar{n}$  (закон Пуассона)

Рисунок 5 – Залежність між коефіцієнтами варіації ( $v_F$ ) миттєвої сили тертя та варіації ( $v_S$ ) сили зсуву за різних значень середнього числа п'ятен контакту ( $\bar{n}$ )

Використавши формулу нормального розподілу  $f(F) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^F e^{-\frac{m_F}{2}} dm_F$ , отримуємо в кінцевому результаті густину розподілу миттєвої сили тертя

$$f(F) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_F}} \exp\left[-\frac{(F - \bar{m}_F)^2}{2\sigma_F^2}\right], \quad (21)$$

де  $\bar{m}_F$  – середнє значення математичного очікування миттєвої сили тертя.

Загалом параметри закону розподілу миттєвої сили тертя визначаються за функціональною залежністю вигляду  $f(S)$  та  $\chi(n)$ .

**Нанотрибологічні процеси при оцінці миттєвої сили тертя у фрикційних вузлах гальм.** Виникнення і формування подвійних електричних шарів (ПЕШ) у металополімерних парах тертя гальм в діапазоні температур нижче і вище за допустиму температуру відіграє істотну роль у контактній взаємодії їх поверхонь.

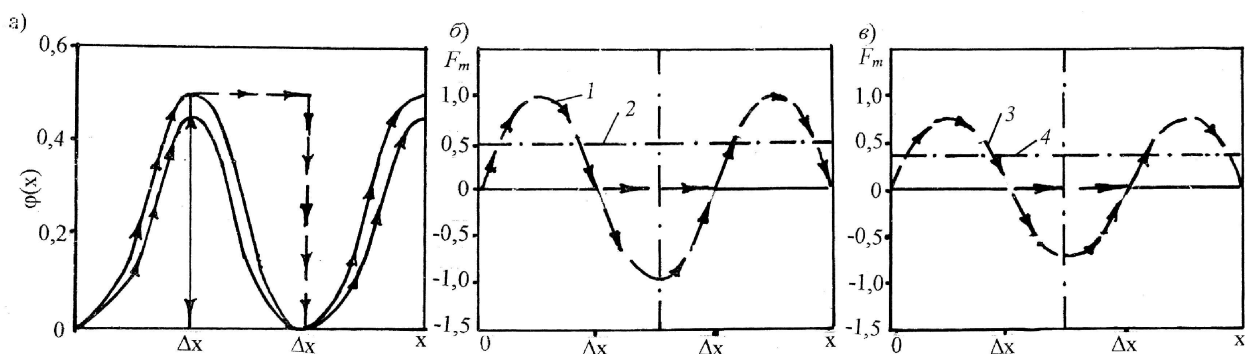
З моменту замикання гальма поверхні тертя зближуються до молекулярних відстаней  $l$ , тобто до відстаней порядку  $10^{-10}$  м (рис. 6 а). Накопичення робочою поверхнею накладки електронів, які віддаються їй робочою поверхнею металевго елемента тертя, сприяє виникненню в їхньому приграничному шарі електричного поля з дуже короткими лініями. Його називають подвійним шаром, а напругу, що виникає в ньому, – контактною напругою.

При виникненні подвійного шару по всій поверхні провідної взаємодії електричні заряди  $+q$  і  $-q$  взаємозміщуються за рахунок сповільненого обертання гальмівного барабана під час гальмування

Установлено, що мікроділянки поверхонь тертя, які мають залишкові стискаючі напруження, стають анодами, а ненапружені – катодами.

Парам тертя гальмівних пристроїв властиве електромагнітне поле – фізичне поле, крізь яке здійснюється електромагнітна взаємодія. Це окремий вид фізичного поля, яке є поєднанням електричного і магнітного полів. Окремим проявом стаціонарного електромагнітного поля є електростатичне (поле нерухомих зарядів) і магнітне (поле постійних макро- і або мікро-струмів) поля на завершальній стадії гальмування. На початковій стадії гальмування нестационарне електромагнітне поле проявляється як поле прискорених зарядів або як електричне поле змінних струмів.

