



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **116249** (13) **C2**
(51) МПК

F16D 65/78 (2006.01)

F16D 69/02 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

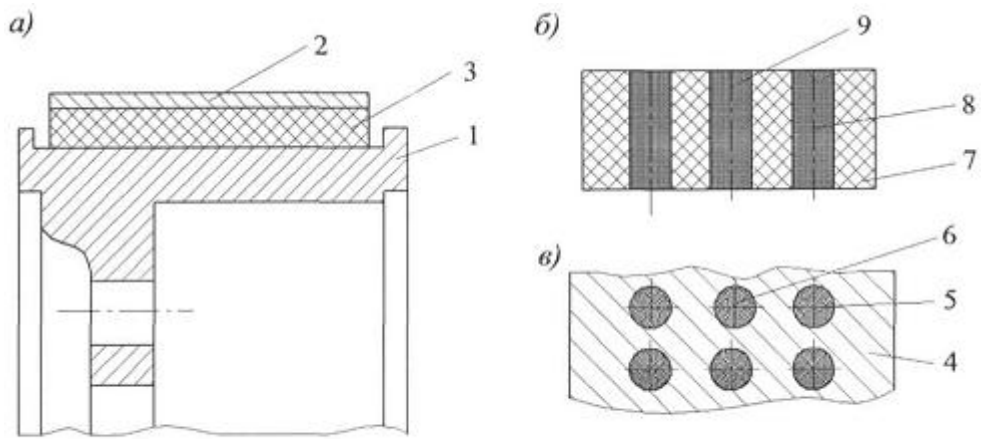
(21) Номер заявки: а 2015 12824	(73) Власник(и): ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019 (UA)
(22) Дата подання заявки: 24.12.2015	
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 26.02.2018	
(41) Публікація відомостей про заявку: 25.04.2016, Бюл.№ 8	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: SU 354198 A1, 09.10.1972 US 20120000737 A1, 05.01.2012 US 5163526 A, 17.11.1992 DE 102010050284 A1, 03.05.2012 RU 2531676 C2, 27.10.2014 RU 2268416 C2, 20.01.2006 RU 2124153 C1, 27.12.1998 Вольченко Д.О. Нанотрибологічні процеси в парах тертя гальмівних пристроїв (частина друга) / Д.О. Вольченко, М.О. Вольченко, І.О. Бекіш, Я.В. Куриляк, П.А. Поляков, Н.М. Стебелецька // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2011. - № 1(38). - С. 51-61
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 26.02.2018, Бюл.№ 4	
(72) Винахідник(и): Вольченко Дмитро Олександрович (UA), Кіндрачук Віталій Мирославович (UA), Вольченко Микола Олександрович (UA), Криштопа Святослав Ігорович (UA), Журавльов Дмитро Юрійович (UA), Возний Андрій Володимирович (UA)	

(54) ЕНЕРГОЄМНІ ПАРИ ТЕРТЯ ВАЖКОАВАНТАЖЕНИХ ФРИКЦІЙНИХ ВУЗЛІВ

(57) Реферат:

Винахід належить до матеріалів для енергоємних пар тертя важконавантажених фрикційних вузлів, зокрема до стрічково-колодкових гальм бурових лебідок. Енергоємні пари тертя утворені у важконавантажених фрикційних вузлах, які містять металевий і неметалевий фрикційні елементи, в яких по шарах різної товщини у вигляді повторюваних композиційних матриць розміщені циліндричні вкраплення з твердих напівпровідникових матеріалів типу оксиду алюмінію і карбїду бору в послідовності, що чергується. Згадані вкраплення розташовані в неметалевому фрикційному елементі паралельно, а в металевому - перпендикулярно, поверхні тертя фрикційних елементів, та утворюють, таким чином, тимчасові Т-подібні енергетичні містки з різними типами контактів. Винахід дозволяє покращити ефективність гальмувань і збільшити ресурс фрикційних накладок за рахунок формування нових пар тертя.

UA 116249 C2



Фиг. 1, а, б, в

Винахід належить до матеріалів для енергоємних пар тертя важконавантажених фрикційних вузлів, зокрема до стрічково-колодкових гальм бурових лебідок. Відомі термоелектричні пари різної форми із замкненим і розімкнутим ланцюгами, що утворюються в парах тертя "метал-метал", "полімер-полімер", "метал-полімер". Однак досі не розглянуті пари тертя "напівпровідник-напівпровідник", "напівпровідник-метал", "напівпровідник-полімер", "напівпровідник-полімер-метал", в яких під дією теплової енергії напівпровідник змінює свої електропровідні властивості [1, аналог; Новий підхід до теплової динаміки тертя фрикційних вузлів гальмівних пристроїв (частина 4) /О.І. Вольченко, М.В. Кіндрачук, Д.О. Вольченко [и др.] //Наук. техн. зб.: Проблеми тертя та зношування. - К.: НАУ, вип. 56, 2011. - С. 60]. Відомий теплопоглинальний матеріал для металевих фрикційних елементів гальмівних пристроїв, для підвищення їх енергоємності на основі хімічних сполук металу, він складається з фторидів берилію і кальцію при наступному співвідношенні ваги компонентів, %:

Фторид берилію	85-91
фторид кальцію	15-9

(прототип, а.с. № 354198 СРСР, м. кл. F16d 69/00, опубл. 09.10.1972, б. і. № 30). Однак основним недоліком теплопоглинаючого матеріалу, що є легкоплавким евтектичним сплавом фторидних солей берилію і кальцію, є низька температура плавлення 495 °С. Таким матеріалом можна заповнити оболонку і встановити її в гальмівний шків і акумулювати енергію гальмування, оскільки пари тертя стрічково-колодкового гальма працюють в 1,5-2,0 рази більшою енергонавантаженостю. У порівнянні з аналогом і прототипом запропоноване технічне рішення має такі відмінні ознаки:

- штучно формуються нові типи контактів пар тертя "напівпровідник-напівпровідник", "напівпровідник-полімер" і "напівпровідник-метал" за рахунок вкраплень в робочі поверхні фрикційних вузлів напівпровідникових елементів;

- змінюється тип провідності одного з напівпровідників в залежності від його енергонавантаженості, а іншого напівпровідника тип провідності залишається постійним, що позначається на роботі термоелектробатарей в режимах термоелектрогенераторів і термоелектрохолодильника;

- знижується зарядна енергетика пар тертя за рахунок формування нових типів контактів у парах тертя;

- залежно від енергонавантаженості пар тертя формується більше термоелектробатарей, працюючих у режимі термомелектрохолодильника, ніж в режимі електрогенератора, що істотно знижує енергонавантаженоість пар тертя гальма.

Задачею цього винаходу є впровадження у вигляді повторюваних композиційних матриць в матеріали важконавантажених пар тертя "Ретінакс ФК-24А - сталь 35ХНЛ" вкраплень з твердих напівпровідникових матеріалів типу оксиду алюмінію і карбіду бору для отримання різних типів контактів при фрикційній взаємодії в залежності від їх енергонавантаженості.

Поставлена задача вирішується тим, що на парах тертя важконавантажених фрикційних вузлів змодельовані по шарах різної товщини у вигляді повторюваних композиційних матриць, в яких розміщені короткі циліндричні вкраплення з твердих напівпровідникових матеріалів типу оксиду алюмінію і карбіду бору у чергуючій послідовності і розташованих до неметалевих - паралельно, а у металевих - перпендикулярно поверхні тертя фрикційних елементів, що утворюють таким чином тимчасові Т-подібні енергетичні містки з різних типів контактів, що забезпечують генерування та акумулювання електротеплових струмів при електротермомеханічному фрикційному навантаженні робочих поверхонь пар тертя, знижуючи і підвищуючи на них різницю потенціалів з одночасним відведенням енергії у вище- і нижчележачі шари елементів тертя, а підтримання однакової товщини шарів металевих та неметалевих фрикційних елементів досягається за рахунок різного поточного і наступного зношування їх робочих поверхонь.

