

НАНОТРИБОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПАРАХ ТЕРТЯ ГАЛЬМІВНИХ ПРИСТРОЇВ (Частина друга)

¹Д.О. Вольченко, ²М.О. Вольченко, ¹І.О. Бекіш, ¹Я.В. Куриляк, ²П. А. Поляков,
³Н.М. Стебелецька

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

²Кубанський державний технологічний університет, 35062,
м. Краснодар, вул. Московська, 2, тел. (861) 2558401, e-mail: webmaster@kubstu.ru

³Бережанський агротехнічний інститут, 49016, м. Бережани, вул. Академічна, 20,
тел. (03548) 21815

У матеріалах статті на рівні нанотрибології розкрито природу утворення струмів у провідникових та напівпровідникових плівках пар тертя гальмівних пристроїв. Як приклад розглянуто дисково-колодкове гальмо та матеріали для його фрикційних елементів. Проілюстровано роботу мікротермобатарей в парах тертя гальма у режимі мікротермоелектрогенераторів та мікротермоелектроохолодильників. Перевага мікротермобатарей того чи іншого режиму при взаємодії пар тертя гальма сприяє збільшенню або зменшенню їх теплового стану. Розглянуто еталонну зміну динамічного коефіцієнта тертя матеріалу "Ретинакс" ФК – 16Л та ФК – 24А при інверсії струму в парах тертя гальма. Зміна динамічного коефіцієнта тертя розглядалася в п'яти зонах та трьох стадіях нагрівання (нижче, вище та на рівні допустимої температури) фрикційного матеріалу накладки.

Ключові слова: наноматеріали, пари тертя, напівпровідникові плівки, мікротермобатарей, мікротермоелектрогенератор, мікротермоелектроохолодильник.

В матеріалах статті на рівні нанотрибології раскрыта природа образования токов в полупроводниковых и проводниковых пленках пар трения тормозных устройств. В качестве примера рассмотрен дисково-колодочный тормоз и материалы для его фрикционных элементов. Показана работа микротермобатарей в парах трения тормоза, работающих в режиме микротермоэлектрогенераторов и микротермоэлектроохладителей. Преимущество микротермобатарей того или другого режима при взаимодействии пар трения тормоза способствует увеличению или уменьшению их теплового состояния. Рассмотрено эталонное изменение динамического коэффициента трения материала "Ретинакс" ФК – 16Л и ФК – 24А при инверсии тока в парах трения тормоза. Изменения динамического коэффициента трения рассматривались в пяти зонах нагревания фрикционного материала на трех стадиях нагревания (ниже, выше и на уровне допустимой температуры) для материала накладки.

Ключевые слова: наноматериалы, пары трения, полупроводниковые пленки, микротермобатарей, микротермоэлектрогенератор, микротермоэлектроохладитель.

The article at the nanotribology level reveals the nature of electricity formation in considered and semiconducting films in pair of friction of brake devices. A shoe disk brake and its materials for friction elements are considered here as an example. The operation of microbatteries in the brake pair of friction is illustrated. They run in the mode of microthermoelectrogenerators and microthermoelectrocoolers. The advantage of microbatteries of this of that mode under the interaction of brake pair of friction ensures an increase or decrease of their thermal state. The standard alteration of dynamic friction coefficient of the "Retinax FK – 16L and FK - 24A" material in electricity inversion in brake pairs of friction has been considered. The changes of dynamic friction coefficient were examined in five areas of friction material heating and at three levels (lower, higher and at the level of admissible temperature for brake lining material).

Keywords: nanomaterials, pairs of friction, semiconducting films, microbatteries, microthermoelectrogenerators, microthermoelectrocoolers.

Вступ. У першій частині статті на рівні нанотрибології було розкрито особливості динамічного контакту пар тертя гальмівних пристроїв і контактне зміщення в зоні контакту пар тертя гальмівних пристроїв. Проте не було розкрито природу утворення струмів у парах тертя гальмівних пристроїв і не пояснено закономірності зміни динамічного коефіцієнта тертя залежно від поверхневих температур пар тертя при інверсії струмів між ними.

Стан проблеми. Згідно класичної теорії [2, 3] в безпосередній близькості від точок контакту пари тертя "метал (1) – полімер (2)" (рис. 1а) утворюються окремі напівкульові ізотермічні поверхні, що зливаються в загальну поверхню на певній глибині. Розташування ізотермічних поверхонь характеризується величиною температурного градієнта.

Загалом температурне поле в металевому і полімерному фрикційних елементах, що відносяться відповідно до поверхневого і приповерх-

невого їх шарів представлено на рис. 2 а, б. У зоні взаємодії мають місце: t_f - температура тертя, що виникає в зоні деформації мікроділянок поверхні; t_k - контактна температура в зоні точок контакту; t_s - поверхнева температура на макроділянках взаємодії пар тертя; t_v - об'ємна температура нижче за зону деформації. Деформації мікроступів при контактуванні пари тертя "метал (1) - полімер (2)" представлені на рис. 3.

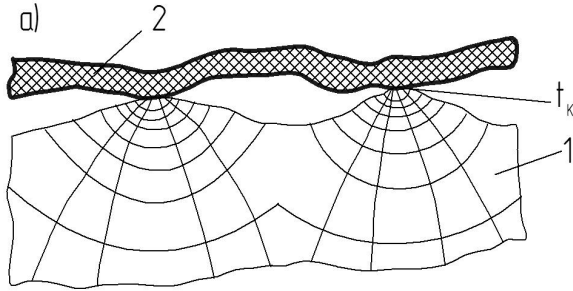


Рисунок 1 - Температурне поле поверхневого шару металевому (1) та при поверхневого (2) елементів у процесі тертя

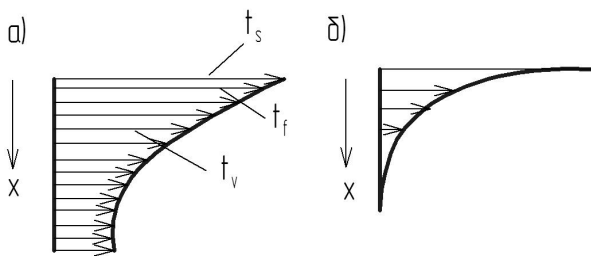


Рисунок 2 – Епюри зміни температур у металевому (1) та при поверхневого (2) шарах елементів