Нанотрибологія оперує із взаємодією окремих електронів з іонами в трибологічних системах гальм. Проаналізуємо, як ця взаємодія впливає на силу тертя. Уявімо, що кількість поверхневих електронів металевго елемента тертя змінюється за періодичним законом у випадку взаємодії з поверхневими іонами накладки (див. рис. 6 а) за відсутності дисипації енергій. Досягнувши верхньої точки потенціалу  $\phi(x)$ , електрони відриваються від поверхні металевго елемента тертя і потрапляють у точку мінімального потенціалу, тобто на поверхню фрикційних накладок (див. рис. 6 б) або в їх рідкий поверхневий шар (див. рис. 6 в). Так здійснюється перехід електронів у точку з ін-



**Рисунок 6 – Величини потенціалів ( $\varphi$ ) у парі тертя за різних амплітуд періодичного переміщення електронів металевго елемента тертя (а) при взаємодії з поверхневими іонами накладки в інтервалі температур нижче (б) і вище (в) допустимої температури для її матеріалів та миттєва (1, 3) і середня (2, 4) сили тертя ( $F_T$ ), що виникають**

шою енергією. Миттєва сила тертя при цьому дорівнює (див. рис. 6 б, в):

$$F_T(x) = \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x}, \text{ якщо } 0 < x < \frac{\Delta x}{2}; \quad (22)$$

$$F_T(x) = 0, \text{ якщо } \frac{\Delta x}{2} < x < \Delta x. \quad (23)$$

З урахуванням основних положень нанотрибологічної теорії можна стверджувати, що енергія електронів у першому випадку накопичується на поверхні фрикційних накладок (див. рис. 6 б), а в другому – передається вглиб рідкого поверхневого шару накладок, тобто концентрується в ньому.

Це дає підставу стверджувати, що одним з важливих аспектів впливу процесів електризації є збільшення сили тертя за рахунок електростатичної взаємодії контактуючих поверхонь [4]. Однак це не зовсім так. Другою складовою збільшення сили тертя є магнітне тяжіння пари тертя «метал-полімер» у наслідок існування на їх поверхнях паралельно рухомих рядів зарядів одного знака. Ці заряди спричинюють електричне відштовхування поверхонь тертя. У разі виникнення паралельно рухомих рядів зарядів різного знака на поверхнях тертя пари «метал-полімер» складова їхньої електростатичної взаємодії збільшується, а магнітної взаємодії – зменшується.

Іонна адсорбція рідкої фази сполучних компонентів фрикційних матеріалів накладки характеризується тим, що наявні в ній тверді компоненти адсорбують різні іони тієї самої речовини по-різному. Так, іони, здатні поляризуватися, адсорбуються на поверхнях пар тертя, складених з полярних молекул або іонів.

Мікроділянки поверхонь пар тертя, які несуть певний заряд, адсорбують протилежно заряджені іони. При цьому іони рідкої фази зв'язують компоненти фрикційних матеріалів, які одноіменно заряджені з робочою поверхнею накладки і не адсорбуються. Під дією електромагнітних сил вони залишаються поблизу адсорбованих іонів, утворюючи разом з ними на поверхні адсорбенту (на робочій поверхні оболонки гальмівного барабана) подвійний електричний шар. У цьому випадку адсорбційні процеси є об'ємними.