Кожному типу матеріалів як для неметалевого і металевих фрикційного елемента гальмівних пристроїв характерні свої умови експлуатації, енергонавантаженості і конструктивні особливості їх виконання. Однак до цього часу не створивши фрикційний матеріал для накладок, що має універсальні зносо-фрикційні властивості для застосовуваних видів гальмівних пристроїв.

За ГОСТ 1786 до фрикційних накладок, що є акумулятором зарядів, висувається ряд вимог:

- високий динамічний коефіцієнт тертя, мало що змінюється від поверхневої температури, питомих навантажень, швидкості буксування ($f=0,28-0,62$);

- висока зносостійкість і міцність (накладки повинні витримувати без розриву кутову швидкість, яка в 2 рази перевищує максимальну кутову швидкість металевих фрикційного елемента;

- плавне, пропорційне натискному зусиллю наростання сили тертя;
- достатня термостійкість і теплопровідність (температура накладок не повинна перевершувати при тривалій роботі 300 °С, при короткочасній 450 °С);
- екологічно безпечні.

5 У своєму складі фрикційні матеріали на основі термореактивних смол повинні містити компоненти, що виконують певні функції:

- підвищення зносостійкості - смоляні частинки і графіт;
- підвищення теплопровідності і плавності включення - мідь, латунь, бронза, алюміній (у вигляді порошку, стружки або дроту);
- 10 - підвищення стабільності динамічного коефіцієнта тертя - цинк;
- зменшення зносу і задирування - свинець.

До металевих фрикційних елементів, як і до накопичувача теплової енергії, висуваються ряд вимог:

- 15 - висока термостійкість і акумулююча здатність, що дозволяє використовувати їх у фрикційних вузлах гальм зі значно більшою енергонавантаженою, ніж це було можливо із застосуванням матеріалів попередників;
- високий і стабільний у самих різних режимах експлуатації динамічний коефіцієнт тертя; здатність до швидкого поглинання виділень при електротермомеханічному терті теплоти і розсіюванню її від матових поверхонь у навколишнє середовище;
- 20 - висока механічна міцність при статичних і динамічних навантаженнях у широкому діапазоні поверхневих і об'ємних температурних градієнтів;
- висока зносостійкість, що забезпечує значно більший ресурс пар тертя у порівнянні з усіма раніше застосовуваними матеріалами;
- мала питома вага, що дозволяє значно знизити момент інерції, обертового металевих фрикційних елементів, у порівнянні із застосовуваними.

25 Зі сформованих вимог, що висуваються окремо до неметалевих і металевих фрикційних елементів випливає, що вони є несумісними. Крім того, при будь-якій енергонавантаженості металевий фрикційний елемент може повернутися до свого початкового стану. У той час як поверхневий і підповерхневий шар полімерної накладки після потрапляння у зону допустимих температур для їх матеріалів ніколи не може повернутися до свого початкового стану через деструктивні процеси, які відбулися у них.

30 Важконавантажений фрикційний вузол стрічково-колодкового гальма з парою тертя "метал (1) - полімер (3)" показаний на Фіг. 1 а. На Фіг. 1 б, в проілюстровані робочі поверхні гальмівного шківів 4 і фрикційної накладки 7 з вкрапленнями в них напівпровідниковими елементами 5, 8 і 6, 9, виготовлені з бору (В) та оксиду алюмінію (Al_2O_3), які розташовані перпендикулярно і паралельно до поверхні тертя.

40 Кристалічний бор (В) влаштований з ікосаедра-двадцятигранниками, що складаються з 12 атомів бору, а-ромбічний бор складається з ікосаедра, що утворюють спотворену кубічну упаковку. Кожен ікосаедр з'єднується з шістьма сусідніми, утворюючи шари, об'єднані в нескінченну структуру (див. Фіг. 2).

45 Найбільш стійка модифікація - β -ромбічний бор - складається зі структурних одиниць, що складаються з ікосаедра в ікосаедр. Температура плавлення 2074 °С, температура кипіння +3658 °С, густина 2,31-2,35 г/см³. Має напівпровідникові властивості. У звичайних умовах бор проводить електричний струм погано. При нагріванні до 800 °С електрична провідність бору збільшується на кілька порядків, причому знак провідності змінюється (електронна (n-типу) - при низьких температурах, діркова (p-типу) - при високих). Кристалічний бор є хімічно інертний.

50 Чистий оксид алюмінію знаходиться в декількох кристалічних формах: α - Al_2O_3 (корунд), γ - Al_2O_3 , δ - Al_2O_3 , θ - Al_2O_3 , κ - Al_2O_3 . У природі зустрічається тільки α - модифікація оксиду алюмінію у вигляді мінералу, який називається корунд з ромбобедреними ґратами (див. Фіг. 3). Температура плавлення +2044 °С, температура кипіння 2980 °С, густина 3,99 г/см³. Оксид алюмінію є напівпровідником n-типу. З хімічних властивостей відзначимо, що оксид є амфотерним.

Таким чином, бор (В) має змінну електричну провідність, а оксид алюмінію - постійну електричну провідність.

55 До складу "Ретінакса" входить модифікована фенолформальдегідна смола (25 %), барит (35 %), азбест (40 %). Для запобігання обертанню, з контактуючої поверхні і налипанню на неї фрикційного матеріалу до складу "Ретінакса" введена протизадирна присадка. Характеристики матеріалу "Ретінакс" наведені в табл. 1.

Характеристики матеріалу сталь 35ХНЛ наведено в табл. 2.

В основу розробки матеріалу "Ретінакс" покладено принцип створення працездатності шару, який треться, з високим знософрикційними властивостями безпосередньо в процесі електротермомеханічного гальмування під спільним впливом високих поверхневих температур і питомих навантажень на поверхні тертя.

5

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики матеріалу "Ретінакс»

Характеристика	ФК-24А	Характеристика	ФК-24А
Границя міцності при стиску, МПа	127,4	Теплоємність, Дж/(кг·°С)	962,9
Твердість по Бринелю, МПа	323,5	Температуропровідність, м ² /с	3,8·10 ⁻⁷
Опір на зріз, МПа	47,0	Водопоглинання в %	<1
Густина, кг/м ³	1820,0	Жаростійкість (по Шраму) у класах	4
Теплопровідність, Вт/(м·°С)	0,66		

Таблиця 2

Фізико-механічні характеристики матеріалу сталь 35ХНЛ

Характеристика	35ХНЛ	Характеристика	35ХНЛ
Границя короточасної міцності, МПа	686,0	Теплоємність, Дж/(кг·°С)	479,0
Твердість по Бринеллю, МПа	245,0	Коефіцієнт лінійного розширення, 1/°С	12,2·10 ⁻⁶
Границя плинності, МПа	490,0	Питомий електроопір, Ом·м	273·10 ⁻⁹
Густина, кг/м ³	7840,0		
Теплопровідність, Вт/(м·°С)	44,0		

У поверхневому шарі створюється плівка з позитивним градієнтом механічних властивостей, тобто, тонкі шари контактуючих поверхонь, що утворюють при терті єдине "третє тіло" (за термінологією проф. Крагельського І.В.), володіють меншою міцністю на зсув, ніж шари, більш віддалені від зони контакту. Наявність позитивного градієнта механічних властивостей забезпечує здатність "третього тіла" до багаторазового передеформування без руйнування матеріалу і, отже, забезпечує незначне зношування робочих поверхонь фрикційних накладок.