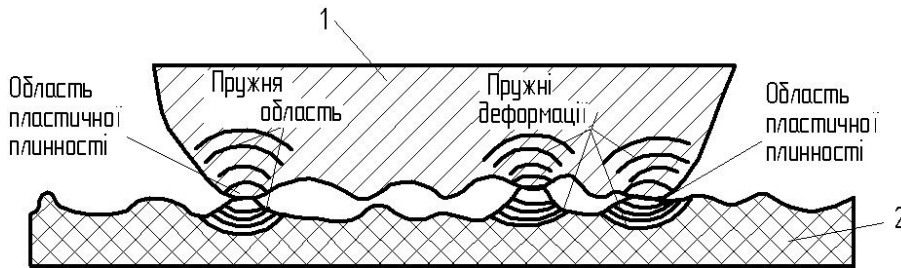
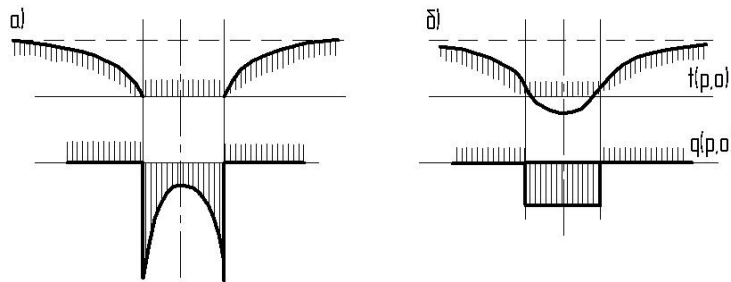


Рисунок 3 – Деформації мікроступів при контактуванні пари тертя "метал (1) – полімер (2)"



$$a - t = const ; b - q = const$$

Рисунок 4 – Розподіл температури (t) і теплового потоку (q) на плямі контакту

На рис. 4 проілюстровано розподіл температури (t) і теплового потоку (q) на плямі контакту при: $a - t = const$; $b - q = const$. Проте такий ідеальний розподіл температури (t) і теплового потоку (q) на плямі контакту в парах тертя неможливий через інверсії струмів між зонами взаємодії.

Автори роботи [4] стверджують, що при фрикційній взаємодії полімерів з металами має місце явище безлічі інверсій струмів електризації. Як одиничні, так і множинні інверсії струмів зареєстровані при контактуванні полярних і неполярних полімерів з металами, а також при динамічному контакті з металами дисперсних полімерів.

Природа утворення струмів у напівпровідникових плівках пар тертя гальмівних пристроїв. Вивчення напівпровідникових плівок, що виникають на поверхневому шарі металевих фрикційних елементів і в приповерхневих шарах фрикційних накладок, уможливило пряме перетворення теплової енергії в електричну в парах тертя гальмівних пристроїв.

Розглянемо електричні властивості напівпровідникових плівок. Якщо йдеться про "дірки", звільнені електронами, що перейшли в збуджений стан, то тоді і електрони серед вільних збуджених станів і "дірки" серед зайнятих станів здатні переносити струм. У такому напівпровіднику наявні в однаковій кількості і вільні електрони і вільні "дірки" (рис. 5 а). Прикладене електричне поле викличе струм, створюваний носіями обох знаків (рис. 5 б).

Але може трапитися так, що "дірки" утворилися тому, що частина електронів, покинувши заповнену смугу, закріпилися на атомах, побудованих домішками, що утворені у матеріалі полімерної накладки достатньою мірою присутні, перетворивши їх на негативні іони (рис. 6 а).

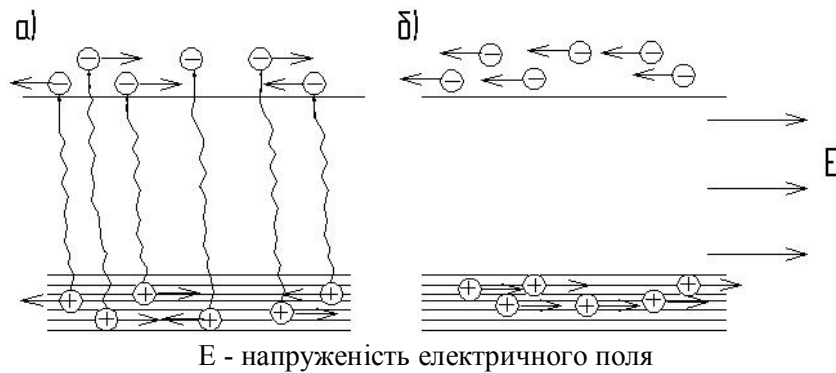
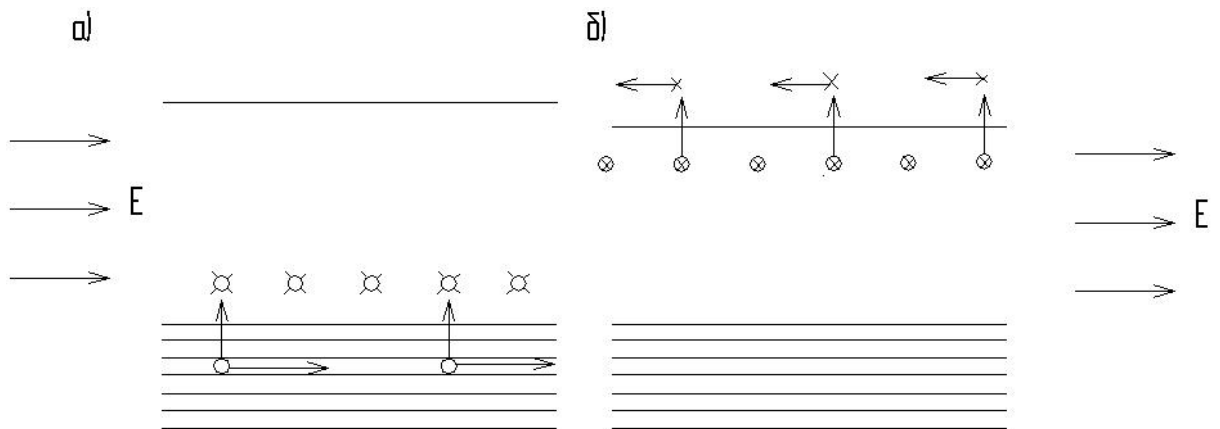