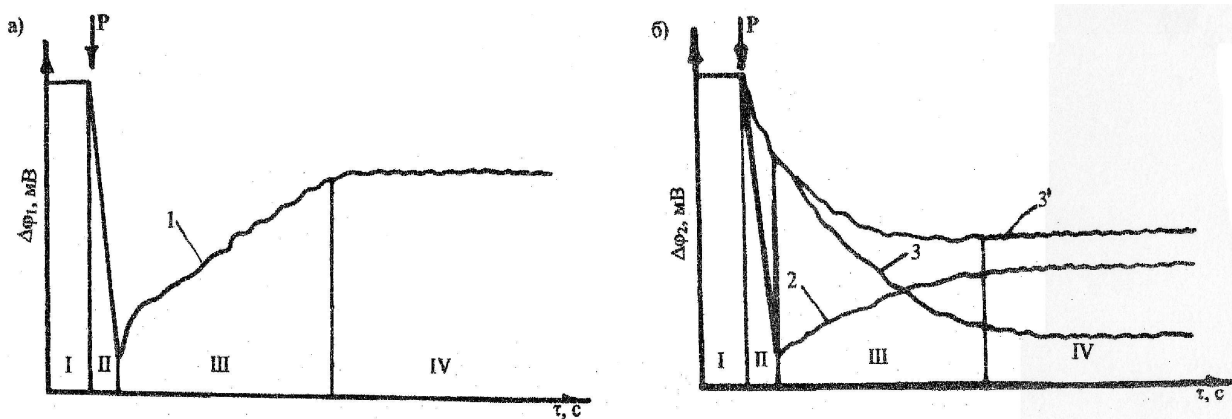
Каталізатором для електронів та іонів є внутрішня і зовнішня поверхні оболонки гальмівного барабана. Слід зауважити, що каталізатор не ініціює взаємодію іонізованих повітряних потоків, що омивають робочі поверхні пар тертя гальм, з газовими сумішами, що виділилися з приповерхневих шарів накладок. Він тільки прискорює реакції взаємодії, які можуть відбуватися і за його відсутності, але значно повільніше.

При взаємодії фрикційні пари «метал-полімер» у барабанно- і стрічково-колових гальмах в інтервалі поверхневих температур вище допустимої для матеріалів фрикційних накладок перетворюються на електрохімічні системи. У них відбуваються зворотні катодно-анодні процеси, а їхні тимчасові зарядно-розрядні характеристики властиві електрохімічним циліндричним конденсаторам. Ємність в останніх забезпечується ПЕШ, який утворюється у міжфазовій границі «метал-полімер».

Утворення ПЕШ відбувається на міжфазній межі двох середовищ з різними характеристиками провідності електронної (металевий елемент тертя) та іонної (поверхневий і приповерхневий шари накладки, що знаходяться в різних термодинамічних станах). Поверхневий і приповерхневий шари фрикційних накладок є багатокомпонентними і складають гетерогенну систему, тоді їх моделі слід розглядати з точки зору хімічної кінетики колювання реакцій. Їхній хімічний потенціал залежить від концентрації компонентів у накладці.

На рис. 7 а, б проілюстровано зміну електрохімічного потенціалу металевгої (а) [3] і неметалевгої (б) поверхонь тертя при навантаженні з їхнім різним електричним і тепловим станами. З рис. 7 б випливає, що хімпотенціал (крива 3') збільшується в зоні вище допустимої температури для матеріалів накладки, тому що на його поверхні наявні острівки електроліту.

Поява хімпотенціалу супроводжується накопиченням зарядів протилежного знаку і проявом у приконтактній зоні особливостей кожної з фаз: іонів у поверхневих і приповерхневих шарах накладки, електронів (дірок) – у металевому елементі тертя. Фізичний контакт між зазначеними вище середовищами призводить до



I, II – природних плівок окислів (первинних структур) та їх руйнування; III, IV – динамічної рівноваги та автоматичного регулювання процесів утворення та руйнування вторинних структур; 1 – закономірності для металевого елемента тертя; 2, 3, 3' – закономірності для поверхневих і приповерхневих шарів накладки до, в зоні та вище допустимої температури для її матеріалів

**Рисунок 7 – Закономірності зміни електрохімічного потенціалу металеві (а) і неметалевої (б) поверхонь пар тертя гальмівного пристрою у випадку прикладання навантажень в областях**

виникнення і формування ПЕШ. В ньому заряди локалізуються на дуже маленькій відстані, товщина в більшості випадків лежить у межах 4,0-7,0 А.

Виникнення електрохімічного циліндричного конденсатора можливе за умов, які б забезпечили надійне просторове відокремлення зарядів на його оболонці і поляризацію об'ємного заряду в приповерхневих шарах фрикційних накладок. Такі умови є ідеально поляризованими, а відповідна оболонка в заданих електродітичних системах і певних межах потенціалів – поляризованою. Природа така, що при поляризації робочої поверхні металевого елемента тертя не відбуваються фарадеевські процеси, які пов'язані з масоперенесенням матеріалу накладок через межу розділу фаз, які заблоковані для процесів перенесення зарядів. Таку поверхню називають блокуючою.