10

У міру зношування контактуючого шару він постійно замінюється іншим, знову утворюється. Створення додатного градієнта механічних властивостей забезпечується тим, що фенолформальдегідна смола при низьких температурах, які розвиваються при терті, розкладається і вступає у взаємодію із баритом, навколишнім середовищем і поверхнею металевго елемента пари. Наявність бариту в поєднанні з азбестом надає матеріалу "Ретінакс" підвищену теплостійкість і високу зносостійкість. Від високої температури, що виникає на поверхні тертя, поверхневий шар металевго елемента фрикційної пари розм'якшується, що призводить до збільшення фактичної площі контакту, так як розм'якшений і розплавлений метал заповнює мікропорожнечі на поверхні фрикційного матеріалу і при цьому відбуваються також процеси відновлення оксидів і спікання і збільшення числа вогнищ термічного схоплювання на поверхнях тертя, що викликає прогресуюче наволочування металу на поверхню фрикційного матеріалу.

15

20

25

Щоб уникнути явища наволочування "Ретінакс" ФК-24А слід застосовувати тільки в таких конструкціях гальм, де температура тертя не перевищує температуру об'ємного розм'якшення металевго елемента фрикційної пари. Для ливарної сталі температура розм'якшення складає 800-900 °С.

30

На Фіг. 1 а, б, в наведені: а - пари тертя важконавантаженого фрикційного вузла стрічково-колодоккого гальма бурової лебідки; б - робоча поверхня фрикційної накладки з вкрапленими напівпровідниковими елементами; в - робоча поверхня гальмівного шківa з вкрапленими напівпровідниковими елементами; 1, 4 - гальмівний шків і його робоча поверхня; 2 - гальмівна стрічка; 3, 7 - фрикційна накладка і її робоча поверхня; 5, 6 - напівпровідникові елементи (бор та оксид алюмінію), розташовані перпендикулярно поверхні тертя; 8, 9 - напівпровідникові елементи (бор та оксид алюмінію), розташовані паралельно поверхні тертя; Фіг. 2 - структурна схема бору; Фіг. 3 - структурна схема оксиду алюмінію; на Фіг. 4 а, б, в, г показано порівняння енергетичних зон діелектрика (а) напівпровідника (б), напівметалу (в) і металу (г): ЗП - зона провідності; НД - валентна зона; ЕЩ - енергетична щілина; на Фіг. 5 а, б, в, г проілюстровано розподіл густини електронних рівнів в спектрах (заповнені рівні заштриховані): а - метал з

35

40

непарним числом електронів в елементарній комірці; б - діелектрик (напівпровідник) зі щільною ΔW між заповненою зоною (валентної) і пустою зоною (зоною провідності); в - метал з парним числом електронів в комірці і перекриттям порожньої і заповненої зон; г - напівметал; на Фіг. 6 а, б, в проілюстровані енергетичні рівні різних типів контактів при фрикційній взаємодії плям мікроставів металополімерних пар тертя: а - нейтрального; б - омічного; в - блокуючого; на Фіг. 7 показана енергетична діаграма пари тертя "метал-полімер"; на Фіг. 8 а, б показана якісна картина енергетичних зон в системі "метал-полімер" при імпульсних нормальних зусиллях, що діють на полімерну плівку: а- $N < N_C$; б- $N > N_C$; на Фіг. 9 проілюстрована зонна діаграма тришарової структури "напівпровідник-полімер-метал"; на Фіг. 10 а, б показаний потенційний бар'єр між металом (а) і напівпровідником (б) в парі тертя; на Фіг. 11 проілюстровано розподіл потенціалу навколо границі між металом напівпровідником в парі тертя: крива 2 - оборотна; криві нижче і вище кривої характеризуються нахилом в прямому напрямку; криві вище кривої 3 характеризуються нахилом у зворотному напрямку; на Фіг. 12 показано розподіл потенціалу, навколо р-п переходу в термоелементах мікротермобатарей в металополімерних парах тертя гальмівних пристроїв.

Для повної уяви про формування нових пар тертя "полімер-напівпровідник", "метал-напівпровідник" і "напівпровідник-напівпровідник" необхідно привести порівняльний аналіз енергетичних зон матеріалів пар тертя гальмівних пристроїв.

Структура енергетичних зон електронів у кристалічних полімерах і металах якісно різна. При зближенні атомів і утворенні кристала електронні рівні енергії атомів за рахунок їх взаємодії розщеплюються, утворюючи зони (Фіг. 4 а, б, в, г).

Особливо сильне розщеплення відбувається на електричних рівнях зовнішніх (валентних) електронів, оскільки вони сильніше взаємодіють один з одним, ніж електрони глибинних оболонок атома. Вид електронних спектрів кристалів залежить від особливостей атомних хвильових функцій частинок і від ступеня перекриття їх при зближенні атомів в процесі утворення кристала. Встановлено, що енергетичні рівні зон електронів та іонів в матеріалах елементів тертя металополімерної пари залежно від режимів гальмування повинні забезпечувати достатню енергоємність при регламентованій провідності (див. Фіг. 4 а, б, в, г).

Порівняння енергетичних спектрів металів, напівметалів, напівпровідникових діелектриків показало наступне (Фіг. 5 а, б, в, г). У металах розходження в енергії між валентною зоною і зоною провідності несуттєве, внаслідок чого електрони легко міняють енергію, переходячи з рівня на рівень. Електрони в металах практично вільні, вони не локалізовані і належать всьому кристалу, не утворюючи просторово-спрямованих зв'язків між іонами. У всіх інших кристалах більшість електронів тією чи іншою мірою локалізовано. У напівметалах енергія збудження практично дорівнює нулю, так що навіть при температурі $T=0$ повинні існувати рухливі електрони, що забезпечують нескінченно велику провідність. Тим не менш, вже в напівметалах більша частина електронів локалізована між атомами і утворює в кристалі просторово спрямовані зв'язки.

У напівпровідниках (головним чином, ковалентних кристалах) валентні електрони утворюють чітко спрямовані орбіталі, що зв'язують атоми, а енергія збудження (ΔW) перевищує теплову енергію ($\Delta W > kT$).

Сформовані у поверхневих і приповерхневих шарах елементів тертя термоелементи, що включають в себе напівпровідники з р-п переходом та об'єднані в мікротермобатарей, мають випрямляючі властивості. Прямий напрямок потенційного бар'єру поверхневого шару металевого елемента тертя пов'язане з градієнтом напруження за умови, що зовнішнє напруження переміщує електрони вліво, а протилежний напрямок виконує функції замикаючої зони. Однак для реалізації випрямляючих властивостей не обов'язково, щоб р-п провідники були розділені сполучними компонентами термоелементів. У практиці прийнято вводити в напівпровідниковий (термоелемент) донори і акцептори, утворюючи, таким чином, р-п перехід десь всередині термоелемента, який є вже окремою мікротермобатарейою. Так, наприклад, германієвий плівковий шар може бути забезпечений індієвим електродом з одного боку і сурм'яним шаром з іншого, потім нагрітий так, щоб атоми електродів дифундували всередину германієвої решітки. У результаті цього атоми індію стають акцепторами, а атоми сурми - донорами. Така рекомбінація електронів і дірок в плівкових мікротермобатарей дозволяє змінювати градієнт напруження як у внутрішньому, так і зовнішньому ланцюзі за рахунок дифузійних струмів, які впливають на роботу виходу електронів з металевого елемента тертя. Ця обставина впливає на необхідність нового підходу до вибору матеріалів пари тертя, виходячи з енергетичного рівня їх поверхневих і приповерхневих шарів.

Електронний енергетичний спектр кристалів, тобто розподіл електронів по енергіях дозволених зон, прийнято описувати в просторі квазіімпульсів (у зворотній кристалічній решітці). Закон дисперсії $W(p)$ являє собою просту параболічну функцію:

$$W = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = p^2 / 2m; \quad (1)$$

де m - маса електрона.