Рисунок 5 – Закономірності утворення дірок під час переходу електронів із заповненої зони у вільну зону (а) та струму в напівпровіднику завдяки електричному полю (б)



⊗ - приймачі електронів; ○ - вільний стан; ⊗ - джерела електронів (донори); × - вільні електрони
Рисунок 6 – Закономірності утворення дірок під час переходу електронів із заповненої зони на рівні домішок (а) та вільних електронів шляхом переходу їх з рівнів домішок у вільну зону (б)

Такі закріплені електрони в струмі не беруть участі, а єдиними носіями струму виявляються "дірки". Такий струм називається "дірковим". Холодний кінець зі значною нестачею електронів заряджається позитивно. Разом з електричним полем при терті ковзання виникає магнітне поле, в якому "дірки", що переносять струм, відхиляються назовні, заряджаючи робочу поверхню напівпровідникової плівки позитивно.

У напівпровідникових плівках зустрічаються і такі домішки атомів, електрони яких з'єднані слабо і легше, ніж електрони металевого фрикційного елемента, переходять у вільні збуджені стани, а самі атоми перетворюються на негативні нерухомі іони. Тоді в струмі беруть участь тільки негативні електрони, і струм називається "електронним" (рис. 6 б).

Напівпровідники з дірковим ефектом струму називають напівпровідниками *p*-типу (позитивними), а з електронами *n*-типом (негативними).

При цьому напівпровідникові плівки фрикційних елементів приймають участь в ефекті електризації при передачі пропускового і запірною струмів (рис. 7 а, б). При односторонньому напрямі струму дірки в напівпровідниковій плівці і електрони в напівпровідниках рухаються у зустрічному напрямку, створюючи пропусковий струм, а при двосторонньому напрямі

струму вони відштовхуються, збільшуючи опір непровідного запірною шару.

Іноді достатньо 1% атомів домішок у приповерхневих шарах матеріалу фрикційних накладок, щоб підвищити концентрацію вільних електронів або дірок в мільйон разів. У скільки ж раз зросте при цьому і електропровідність напівпровідникової плівки.

Отже, введення тих або інших домішок до складу напівпровідникових плівок, які формуються при взаємодії пар тертя, дасть змогу управляти в широких межах електропровідністю і змінювати знак носіїв струму. Крім того, існує можливість вибору відповідного конструкційного матеріалу для кожної конкретної пари тертя гальмівних пристроїв із широкою гамою напівпровідників, що охоплює ряд елементів (B, C, Si, Ge, S, Se, Te, P, As), сплавів (Mg_3Sb_2 , ZnSb, Mg_2Sn , CdSb, AlSb, InSb, GeSb), оксидів (Al_2O_3 , Cu_2O , ZnO, TiO_2 , UO_2 , WO_3 , MoO_2), сульфідів (Cu_2S , Ag_2S , ZnS, CdS, HgS), соленидів і теллуридів і безліч складніших з'єднань, що уможливило підбір найбільш ефективних матеріалів.

Матеріали пар тертя дисково-колодкових гальм. Зупинимося на структурних особливостях чавуну Gh 190, отриманих Д.А. Болдиревим у дослідницькому центрі ВАТ "АВТОВАЗ" (м. Тольятті, Росія).

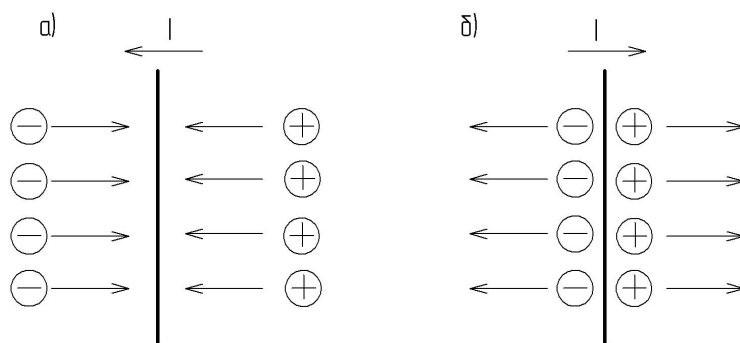


Рисунок 7 – Пропускний (а) і запірний (б) струми в електронних (-) і діркових (+) напівпровідникових плівках фрикційних елементів

Таблиця 1 - Результати металографічних досліджень гальмівних дисків

| Параметр | Чавун | | | |
|-----------------|--|---|---|---|
| | Gh 190 | Диск 1 | Диск 2 | Диск 3 |
| Графіт | Тип А №4, 5; В; D | Тип А №4, 5 | Тип А №4, 5; В; Е | Тип А №4, 5; В |
| Металева основа | Перліт пластинчастий MnS - 0,06% мас* | Перліт пластинчастий ферит до 10% об MnS - 0,17% мас* | Перліт пластинчастий ферит до 15% об MnS - 0,22% мас* | Перліт пластинчастий MnS - 0,18% мас* |
| Графіт | Диск 4 | Диск 5 | | Диск 6 |
| | Тип А №4, 5; В; D | Тип А №4, 5; | | Тип А №4, 5; |
| Металева основа | Перліт пластинчастий ферит до 10% об MnS - 0,24% мас* | Перліт пластинчастий ферит до 5% об MnS - 0,29% мас* | | Перліт пластинчастий ферит до 1% об MnS - 0,33% мас* |

* - * - Розраховано за стехометричним співвідношенням; мас - масові доли; об – об’ємні доли

Результати металографічних досліджень матеріалів гальмівних дисків вітчизняного і імпортного виробництва наведені в табл. 1.