Масоперенесення матеріалу накладок через межу розділу фаз може відбуватися лише електромагнітними силами. При цьому частинки матеріалу накладок заряджаються від'ємно.

Процес поляризації відповідає заряду електрохімічного циліндричного конденсатора, при якому на ПЕШ накладок концентруються електрони з боку робочої поверхні металевого елемента тертя, а з боку поверхневих шарів фрикційних накладок, що містять вогнища електроліту, – іони. Процес деполізації сприятиме його розряду. Він відбувається в парах тертя у випадку їх вимушеного охолодження при взаємодії пар тертя, так і при розімкненому гальмі.

**Приклад розрахунку.** Аналітична залежність зростання нормального зусилля в стрічково-колодковому гальмі з м'якими парами тертя "накладка-шків" має такий вигляд

$$N = \left( V_n c_1 + c_1 [N(t_0)]^2 / [3m_1 (V_n c_1 - u c_2 / c_1)] \right) t,$$

де  $V_n$  – лінійна швидкість руху фрикційної накладки в момент дотику з робочою поверхнею шківа, м/с;

$c_1, c_2$  – жорсткість: фрикційної накладки; гальмівної стрічки, Н/м;

$N(t_0)$  – нормальне зусилля, яке діє в момент дотику плям контакту фрикційної накладки з робочою поверхнею гальмівного шківа, Н;

$m_1$  – маса фрикційної накладки, кг;

$u$  – деформація ділянки гальмівної стрічки, м;

$t$  – час взаємодії плям контакту фрикційної накладки з біговою доріжкою шківа, с.

Розрахунок виконувався за таких вихідних даних:

$$V_n = 4,0 \text{ м/с}; c_1 = 0,06 \cdot 10^6 \text{ Н/м}; c_2 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м};$$

$$N(t_0) = 0,65 \cdot 10^3 \text{ Н}; m_1 = 1,6 \text{ кг}; u = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$t = 4,0 \text{ с}.$$

Підставивши числові значення, отримали  $N = 88 \cdot 10^3 \text{ Н}$ .

Як бачимо, експериментальні дослідження підтверджують теоретичні викладки.

**Висновок.** Розкрито механізм імпульсного прикладання нормальної сили в металополімерній парі тертя з урахуванням жорсткості стрічки та фрикційної накладки, а також визначена миттєва сила тертя на плямі контакту при одинарній та безперервній зміні ймовірності густини розподілу та виділено миттєву силу тертя на нанорівні. Подальший розвиток даного дослідження вестиметься у напрямку вивчення та дослідження елементарного фрикційного мікроконтакту на стадіях зміни та руйнування.

### Література

1 Трение, износ и смазка (трибология и триботехника); под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.

2 Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безизносность): учеб. / Д.Н. Гаркунов. – М.: Изд-во "МСХА", 2001. – 606 с.



3 Поверхностная прочность материалов при трении; под. общ. ред. Б.И. Костецкого. – К.: Техника, 1976. – 296 с.

4 Акустические и электрические методы в триботехнике / А.И. Свериденко, Н.К. Мишкин, Т.Ф. Колмыкова [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1987. – 280 с.

5 Система стандартов "Надежность в технике". Основные положения. Межгосударственный совет по стандартизации и сертификации. – Минск, 2002. – 271 с.

6 Справочник по надежности; под ред. В.Р. Левино. – М.: Изд-во "Мир", 1989. – Том 1. – 229 с.

7 Ленточно-колодочные тормозные устройства / [А.А. Петрик, Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко и др.]; под общ. ред. А.А. Петрика. – В 2-х томах. Том 1. – Краснодар: из-во Кубанск. государств. технолог. ун-та, 2009. – 276 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
21.01.13*

*Рекомендована до друку  
професором **Мойсишиним В.М.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Кіндрачуком М.В.**  
(Національний авіаційний університет, м. Київ)*