5 Облік періодичного потенціалу кристалічної решітки (метод Блоха) ускладнює цю залежність, приводячи до розривів в параболічній залежності $W(p)$ в області енергетичної щільності (забороненої зони) (див. Фіг. 4 а, б, в, г). Функція $W(p)$ неперервна в різних інтервалах простору імпульсів, званих зонами Бріллюена (наприклад, область $-\pi/a \leq k \leq \pi/a$ та ін.). При переході від однієї зони Брілюена до іншої ця функція зазнає розриви.

10 На Фіг. 5 а, б, в, г класифікація кристалів по енергетичному спектру їх електронів показана у дещо іншому вигляді (див. Фіг. 4 а, б, в, г). Зони електронного спектра дозволяють побудувати моделі різних варіантів електронних спектрів кристалів для трьох основних випадків:

- зони електричного спектра електронів не перекриваються (див. Фіг. 5 а, б);

- зони енергетичного спектра електронів перекриваються (див. Фіг. 5 в, г);

15 - зони енергетичного спектра електронів стикаються без перекриття.

У першому випадку електрони займають рівні з найменшою енергією. В основному стані ($T=0$) границя цього заповнення, що відокремлює в просторі імпульсів заповнену область від незаповненої частини зони, називається поверхнею Фермі F . При $T>0$ границя цієї поверхні розмивається, так як за рахунок теплових збуджень (фонів) частина електронів йде вище F , в просторі нижче F частина рівнів звільняється. Оскільки відстань між рівнями в зоні надзвичайно мала, то вже як завгодно мале зовнішнє електричне поле ($\sim 10^{22}$ еВ) підвищує енергію електронів і призводить до електропровідності металів, обмеженої тільки розсіюванням електронів на обмеженнях решітки. При зниженні температури провідність металів зростає: при $T \rightarrow 0, \sigma \rightarrow \infty$.

25 Поверхня Фермі в кристалах з енергетичною щільною в електронному спектрі відсутня, але середина цієї щільності (при відсутності домішок і локальних рівнів) називається рівнем Фермі F_0 (див. Фіг. 5 б). Для порушення електропровідності в цих кристалах необхідно, щоб за рахунок теплових коливань або інших енергетичних факторів частково звільнилася валентна зона (дірковий механізм електропровідності) або частково заселилася електронами зона провідності (електронний механізм електропровідності).

У другому випадку поверхня Фермі напівметалів має розриви, а їх провідність на кілька порядків за величиною нижче, ніж у металів.

35 У третьому випадку кристали цього рідкісного класу називаються безщільними напівпровідниками. Поверхня Фермі таких напівпровідників являє собою лінію або точку в просторі імпульсів. У безщільних напівпровідниках електрони порівняно легко (порівняно зі звичайними напівпровідниками) переходять в зону провідності, що призводить до істотних відмінностей у динамічних властивостях носіїв заряду в цих речовинах.

40 Особливий стан металевого елемента тертя спостерігається при температурах вище допустимої для матеріалів полімерної накладки. Оцінка з точки зору енергетичних витрат до такого металевого елемента тертя повинна відбуватися за іншими параметрами.

45 Розглянемо енергетичні рівні різних типів контактів мікрровиступів металополімерних пар тертя. У полімерних накладках, складених з неоднорідних матеріалів, існують аморфні і кристалічні фази, виникає захоплення іншого роду - на міжфазних границях. Накопичення зарядів на кордонах обумовлено різницею у проведених розглянутих фаз (ефект Максвелла - Вагнера). При електризації такого матеріалу носії будуть збиратися поблизу даної міжфазної границі або навпаки, йти з неї в залежності від того, який з двох струмів провідності більше: притікаючий до границі зарядів або відхідний від неї. Відмінності в локальних струмах провідності призводять також до дисипації зарядів при подальшому проведенні термостимульованого розряду, так як в цьому випадку струми течуть уже в протилежному напрямку.

Для процесів нейтралізації зарядів важливу роль відіграють також властивості робочої поверхні металевого фрикційного елемента. Взаємозв'язок між енергетичними рівнями визначається за допомогою фрикційної контактної взаємодії мікрровиступів пар тертя.

55 У табл. 3 проілюстрований детальний підхід до енергетичних рівнів плям контактів мікрровиступів елементів пар тертя при електротермомеханічній фрикційній взаємодії.

На Фіг. 6 а, б, в умовно показано різницю між нейтральним, омичним і блокуючим контактами.

Розглянемо випадки виникнення нейтральних контактів на мікроставуках металополімерних пар тертя згідно з Фіг. 6 а.

Перший випадок належить до поверхневих температур полімерної накладки, які мають їх величини нижче допустимої для її матеріалів.

5

Таблиця 3

Енергетичні рівні плям контактів мікроставуків елементів пар тертя при електротермомеханічному терті фрикційної взаємодії



Згідно з Фіг. 6 а робота виходу електронів та іонів з металевого та неметалевого фрикційного елементів рівні між собою. Велику прибавку до роботи виходу іонів з поверхневого шару накладки дає спорідненість до електрона. Останнє є здатністю деяких атомів і молекул приєднувати додатковий електрон і перетворюватися на позитивні іони. Мірою спорідненості до електрона служить енергія, яка виділяється при цьому. Ціленапрявлена переорієнтація електронів в іони і дозволяє тим самим за рахунок даного ефекту досягти рівності робіт виходу частинок.

10

Другий випадок. При досягненні робочою поверхнею полімерної накладки температури вище допустимої для її матеріалів відбувається вигорання у поверхневих і підповерхневих шарах сполучних компонентів, що веде до утворення рідинних острівців на поверхні накладки. При контакті робочої поверхні металевого фрикційного елемента з рідиною спостерігається явища переходу іонів з металу в рідину (див. Фіг. 6 а, крива 1). Метал входить в розчин у вигляді або позитивних іонів, або комплексних негативних іонів, якщо він взаємодіє з розчином рідини. При цьому поверхня металу набуває деякий специфічний потенціал, що встановлює рівновагу

15

20

між процесом виділення і осадження іонів. Цей потенціал залежить як від природи металу, так і від концентрації іонів в рідині. При деякому значенні кислотності (pH) метал не посилає в розчин іони, а навпаки, приймає їх з розчину, набуваючи заряди до настання електричної рівноваги.

5 Як відомо, метали розташовуються в електрохімічний ряд відносно до позитивного іону водню H⁺. При зануренні в рідину двох різних металів, кожен з них має певний потенціал відносно до рідини. При контакті металів виникає електричний струм доти, поки в розчині не будуть вичерпані всі іони металів або розчину. Електричні струми можуть протікати і між різними точками однієї металевої поверхні, якщо вона заряджена і неоднорідна.

10 Крім хімічного механізму електричних явищ в контакті металу і рідини можливий і інший механізм - електризація поверхонь металу і рідини при русі останньої, тому шар рідини, переміщуючись, забирає із собою іонний заряд. Розрахунки показують, що значне накопичення зарядів при русі рідини відбувається при питомому її опорі вище 10⁹ Ом•см. Вважається, що при цьому на поверхні металу, при стикуванні з рідиною, утворюється подвійний електричний шар. Поверхня металу у результаті втрат або захоплення іонів набуває незначний хімічний
15 потенціал, і по ній розподіляється деякий заряд. Протилежний по знаку заряд знаходиться в рідині. Розподіл зарядів у рідині може характеризуватися потенціалом φ_e , який змінюється з відстанню від поверхні відповідно до електростатичних сил і розподілу Больцмана (Фіг. 6 а). Аналітичне вираження для розрахунку величини потенціалу φ_e отримуємо рішенням рівняння Пуассона в припущенні про існування екрануючого подвійного шару:

$$\varphi_e = \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon k} \exp k(d-x). \quad (2)$$

20 Таким чином, в умовах електротермомеханічного тертя металополімерних пар тертя енергонавантажених робочої поверхні полімерної накладки відіграє вирішальну роль у формуванні нейтрального контакту в зоні фрикційної взаємодії.