Для мікроструктури матеріалу імпортних дисків характерний переважно графіт типу А (окрім мікроструктур матеріалів гальмівних дисків 4, яким властивий також графіт типів В і D); гальмівних дисків 2 - типи В і Е і гальмівних дисків 3 - тип В); мікроструктурі чавуну Gh 190 властивий графіт типів А, В, D, тобто матеріали-аналоги для гальмівних дисків мають тонші і рівномірно розподілені (окрім матеріалу гальмівного диска 2) включення графіту, що може сприяти підвищенню його зносостійкості за рахунок намазування графіту на поверхні фрикційних накладок, і як наслідок, збільшення електропровідності.

Таким чином, при тривалій експлуатації дискового гальма під дією динамічного та теплового навантаження на поверхні мікроділянок полімерної накладки виникає графен, за розробку якого в 2010 році було вручено Нобелівську премію.

У структурі матеріалів гальмівних дисків імпортного виробництва виявлений ферит, кількість якого змінюється від 1% (гальмівний диск 6) до 10-15% (гальмівні диски 1,2 і 4). В чавуні Gh 190 фериту не виявлено.

У структурі матеріалів гальмівних дисків імпортного виробництва виявлені включення

сульфіду марганцю при підвищеному (порівняно з чавуном Gh 190) вмісті сірки, які сприяють підвищенню зносостійкості (у чавуні Gh 190 сульфідів відсутні).

Зупинимося на хімічному складі полімерних фрикційних накладок (табл. 2).

Матеріалом фрикційної накладки є композит, що складається з фракцій різної дисперсності і хімічного складу. У табл. 2 представлені матеріали вітчизняних DAFmi, Trans Master (Україна) і зарубіжних QH, Zucas, AP Zockheed, Eerodo (Великобританія); ATE, Bosch (Німеччина); Samko (Італія); Roulunds (Угорщина) і Полиэдр, ВАТИ, STS, ТИИР, ЕЗАТИ (Росія) фрикційних накладок, що відрізняються за твердістю, міцністю і пружністю, за хімічним і композитним складом, розмірам і дисперсністю структурних складових.

Сполучним елементом усіх матеріалів фрикційних накладок є фенолформальдегідна смола (табл. 2). У всіх матеріалах накладок основними твердими включеннями є: сталеві висічка, алюмінієвий і латунний ошарок (у матеріалі накладки D - мідний ошарок), слюда.

Порівняльний аналіз компонентів, що входять до складу матеріалів гальмівних дисків і фрикційних накладок, що більшість з них відносяться до напівпровідникових матеріалів. Крім того, взаємодія пар тертя "чавун-полімер" в різних середовищах дозволяє формувати на їх

Таблиця 2 – Хімічний склад матеріалів фрикційних накладок

| Фрикційна накладка | Вміст елементів, % | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|
| | Cсвоб | S | Al | Cu | Fe | Si | Zn | Pb | Ni |
| G | 16,40 | 3,70 | 3,33 | 7,66 | 3,69 | 0,64 | 2,78 | 3,10 | 0,260 |
| B | 24,20 | 2,95 | 3,95 | 3,34 | 14,90 | 1,08 | 2,23 | 0,08 | 0,020 |
| C | 18,10 | - | 0,84 | 11,80 | 27,40 | - | 3,28 | 0,13 | - |
| A | 22,70 | - | 1,97 | 5,84 | 14,30 | 1,12 | 3,67 | 0,16 | 0,023 |
| H | 19,60 | - | 0,24 | 5,13 | 19,50 | 0,34 | 1,10 | 0,01 | 0,004 |
| D | 19,10 | - | 0,13 | 11,77 | 35,20 | 0,29 | 3,52 | 0,05 | 0,008 |
| J | 22,30 | - | 0,31 | 0,23 | 30,90 | 0,21 | 0,07 | 2,08 | 0,001 |
| K | - | - | 0,50 | 9,50 | 32,70 | 0,28 | 2,68 | 2,40 | - |
| L | - | - | 0,36 | 10,50 | 34,00 | 0,29 | 2,97 | 2,66 | - |
| E | 19,4 | 19,4 | 0,67 | 8,23 | 19,4 | 0,11 | 2,41 | 0,09 | 0,01 |
| F | 19,0 | 19,0 | 0,82 | 9,85 | 19,6 | 0,24 | 3,56 | 0,16 | 0,05 |

| Фрикційна накладка | Вміст елементів, % | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Ti | Sb | Ba | Ca | K | Mn | Mg | Na | Sr |
| G | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| B | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| C | 0,140 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| A | 0,140 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| H | 0,060 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| D | 0,020 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| J | 0,060 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| K | 0,040 | 4,50 | 0,84 | - | - | - | - | - | - |
| L | 0,040 | 4,90 | 0,58 | - | - | - | - | - | - |
| E | 0,002 | - | 2,88 | 2,88 | 0,04 | 0,13 | 0,10 | 0,05 | 0,02 |
| F | 0,080 | - | 2,87 | 0,36 | 0,21 | 0,17 | 0,30 | 0,05 | 0,03 |

поверхнях напівпровідникові плівки залежно від теплового стану металевого і неметалевого фрикційного елемента.

Оскільки з тим, що матеріал фрикційної накладки поводить по-різному в інтервалі температур до допустимої і вище неї приповерхневі шари накладки можуть перебувати в твердому стані, або, частково, в рідкому та газоподібному станах. Виходячи з цього, виділимо типи поверхонь розділу середовищ: "метал-полімер"; "метал-полімер з рідиною"; "метал-полімер з рідиною і з газом"; "метал-газ-полімер". На розділяючі шари в парах тертя гальмівних пристроїв діють: об'ємна і гранична в'язкість; теплоємність; хімічна активність і виникаючі шари, що є об'єктом окремих досліджень, оскільки завдяки їм відбуваються процеси сорбції, десорбції і адсорбції.

При цьому на поверхнях взаємодії і пар тертя «чавун-полімер» також формуються і електропровідні плівки з компонентів, які залишилися в складі матеріалу фрикційних елементів, здатні виконувати функції елементів мікротермобатарей.

Робота мікротермобатарей в парах тертя гальмівних пристроїв [5 - 11] у фрикційному контакті мають бути завжди присутні плівка оксиду (робоча поверхня гальмівного диска) і плівка м'якої складової тертя (робоча поверхня фрикційної накладки).

На ювенільній голій поверхні гальмівного диска атоми кристалічної ґратки легко взаємодіють з навколишніми елементами, що призводить до утворення на поверхні металу надзвичайно тонких, невидимих неозброєним оком плівок оксидів і різних речовин, що містяться в міжконтактному проміжку пар тертя гальма. Ці плівки дуже міцно сполучені з металом і можуть бути видалені лише при спеціальному ретельному очищенні: нагріванням у вакуумі до високих температур, дією адсорбуючих речовин, однак найбільш дієвим способом очищення є руйнування окисних плівок при терті.

Робоча поверхня фрикційної накладки містить окислені і неокислені плівки, які є м'якими. При цьому міцність зв'язку елементів поверхневого шару накладки має меншу міцність, ніж в основному її матеріалі.

За часом захоплення носіїв розрізняють швидкі і повільні поверхневі стани пар тертя дискового гальма. Швидкі стани часто виникають на чистій поверхні, що не окислюється, і відрізняються слабкою специфічністю до конкретного виду дефектів. Час життя швидких станів складає $10^{-4} - 10^{-7}$ с.

Повільні поверхневі стани зазвичай пов'язують з наявністю окисних плівок на робочій поверхні гальмівного диска і фрикційних накладок, вони найчастіше обумовлені процесами адсорбції-десорбції. За даними робіт [4], час

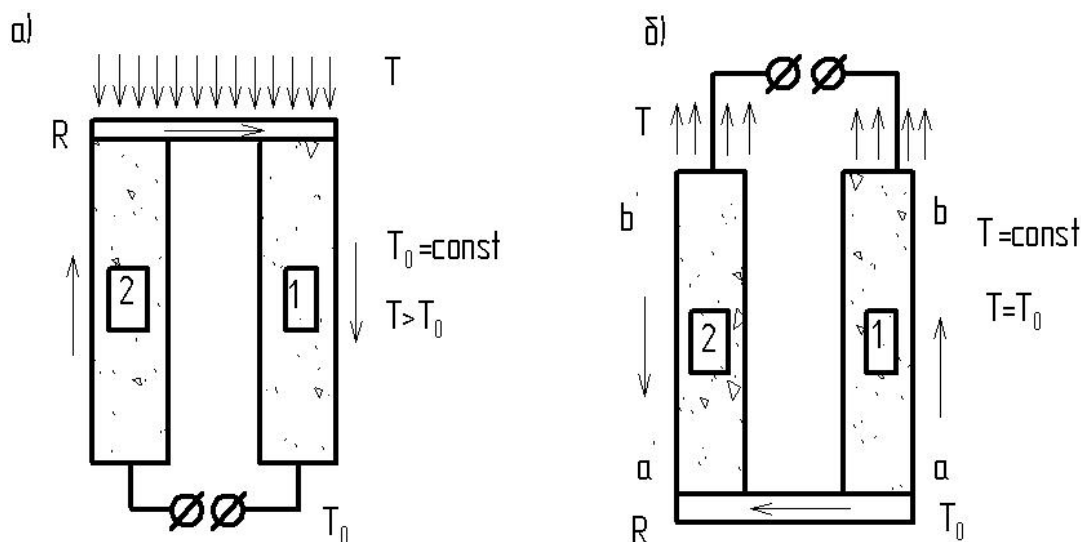


Рисунок 8 – Мікротермобатареї з термоелементами (1 і 2), що працюють в режимах макротермогенератора (а) і мікротермохолодильника (б)

життя повільних станів коливається у межах від 10^{-2} с до декількох годин чи діб, а їх щільність складає $10^{10} - 10^{15}$ см^2 . Остання залежить від зовнішніх чинників та електричних властивостей пар тертя дискового гальма. За даними Круппа [5], щільність поверхневих станів для полімерів складає $D_s = 10^{10}$ см^2 .

Таким чином, за наявності поверхневих станів і заповнення їх носіями заряду на поверхні фрикційної накладки виникає електричний заряд. Причому повний поверхневий заряд загалом є сумою зарядів швидких (σ_1) і повільних (σ_2) поверхневих станів

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2.$$

Тоді для швидкоплинних процесів, тобто процесів електризації при терті, коли час контакту складає 10^{-5} с, повний поверхневий заряд фрикційної накладки дорівнюватиме сумі зарядів в швидких і повільних поверхневих станах.

Найбільш достатнього впливу поверхневих станів пар тертя дискового гальма зазнає структура подвійного шару при контакті "метал-полімер". У цьому випадку при великій щільності поверхневих станів реалізується ефект "металізації" поверхні полімеру, при якому заряд подвійного шару утворюється за рахунок іонізації поверхневих станів і за порядком величини порівняний із зарядами шарів, що виникають при контакті металів. Слід враховувати той факт, що система "метал-полімер" під час контактування перебуває в незрівноваженому термодинамічному стані. Водночас взаємодія часток усередині мікроскопічного малого об'єму, якими є термоелементи (напівпровідникові плівки "метал-полімер") мікротермобатареї набагатл сильніша, ніж з елементами інших частин системи, внаслідок чого кожен такий об'єм можна вважати таким, що перебуває в рівновазі, а між окремими об'єктами (тобто в усій системі) рівновага відсутня.

Розглянемо принцип роботи мікротермобатареї, які складаються з двох електропровідних матеріалів і мають різну провідність (рис. 8а), обумовлену роботою пар тертя дискового гальма в діапазоні температур нижче і вище за допустиму для матеріалу фрикційної накладки, тобто за різних температур поверхні. При цьому приповерхневий шар не зазнає деструктивних змін.