Найбільш часто в металополімерних парах тертя [стосовно до двошарових ("метал-полімер")] структурам гальмівних пристроїв зустрічається омичний (інжектуючий) контакт (Фіг. 6
25 в).

На Фіг. 7 наведена зонна діаграма контакту "метал - електропровідний полімер". Особливістю цієї діаграми є наявність вузької електропровідної зони всередині щільності полімеру. Згідно з однією з гіпотез, саме подібна вузька зона може відповідати за транспортні властивості тонких діелектричних плівок. Зміни положення рівня Фермі металу в області його
30 фазового переходу відносно вузької зони в полімері забезпечує умови інжекції з металу в полімер і тим самим характеризує зміну провідності системи в цілому.

На Фіг. 8 а, б зображена модель енергетичних зон в системі "метал-полімер" стимульованої імпульсними нормальними зусиллями інжекції носіїв струму з металу в зону провідності полімеру. Відповідно до цієї моделі стиск полімеру викликає розпад поверхневих станів, відіграючи роль акцепторів електронів. Не виключено також, що через збільшення поляризованості поверхонь фрикційної взаємодії одночасно відбувається пониження дна зони провідності полімеру. В результаті при деякому значенні $N=N_c$ структура енергетичних зон поблизу границі розділення "метал-полімер" виявляється сприятливим для інжекції носіїв, хоча
35 при $N < N_c$ цей процес або взагалі не реалізується, або має вкрай низьку ефективність.

40 На Фіг. 9 наведена спрощена зонна діаграма тришарової структури "напівпровідник-полімер-метал". Суцільною жирною лінією в шарі полімеру показана форма потенційного бар'єру для заряду, коли d більше глибини проникнення поверхневого заряду, пунктирна крива відповідає випадку, коли d менше глибини проникнення поверхневого заряду, штрихуванням позначені електронні стани. Вибраний варіант контакту, у якому обидва метали однакові, роботи виходу електрона з металу і полімеру також однакові. Це так званий випадок прямих зон, і при використанні полімеру в такій структурі найчастіше можна отримати омичний контакт. При цьому
45 не будемо зупинятися на деталях механізму встановлення електричного контакту. Констатуємо лише факт, що наявність між двома металевими електродами діелектрика з великою шириною забороненої зони може перешкоджати протіканню заряду між електродами у випадку, коли товщина діелектричного прошарку велика. При цьому шар діелектрика відіграє роль
50 потенційного бар'єру прямокутної форми, висота якого визначається різницею між роботою виходу металу і енергією електронної спорідненості полімеру.

При зменшенні товщини полімерної плівки може виникнути ситуація, коли заряди, зосереджені поблизу протилежних границь розглянутого контакту, почнуть взаємодіяти між собою, приводячи до спотворення форми потенційного бар'єру. Найбільшою товщиною плівки, при якій починається взаємодія граничних зарядів, може вважатися здвоєна величина такого параметра контакту, як глибина проникнення поверхневого заряду. Взаємодія приповерхневих
55

зарядів може призвести до того, що всередині бар'єру почне формуватися локальний мінімум, який в принципі може призвести до перетину кривою, яка описує огинаючу потенційного бар'єру з рівнем Фермі. При такому гіпотетичному варіанті в середині бар'єру на рівні Фермі можуть виникнути нові електронні стани, які збільшують його проникність для електронів. Якщо

5

навчитися керувати такими станами, то фактично це означатиме створення принципово нового електронного гібридного наноструктурованого металополімерного матеріалу.

При цьому вагомої важливості набуває питання управління системою "напівпровідник - полімер - метал" шляхом перемикачів в полімерній плівці ефекту індуктування зарядів, при яких області зміни електропровідності в ній просторово розділені. Для досліджень були обрані

10

перемикачів в системі за рахунок зміни граничних умов у тришаровій структурі "напівпровідник-полімер-метал", що призвело до плавлення одного з електродів. В результаті чого відбувається перерозподіл поверхневого заряду в приконтатній області полімеру внаслідок різкої зміни ефективної роботи виходу електронів металу поблизу критичної температури. Таким чином, перехід полімеру у високопровідний стан викликаний зміною положення рівня Фермі металу

15

(ефективної роботи виходу електронів) в точці фазового переходу. Аналогічного результату можна досягти, якщо між металом, що зазнає фазовий перехід і полімерною плівкою помістити інший метал, стабільний в заданому інтервалі температур, в такій ситуації все структурно-механічні зміни (зміна агрегатного стану, стрикційні явища та ін.) у першому металі можуть бути приглушені за допомогою другого металу, тобто шляхом технологічного рішення. Необхідно

20

відзначити ще одну важливу особливість омичного (інжектуючого) контакту на мікрровиступах металевго елемента, поведінка якого нагадує нагрітий катод, вже за відсутності поля на поверхні, можна спонтанно інжектувати носії всередину поверхневого шару полімерної накладки. Виникаюча перед електродом хмара просторового заряду зрештою повністю замикає емісію з електрода, якщо, звичайно, хмара не розсмоктується дією прикладеного поля. Граничні

25

умови на інжектуючому електроді зводяться до $E(0,t)=0$ і щільності зарядів $\rho_3(0) = \pm\infty$, причому полярність визначається знаком інжектіваних носіїв.

Поведінка мікрровиступів полімерної накладки якнайбільше залежить від матеріалу мікрровиступів металевго фрикційного елемента. Зазвичай плями контактів останніх мікрровиступів покриті плівками, при слабких і проміжних напруженостях поля є блокуючими

30

контактами (Фіг. 6 а). Такий контакт перешкоджає передачі носіїв заряду від електрода всередину поверхневого і підповерхневого шару полімерної накладки в той же час сам він може приймати носії з вищеперерахованих шарів.

У діелектрику з блокуючими контактами, який взагалі не містить носіїв заряду, протікання стаціонарного струму, очевидно, неможливо. Якщо ж в діелектрику є носії обох знаків, причому з сильно відмінними значеннями їх рухомостей, то поблизу плям контактів мікрровиступів металевго фрикційного елемента, знак якого збігається зі знаком більш рухливих носіїв, утворюється бар'єр Шотткі. Виникаюча в цих умовах поляризація плям контактів мікрровиступів накладки обумовлена якраз наявністю електродів. Ця ситуація досить легко пояснюється в тому граничному випадку, коли відсутня рухливість у носіїв якоїсь однієї полярності (наприклад, електронів) і не відбувається подальшої генерації вільних носіїв. Докладене поле в цьому

40

випадку видаляє позитивні носії від плям контактів мікрровиступів накладки (анодів, розташованих, скажімо при $x=0$).

Так як цей електрод не в змозі передавати матеріалам додатні заряди, поблизу нього в шарі товщиною δ_s між площинами $x=0$ і $x = \delta_s$ утворюється хмара негативного просторового заряду з густиною ρ . Після того як шар просторового заряду буде повністю сформований, напруга u , яка початково подається по всій товщині металевго мікрровиступу, тепер стане прикладеною до шару товщиною δ_s . У результаті струм перетвориться в нуль.

45

Протяжність шару визначається формулою $\delta_s = \sqrt{2\epsilon u / \rho_3}$ і не залежить від прикладеного електричного поля.

Наприклад, при щільності нерухомих (захоплених) носіїв $\rho_3 = 1 \cdot 10^{-4}$ Кл/см³, $\epsilon = 2 \cdot 10^{-13}$ Ф/см і $u = 1,0$ В. Товщина шару δ_s становить $1,25 \cdot 10^{-3}$ см. Отже, використання блокуючих контактів перешкоджає повному видаленню рухомих носіїв з діелектрика, причому незалежно від значення їх рухомості.