Кінці термоелементів 1 і 2 сполучені металевим містком з опором R, що є окислювальною плівкою з напівпровідниковими властивостями, яка знаходиться в елементарному об'ємі приповерхневого шару диска і гарячого спаю і виконує функції мікро-термобатареї. Електропровідність термоелемента 1 утворена масопереносом фрикційного матеріалу накладки на робочу поверхню диска гальма. У елементарному об'ємі приповерхневого шару фрикційної накладки знаходиться м'яка окислювальна плівка з напівпровідниковими властивостями, яка і сполучає протилежні кінці термоелементів електричним ланцюгом. При терті температура з'єднувального містка перевищує температуру холодильних кінців термоелементів ($T > T_0$). При цьому тепла енергія атомів гарячого кінця термоелементів зростає. Ця енергія виконує роботу переходу електронів у вільний стан. У зв'язку з цим в термоелементі 1 на гарячому кінці з'являється більша кількість вільних електронів з вищою тепловою енергією, ніж на холодному кінці, який заряджається при цьому негативно. У зв'язку з тепловим рухом атомів у термоелементі 2 деяка частина електронів виноситься з робочої зони. На їхньому місці з'являються вільні електрони, які мають позитивний заряд. Напрямок переміщення позитивних зарядів співпадає з напрямом електричного поля, тому їхній рух прискорюється. В той же час електрони, які рухаються проти електричного поля, сповільнюються і переходять в зону менших швидкостей. При цьому за рахунок адсорбції кисню частина поверхні окисної плівки в елементар-

ному об'ємі приповерхневого шару накладки заряджається негативно, будучи холодним кінцем термоелемента 1. При замиканні ланцюга тут спостерігається електричний струм, зумовлений різницею температур: фактично має місце ефект Зеебека, а сама мікротермобатарей є мікротермоелектрогенератором.

Розглянемо роботу мікротермобатарей за умови, що температура поверхні фрикційної накладки перевищила допустиму для її матеріалів. Як видно з рис. 8 б полярність термоелементів 1 і 2 за умови $T=T_0$ стала протилежною (рис. 8 а). При цьому приповерхневий шар фрикційної накладки зазнає деструкційних змін, а поверхні тертя гальма піддаються адсорбційно-десорбційній дії.

Якщо по внутрішньому ланцюгу, усі елементи якого знаходяться в однакових умовах ($T=T_0$), протікає електричний струм в напрямі, вказаному на рис. 8 б, то рух вільних електронів у термоелементі 1 спрямований від спаю (а) до спаю (в), причому цей рух є уповільненим, оскільки електрони гальмуються електричним струмом. Рух електронів від спаю (а) до спаю (в) супроводжується перенесенням енергії. На спаї (а) електрони, відбираючи енергію атомів, мають приріст кінетичної енергії. На кінці (в), стикаючись з атомами кристалічної решітки окисленої плівки поверхні диска гальма, вони віддають енергію вказаному спаю. У зв'язку з цим спаї (а) охолоджується, а спаї (в) нагрівається. Причому скупчення електронів на спаї (в) сприяє тому, що спаї заряджається негативно, а спаї (а) - позитивно.

У термоелементі 2, сполученому з термоелементом 1 за допомогою електролітного містка з опором R, напрям електричного струму збігається з напрямом руху іонів: від спаю (а') до спаю (в'). Внаслідок чого рух іонів прискорюється. Тому найбільш інтенсивний рух електронів спостерігається біля спаю (в'). Утворення електронів в елементарному об'ємі приповерхневого шару диска пов'язане з іонізацією газової суміші біля нього, а також десорбцією вологи на ньому. У самому ж елементарному об'ємі приповерхневого шару диска рух вільних електронів відбувається проти руху електричного струму, тобто проти його поля. При цьому електрони, зіштовхуючись з атомами, підвищують їх внутрішню енергію, яка витрачається на нагрівання цього спаю. У міру просування від спаю (в') до спаю (а') вздовж гілки термоелемента 1 енергія електронів зменшується, внаслідок чого спаї (а') охолоджується. Скупчення іонів на цьому спаї зумовлює його негативний заряд, хоча загалом, спаї (а') заряджений позитивно.

Таким чином, рух струму інверсії через мікротермобатарей призводить до перепаду температур на її спаїх. На спаї (а') поглинається тепло, а на спаї (в') - виділяється в результаті контактної взаємодії пар тертя гальма. В цьому випадку мікротермобатарей працює в режимі мікротермоелектроохолодильника.

При виникненні в парах тертя мікротермобатарей, що працюють в режимах мікротермо-

електроохолодильників і мікротермоелектрогенераторів, можливе виникнення струму зміщення. Останній має умовну назву «локалізованого електричного поля», яке супроводжується магнітним полем. На протигагу іншим струмам (провідності, конвекційного) він не викликаний впорядкованим рухом зарядів, тому за відсутності діелектрика (і його переполяризації) тепла енергія в зоні тертя не розвивається.

Проте струм зміщення впливає на теплову енергію у тому випадку, якщо поверхня фрикційної накладки досягає температури, вищої допустимої для її матеріалів: волога, що з'являється на поверхні накладок викликає переполяризацію останньої, яка відіграє роль діелектрика.

Комплексне дослідження впливу закономірностей контакту пар тертя "метал-полімер" на кінетику електризації робочих поверхонь фрикційних накладок дозволив встановити, що перша інверсія струму електризації викликана десорбцією вологи з приповерхневих шарів накладок, а наступні, ймовірно, фізико-хімічними процесами в її шарах, викликаними зміною енергетичного стану металополімерної системи. До останньої можна використовувати електронну систему неупорядкованої дії.

Термобатарей, виконуючи роль термоелектрогенератора або термоелектроохолодильника, можуть змінювати напрям струму збільшуючи, зменшуючи або стабілізуючи при цьому його силу.

Мікротермобатарей можуть бути розташовані відносно поверхонь тертя дискового гальма в поперечному і в подовжньому напрямі. Пари тертя гальма взаємодіють в гіротропному середовищі і схильні до гальвано- і термомагнітних ефектів. Розрізняють: поперечний і подовжній гальваномагнітні та поперечний і подовжній термомагнітні [6] ефекти, прояв яких залежить від напруженості магнітного поля, що викликається електричним полем.

Закономірності для поперечних і подовжніх ефектів мають характер лінійних і квадратичних залежностей з урахуванням того, що в парах тертя гальма наводяться слабкі магнітні поля.