50

Наявність непровідного прошарку кінцевої товщини між діелектриком і електродом може викликати утворення бар'єрної поляризації. Правда, молекулярні розміри утвореного подвійного шару позитивних і негативних носіїв не дозволяють виявити його у звичайних зовнішніх вимірюваннях, наприклад компенсаційних зарядів на електроді. Крім того, утворення подвійного електричного шару не приводить до блокуючого ефекту.

55

Наявність непровідного прошарку кінцевої товщини між діелектриком і електродом може викликати утворення бар'єрної поляризації. Правда, молекулярні розміри утвореного подвійного шару позитивних і негативних носіїв не дозволяють виявити його у звичайних зовнішніх вимірюваннях, наприклад компенсаційних зарядів на електроді. Крім того, утворення подвійного електричного шару не приводить до блокуючого ефекту.

Таким чином, якщо контакти заблоковані, нейтралізація повинна протікати всередині металевого елемента тертя незалежно від типу контакту (є він інжектуємим електроні або блокуючим). Це залежить лише від того, яка з робіт виходу електронів або іонів більше: металевого або полімерного фрикційного елемента. Якщо робота виходу з першого елемента

5

більше, ніж з другого утворюється блокуючий бар'єр. Наявність останнього дозволяє вивчати методом термостимульованого розряду напівізолятори і напівпровідники, яким властиві великі струми провідності. Блокуючі контакти діють протилежним чином: вони перешкоджають як інжекції, так і нейтралізації зарядів.

Зупинимось на потенційних бар'єрах і умовах рівноваги при контактній-термічній взаємодії

10

термоелементів мікротермобатарей в металополімерних парах тертя гальм. Створювані напівпровідники на поверхнях фрикційних накладок, так само як і робоча поверхня металевого фрикційного елемента (обід барабана або шківа), мають потенційні бар'єри у поверхні, який запобігає витоку електронів (дірок). У n-провіднику цей бар'єр виникає між негативним зарядом у поверхні і позитивним зарядом усередині, формуючи таким чином елементи

15

мікротермобатарей.

У чисто металевому контакті, тобто в парі "метал-метал" (другий шар металу отриманий на

20

поверхні фрикційної накладки завдяки процесу масопереносу) електроні, що йдуть від одного елемента (наприклад, обода барабана) і які перетинають площину контакту, відразу ж переходять у стан рівноваги з електронами другого елемента. При цьому ніяких дзеркальних сил і потенційних бар'єрів, які перешкождали б обміну електронами, не виникає. У даному випадку рівновага між електронами досягається тим, що рівні Фермі з однаковими енергетичними рівнями металів збігаються. У той же час неважливо, чи будуть нижні рівні шарів плівок відрізнятися по висоті, оскільки електроні не можуть обмінюватися на рівнях, де один з електронів потрапляє в заборонену зону плівкового напівпровідника.

25

Якщо роботи виходу (негативні) двох шарів металевих плівок різні ($W_1 > W_2$), то виникає різниця потенціалів Вольта, яку експериментальним шляхом визначити важко, оскільки маємо справу з чужорідними поверхневими шарами. Насправді вимірjana різниця носить назву різниці контактних потенціалів.

30

Особливістю взаємодії на електронному рівні між металом і напівпровідником є те, що напівпровідникові елементи, які виступають як мікротермобатарей, не цілком нейтралізують потрапляючий в їх ланцюг електрон і, отже, не знищують повністю дзеркальні сили, оскільки складові мікротермобатарей є діелектриком, який знижує роботу виходу для електронної емісії від металевого фрикційного елемента.

35

Умови рівноваги вимагають рівного розподілу електронів по рівнях вище потенційного бар'єру по обидва боки контакту, що обумовлює рівні дифузійні струми в обох напрямках в термоелементах мікротермобатарей. Для металів розподіл за цими рівнями є максвеловським розподілом електронів $\nu(T)$ на 1 см^3 , нижня поверхня якого знаходиться на рівні Фермі. Розподіл електронів у шарі провідності мікротермобатарей зазвичай є строго максвеловським, але нижня границя цього шару плівки лежить вище, ніж рівень Фермі металу, оскільки плівка провідності термоелемента мікротермобатарей містить менш ніж $\nu(T)$ електронів в 1 см^3 .

40

Виникає природно питання про те, коли рівні Фермі в плівці металу і в плівці провідника термоелементів мікротермобатарей співпадуть. Це станеться тоді коли рівень Фермі в шарі плівки провідника буде знаходитися десь між донорним рівнем і нижньою межею її шару.

45

При цьому взаємодії рівноважного стану відповідає граничний бар'єр і тому дифузійний струм від металу, тобто поверхні металевого фрикційного елемента, обмежений висотою бар'єра W_1 . Для того щоб підтримати рівний дифузійний струм з боку напівпровідникового термоелемента, необхідно щоб його провідний шар мав такий нахил граничного бар'єра, щоб він збігався з рівнем металу і щоб на нього не впливала висота бар'єра (W). Ця обставина дає підставу називати зазначену висоту роботою виходу електронів з контакту.

50

Як згадувалося вище, в термоелементі мікротермобатарей нахил бар'єру відносно малий, а це впливає на виникаючий бар'єр між позитивними і негативними зарядами. Позитивні заряди, які в металі знаходяться у вигляді позитивних іонів, розташованих у вузлах його правильної решітки високої густини. У той же час у n-електронів, що рухаються зсередини напівпровідникового шару плівки, які є термоелементами мікротермобатарей до його поверхні, складаються з негативних іонізованих донорів, оскільки напівпровідникова ґратка шару не здатна утримувати заряди. Через нестачу іонізованих донорів позитивні заряди будуть розподілені у відносно тонкому шарі термоелемента мікротермобатарей.

55

Відповідно до теорії Шоттки, зробимо визначення нахилу кривої потенційного бар'єру, за умови, що всі донори в його області іонізовані. Ця обставина впливає з таких міркувань. Бар'єр являє собою поле, яке приводить в рух електроні, що з'являються в цій галузі, і направляє їх у

60

термоелемент мікротермобатарей. При цьому надходження нових електронів з металу через верхню границю потенційного бар'єра обмежена. Отже, для іонів донора існує мала ймовірність рекомбінації з електронами.

На Фіг. 10 а показаний потенційний бар'єр між металом і термоелементом мікротермобатарей в умовах рівноваги, тобто без докладання напруження. З боку металу бар'єр дуже крутий, оскільки у його утворенні бере участь достатня кількість іонів решітки. На Фіг. 10 а дана сторона бар'єру показана вертикальною лінією. У термоелементі мікротермобатарей нахил невеликий.

Фіг. 10 б відповідає випадку n-провідності термоелемента мікротермобатарей з урахуванням таких міркувань:

- висота (AB, рівна W) бар'єру над рівнем Фермі дорівнює 1,0 eВ;
- донорний рівень і верхня межа D заповненого шару плівки лежать, відповідно, при 0,2 і 1,2 В нижче нижньої границі шару плівки провідності;

- щільність донорів на $1,0 \text{ см}^3$ становить $n = 10 \cdot 10^{16}$;

- усі донори іонізовані в області бар'єра;

- відносна діелектрична постійна шару плівки термоелемента $\epsilon_r = 10,0$. Обчислення базується на диференціальному відношенні Пуассона між дивергенцією потенціалу і щільністю просторового заряду, який має вигляд

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{10^6 n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{\epsilon_r \epsilon_0}, \quad (3)$$