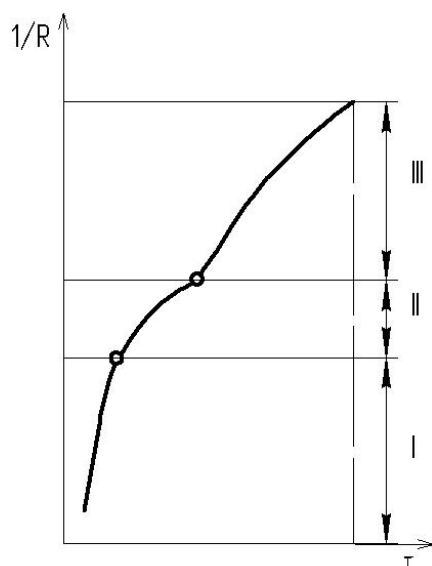
Результати теоретичних [9-11] і експериментальних досліджень представлені в табл. 3, що стосуються динамічних і електричних характеристик стану пар тертя гальмівних пристроїв.

Висновки. Таким чином, з аналізу отриманих схем інверсії струмів при різних теплових станах поверхонь диска гальма і фрикційних накладок, а також з приповерхневих шарів випливає, що на величину і полярність генерованого струму трибоелектризації впливають не лише початкові властивості контактуючих пар тертя гальма дискового гальма, але і комплекс механо-хімічних процесів, що відповідають фрикційній взаємодії.

Таблиця 3 – Динамічні і електричні характеристики стану пар тертя гальмівних пристроїв

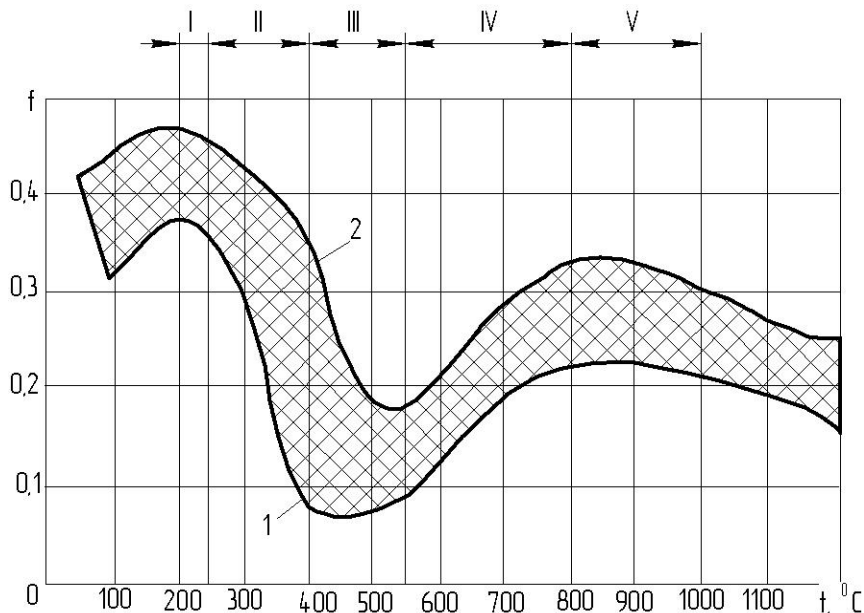
| Стан поверхонь при- поверхневого шару фрикційної накладки | | Опис характеристик | | | циркуляції струмів |
|---|---|--|--|---|--------------------|
| | | стани міжконтактного середовища | пара тертя гальмівних пристроїв | подвійних електричних шарів | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Поверхнева температура | До допустимої для матеріалу фрикційної накладки | У момент початку роботи пари тертя і дії питомих навантажень на її поверхні відбувається руйнування щонайтонших окисних шарів, що призводить до зміни їх поверхневого електричного потенціалу (рис. 9, стадія I). Під дією усе зростаючих питомих навантажень відбувається активна деформація поверхневих шарів фрикційних накладок і зміцнення робочої поверхні металевого фрикційного елемента (див. рис. 9, стадія I). На цій стадії відбувається підготовка поверхневих шарів до утворення достатньої кількості активних центрів, що визначають їх подальший розвиток внаслідок плинності металу робочої поверхні металевого фрикційного елемента. З підвищенням температури від 100 до 200°C спостерігається збільшення середнього динамічного коефіцієнта тертя від 0,39 до 0,42 (рис. 10). Характеристика фрикційної теплостійкості на цій ділянці визначається в основному властивостями пружнопластичності матеріалу (перехід від пружного до пластичного контакту). На ділянці температур від 200 до 350 °С динамічний коефіцієнт тертя визначається розвитком пластичних деформацій з поступовим, у міру підвищення температури, димленням сполучного матеріалу (смоли) фрикційних матеріалів. Кількість повітря, що поступило на контакт кінцю, визначає інтенсивність термоокислювання деструкційних процесів. Крім того, повітря є окислювальним середовищем, яке сприяє розвитку адсорбційного і щлинного ефектів. | Існує один подвійний електричний шар біля робочої поверхні металевого фрикційного елемента. При цьому диск металевого фрикційного елемента виконує функції термомоелектрогенератора, а приповерхневий шар накладок - термоелектрохолодильників | Струм електризації спрямований від робочої поверхні накладки до робочої поверхні диска металевого фрикційного елемента (прямий струм) | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------|---|--|---|--|
| Поверхня температура | При досягненні допустимої матеріалом фрикційної накладки | <p>Пара тертя працює як при підвищених, так і при знижених питомих навантаженнях фізичного контакту в парах тертя. При цьому проявляються закони несталої плинності в умовах сталого зміни (звичайч змінення) рівня напруги в диску металевого фрикційного елемента (рис. 9, стадія ІІ). На ділянці від 450 до 600°C (четверта зона) підвищення динамічного коефіцієнта тертя пояснюється утворенням коксоподібних продуктів деструкції сполучного компонента, що зрештою призводить до формування фрикційного робочого шару. У п'ятій зоні (600-800°C) динамічний коефіцієнт тертя знову стабілізується і досягає значення 0,32.</p> <p>Азот і вуглекислий газ (табл. 4) є нейтральними середовищами, в яких адсорбційний і щільний ефекти виражаються. При цьому спостерігається збільшення N_2 до 0,171% в масових частках і з'являється CO (0,43% в масових частках).</p> | <p>Виникає і розвивається сильний подвійний електричний шар в приповерхневих шарах фрикційних накладок і слабкий подвійний електричний шар у диску металевого фрикційного елемента.</p> <p>Приповерхневий шар фрикційної накладки виконує функції термоелектрогенератора, а диск металевого фрикційного елемента - термоелектрохолодильника.</p> | <p>Переважаюча інверсія струмів від робочої поверхні металевого фрикційного елемента в напрямку приповерхневого шару фрикційних накладок. Слабка інверсія прямих струмів.</p> |
| Поверхня температура | При перевищенні допустимої матеріалом фрикційної накладки | <p>Пара тертя працює за сталих питомих навантажень, і розвиток фізичного контакту відбувається внаслідок плинності робочої поверхні диска металевого фрикційного елемента. При цьому із зростанням температури процес розвитку фізичного контакту інтенсифікується. Крім того, встановлено що фізичний контакт є процесом релаксації внутрішньої напруги в приповерхневому шарі диска металевого фрикційного елемента, при якому розвиваються контакти за рахунок поверхневого пластичного тертя (рис. 9, стадія ІІ).</p> <p>Динамічний коефіцієнт тертя стабілізується і має мінімальне значення 0,18 (рис.5, третя зона); ця зона відноситься до області депресії, в якій фрикційні характеристики цілком визначаються змащувальною дією рідких продуктів деструкції смоли.</p> <p>Спостерігається різке зменшення CO_2 до 0,13% в масових частках і з'являється H_2 (0,123% в масових частках) (табл. 4).</p> | <p>Існує сильний подвійний електричний шар біля робочої поверхні металевого фрикційного елемента і спостерігається формування подвійного електричного шару в приповерхневому шарі фрикційних накладок. При цьому диск металевого фрикційного елемента продовжує виконувати функції термоелектрогенератора, а приповерхневий шар накладок - термоелектрохолодильників.</p> | <p>Переважаюча інверсія струмів від робочих поверхонь фрикційних накладок в роботу поверхню металевого фрикційного елемента (прямий струм). Водночас спостерігаються слабкі зворотні струми.</p> |