де ρ - електроопір шару плівки, Ом·см; ϵ_0 - діелектрична постійна вакууму в контакті і дорівнює $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Якщо висоту бар'єра над нижньою границею шару плівки провідності усередині металу позначити через φ , а товщину бар'єра - через y (см), то замінюючи x (м) на y (см), шляхом інтегрування рівняння (3) отримаємо

$$\varphi = 9,05 \cdot 10^{-7} (n / \epsilon_r) y^2, \text{ В}, \quad (4)$$

отже, для всього бар'єра, тобто при $y = y_0$,

$$W = 9,05 \cdot 10^{-7} (n / \epsilon_r) y^2, \text{ В}. \quad (5)$$

На Фіг. 10 б проілюстрований випадок, коли електрони, щоб перейти в напівпровідниковий термоелемент з рівня Фермі, повинні подолати бар'єр в 1,0 В, а електрони нижньої поверхні шару плівки (термоелемента) мікротермобатарей, щоб увійти в обід металевого фрикційного елемента, повинні подолати 0,2 В (умовний відрізок СВ). Це можливо тільки тоді, коли вони наблизяться до рівня Фермі металу, оскільки тільки тут існують вільні рівні. Тут 1,0 В становить частину роботи виходу для електронів, що йдуть з металу до шару плівки напівпровідника, а 0,2 В є роботою виходу для електронів, що рухаються в протилежному напрямку із заповненого шару плівки (термоелемента) мікротермобатарей. Слід зазначити, що сума цих робіт виходу еквівалентна відстані між верхньою границею заповненого шару плівки та нижньої границі його провідності в термоелементі. Різні величини робіт виходу електронів 1,0 і 0,2 В, відповідно, нічого спільного не мають. Швидше вони відповідають геометричній інтерпретації для спеціальних умов, - для чистого n-провідника, який є термоелементом мікротермобатарей, з його рівнем Фермі, досить близько розташованими до нижньої границі провідного шару плівки. У практиці часто зустрічаються випадки з рівнями Фермі, які лежать нижче (див. Фіг. 10 а, б), із іншими співвідношенням робіт виходу електронів. Які відбуваються зміни, коли додається напруга, що викликає проходження струму через контакт металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв буде розглянуто нижче. Приділимо увагу контакту між робочою поверхнею металевого елемента тертя і плівкою напівпровідника, сформованої на поверхні фрикційної накладки. Розглянемо випадок, коли плівка металевого обода фрикційного елемента і плівка напівпровідника, сформована на поверхні фрикційної накладки, є n-провідниками. Явища вельми схожі відбуваються і тоді, коли є p-провідність. На Фіг. 11 представлена суцільна крива, яка описує розподіл потенціалу в граничній області, коли через неї не проходить струм (рівноважний стан).

У рівноважному стані рівні Фермі в металі і напівпровіднику збігаються. Припустимо тепер, що докладена негативна напруга $U = -0,3\text{В}$, яка зміщує в негативному напрямку рівень Фермі напівпровідника на $-0,3\text{В}$ щодо рівня Фермі металу. Основу провідної області піднесено так, як показано кривою 1 на Фіг. 11. Це означає, що характер нахилу кривої 1 змінився таким чином, що напруженість поля в граничній області напівпровідника стала слабшою, або, іншими

словами, створюється менше число іонізованих донорів. Так як щільність донорних іонів залишається приблизно постійною згідно з залежністю виду

$$n = v(T)e^{-5800\Delta_i E/T}, \quad (6)$$

де $v(T) = 5 \cdot 10^{15} T^{1,5}$ - загальне число електронів в 1 см^3 шару плівки напівпровідника; T - усереднена температура шару плівки напівпровідника; $\Delta_i E$ - різниця потенціалів при власній провідності, що створюються поверхнями шару плівки напівпровідника. У даному випадку число n електронів, що знаходяться в будь-який момент часу в шарі плівки напівпровідника, є результатом рівноваги між електронами, що потрапляють у плівку і відходять з неї. Так, наприклад, при температурі спалаху на контактні металополімерних пар тертя стрічково-колодкового гальма $T = 1500^\circ\text{K}$ загальне число електронів в $1,0 \text{ см}^3$ становить $2,9 \cdot 10^{20}$. При цьому зменшення кількості донорних іонів пов'язано зі зменшенням товщини бар'єрного шару. Використовуючи рівняння (6), знайдемо, що його ширина зменшилася від $3,15 \cdot 10^{-5}$ до $2,57 \cdot 10^{-5}$ см. З іншого боку, якщо прикласти $V = +0,3 \text{ В}$, то це зменшить товщину шару провідної плівки і розширить бар'єр до значення $y_0 = 3,64 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 3,64 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ (крива 3 на Фіг. 11). Зміна ширини потенційного бар'єра впливає на процес випрямлення струму. Відомо, що нахил нахилу в термоелементі з напівпровідника з n-провідністю таке, що електрони рухаються з граничної області в напівпровідник. Наслідком цього, а також недостатнього надходження електронів з металу проти їх роботи виходу, є збіднення носіїв струму в області потенційного бар'єра і вона стає погано провідною, тому Шотткі назвав таку область збідненим шаром. Останній стає ширше і опір такого шару зростає, і при цьому прикладена напруга (тут $+0,3 \text{ В}$) змушує носії струму рухатися з металу в n-напівпровідник. При напрузі протилежного знака збіднений шар стає тоншим і опір його зменшується, тобто, струм через нього проходить значно легше. Шотткі використовував наступне мнемонічне правило. Останнє свідчить, що якщо потік електронів направлений від металу, то вони нібито висмоктуються з граничної області прикладеною напругою, що призводить до її розширення. Протилежний струм стискає цей шар, зменшуючи його опір. Протилежний струм називається струмом інверсії і направлений від напівпровідника до металу. Таким чином, прикладена напруга, викликає струми в тому чи іншому напрямку, змінює нахил потенційного бар'єру в напівпровіднику, але зазвичай не змінює його напрямки нахилу. Носіями струму, на шляху яких виникає цей опір, є електрони чистого «-провідника. У практичних умовах, тобто при роботі металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв, існують також неосновні носії - в даному випадку дірки. Справа в тому, що вони не видаляються з області граничного бар'єру під дією градієнта потенціалу як основні носії, а сприяють переносу великої частини струму всередині збіднених шарів плівки. Як відомо, в робочих умовах термоелемент мікротермобатарей має інше відведення, де також відбувається деяке випрямлення. У цьому випадку випрямляючу властивість всієї мікротермобатарей можна реалізувати, якщо дія одного термоелемента сильніше, ніж дія іншого. Зазначена різниця виникає з наступних причин:

- один термоелемент має велику роботу виходу електронів, ніж інший;
- щільність донорів (або акцепторів) на обох кінцях термоелемента різна;
- контактні поверхні термоелементів мікротермобатарей мають різні розміри;

Таким чином, замикаючий або зворотний нахил випрямляючої напруги завжди збігається з напрямком руху основних носіїв струму від металевого до напівпровідникового термоелемента.

Розглянемо переходи типу p-n в мікротермобатареях металополімерних пар тертя в гальмівних пристроях. Уявімо собі напівпровідник p-провідності (термоелемент) на металевому фрикційному елементі в контакт з напівпровідником n-провідності (термоелемент), сформованого на поверхні полімерної фрикційної накладки. Поверхневі бар'єри термоелементів можуть збігатися так, як показано на Фіг. 12 (крива 1) для симетричного випадку. При такому положенні на контактній поверхні у точці С заряди не з'являються. Насправді в них немає потреби, тому що між негативними акцепторними іонами в збідненому шарі p-провідника і позитивними донорними іонами n-провідника виникають градієнти потенціалу. Останні не мають знака, а доповнюють один одного, утворюючи загальний градієнт, здатний переміщати електрони вправо в n-провіднику і дірки вліво в p-провіднику через його акцепторні властивості, внаслідок чого утворюється широкий збіднений шар АВ (див. Фіг. 12). Якби носії струму не віддалялися внаслідок наявності градієнта, то існував би усталено дифузійний потік дірок зліва і електронів праворуч, внаслідок чого носії не рекомбінованого б поблизу контакту і зникли. При відсутності зовнішнього поля у p-n переході виникає помітний градієнт потенціалу. У рівноважному стані загальна висота потенційного бар'єру саме достатня для того, щоб не дати