I, II - початковою і кінцевою поверхневою пластичного тертя;
 III - високотемпературній плинності

Рисунок 9 – Закономірності зміни електропровідності (1/R) при формуванні зони фізичного контакту від часу (τ) на різних стадіях



I - 200-250°C; II - 250-400°C; III - 400-550°C; IV - 550-800°C; V - 800-1000°C

Рисунок 10 – Еталонна зміна динамічного коефіцієнта тертя матеріалу "Ретинакс" ФК-16Л (крива 1) і ФК-24А (припечений, крива 2) у функції температури поверхні по зонах

Таблиця 4 – Відсотковий вміст газової суміші, утвореної в міжконтактному просторі пари тертя

| Номер проби | Марка компонента | Температура, °C | Вміст газу, масова частка, % | | | | | | інші гази *** |
|-------------|------------------|-----------------|------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------|--------------------------------|---------------|
| | | | H ₂ | O ₂ | N ₂ | CO ₂ | CO | ΣC _n H _n | |
| 1 | ФК-24-А | 150 | * | 19,8 | 78,8 | 0,28 | * | * | Решта |
| 2 | - | 215 | * | 19,8 | 78,8 | 0,23 | * | * | |
| 3** | - | 420 | 0,123 | 19,1 | 79,5 | 0,13 | * | * | |
| 4** | - | 500 | 0,171 | 16,3 | 81,6 | 0,24 | 0,43 | 0,24 | |
| 5 | - | 730 | 0,308 | 9,8 | 81,2 | 0,08 | 6,51 | 1,06 | |

Література

- 1 Вольченко Д.О. Нанотрибологічні процеси в парах тертя гальмівних пристроїв (частина перша) / Д.О. Вольченко, М.О. Вольченко, І.О. Бекіш, Я.В. Куриляк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – № 4(37). – С. 64-70.
- 2 Крагельский И.В. Современные представления о трении и износ материалов / И.В. Крагельский – в кн.: Исследование структуры фрикционных материалов при трении. – М.: Наука, 1972. – С. 8-16.
- 3 Крагельский И.В. Фрикционное взаимодействие тел / И.В. Крагельский // Трение и износ. – 1980. – Т.1. – С. 67.
- 4 Вольченко Д.А. Нанотрибология при оценке двойного электрического слоя в парах трения тормозных устройств / Д.А. Вольченко // Проблемы трибологии. – 2009. – №(3). – С. 108-114.
- 5 Миронов В.С. Электрические явления при трении полимеров. II. Кинетика электризации / В.С. Миронов, А.Ф. Климович // Трение и износ. – 1985. №6 – Т. VI – С.1026 – 1033.
- 6 Пленочные термоэлементы: физика и применение / [Гольцман Б.М., Дашевский З.М., Кайданов Б.И., Колomoец Н.В.]. – М.: Наука, 1985. – 213 с.
- 7 Прокопів В.В. Матеріали електронної техніки / В.В. Прокопів. – Івано-Франківськ: Плай, 2009. – 228 с.
- 8 Наноматеріали в пристроях генерування і накопичення електричної енергії / Б.К. Остафійчук, І.М. Бузуляк, І.І. Григорчак, І.Ф. Миронюк. – Івано-Франківськ: Плай, 2003. – 203 с.
- 9 Чичинадзе А.В. Износостойкость фрикционных полимерных материалов / А.В. Чичинадзе, В.Я. Белоусов, И.М. Богатчук. – Львов: Вища школа, 1989. – 114 с.
- 10 Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника); под. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
- 11 Кіндрачук М.В. Трибологія / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лубенець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – Київ: Вид-во нац. авіац. ун-ту: «НАУ - друк», 2009. – 392 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії

03.03.11

*Рекомендована до друку професором
Вольченком О.І.*