можливість протікати запірному струму по ланцюгу мікротермобатареї, тобто струм, циркулюючий в ланцюзі, дорівнює протилежному дифузійному струму. Накладання зовнішньої напруги не змінить знак градієнта, але змінить його величину як вже зазначалося вище. При цьому напруга відповідного знака зближить між собою основні рівні в n- і p-провідниках. У цьому випадку рівновага більше не підтримується і починає протікати дифузійний струм кінцевої величини. Одночасно збіднений шар стає вже, точно так само як це було в контакті пари "метал-напівпровідник". В окремому випадку асиметрії, яка представлена на Фіг. 12 точка С вважається нерухомою. Насправді різниця в рухомості позитивних і негативних носіїв струму призведе до відхилення від асиметрії. Так, зсув точок C_1 і C_2 вгору від точки С вказує на те, що більшість мікротермабатарей буде працювати в режимі мікротермоелектрогенераторів, а зсув точок C_3 і C_4 вгору від точки С - що більшість мікротермабатарей працює в режимі мікротермоелектрохолодильників. У першому випадку металополімерний контакт пар тертя гальмівних пристроїв буде нагріватися, а в другому - охолоджуватися. Розглянемо практичне застосування елементів теорії контактно-термічного взаємодії в металополімерних парах тертя гальмівних пристроїв. Сформовані на поверхнях металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв термоелементи, що включають в себе напівпровідники з p-n переходом, і об'єднані в мікротермобатареї, які мають випрямляючі властивості. Прямий напрямок потенційного бар'єра пов'язано з напругою градієнта за умови, що зовнішня напруга переміщує електрони вліво, а протилежний напрямок виконує функції замикаючого. Однак для виправлення необов'язково, щоб n-p провідники були розділені, сполучними компонентами термоелементів. У практиці прийнято вводити в напівпровідник (термоелемент) донори і акцептори, утворюючи таким чином p-n перехід десь всередині термоелемента, який є вже окремою мікротермобатареею. Так, наприклад, германієвий плівковий шар може бути забезпечений індієвим електродом з одного його боку і сурм'яним шаром з іншого боку, потім нагрітий так, щоб атоми електродів дифундували всередину германієвої решітки, в результаті чого атоми індію стають акцепторами, а атоми сурми - донорами. Така рекомбінація електронів і дірок в плівкових мікротермобатареях дозволяє змінювати градієнт напруги як у внутрішньому, так і у зовнішньому ланцюзі за рахунок дифузійних струмів, які впливають на роботу виходу електронів з металевого фрикційного елемента. Ця обставина нашоє на новий підхід до вибору матеріалів пари тертя, виходячи з енергетичного рівня їх складових елементів.

Таким чином, введення вкраплень з напівпровідникових елементів у робочі поверхні пар тертя важконавантажених фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма дозволить поліпшити ефективність гальмувань і збільшити ресурс фрикційних накладок за рахунок формування нових пар тертя.

Джерела інформації:

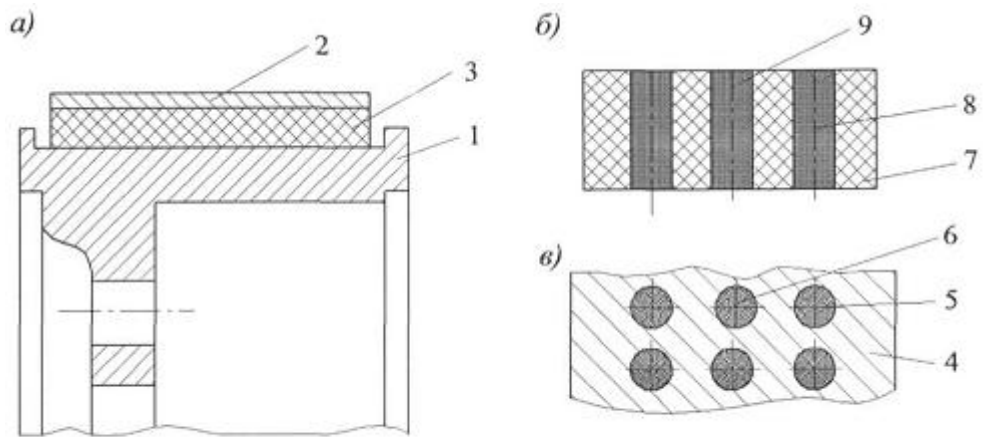
1. Новий підхід до теплової динаміки тертя фрикційних вузлів гальмівних пристроїв (частина 4) /О.І. Вольченко, М.В. Кіндрачук, Д.О. Вольченко [та ін.] //Наук. техн. зб.: Проблеми тертя та зношування. - К.: НАУ, вип. 56, 2011. - С. 60 [аналог].

2. А.с. № 354198 СРСР, м. Кп. F16d 69/00, опубл. 09.10.1972, б. і. № 30 [прототип].

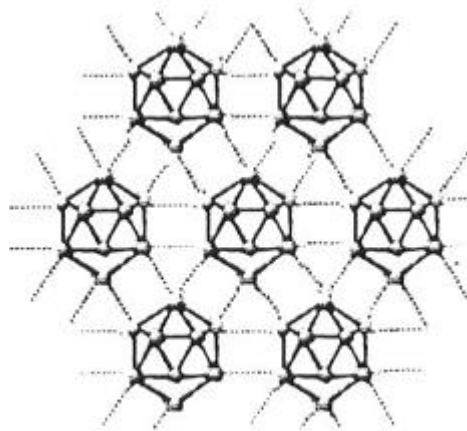
40

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

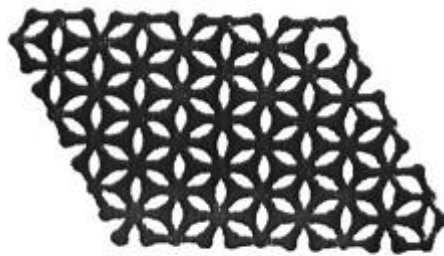
45 Енергоємні пари тертя важконавантажених фрикційних вузлів, які містять металевий і неметалевий фрикційні елементи, в яких по шарах різної товщини у вигляді повторюваних композиційних матриць розміщені циліндричні вкраплення з твердих напівпровідникових матеріалів типу оксиду алюмінію і карбїду бору в послїдовності, що чергується, і розташовані в неметалевому фрикційному елементі паралельно, а в металевому – перпендикулярно, поверхні 50 тертя фрикційних елементів, та утворюють, таким чином, тимчасові Т-подібні енергетичні містки з різними типами контактів.



Фиг. 1, а, б, в

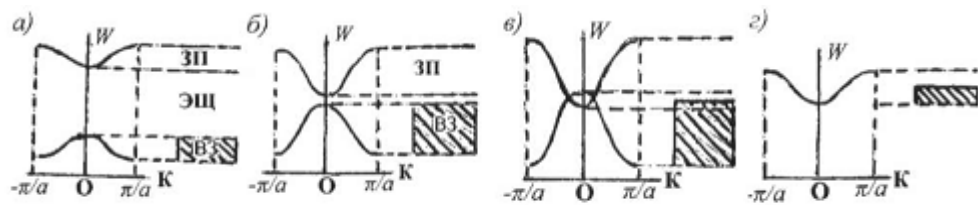


Фиг. 2

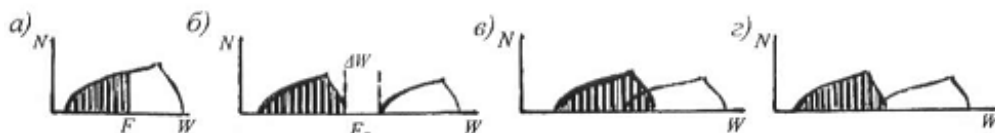


Фиг. 3

5



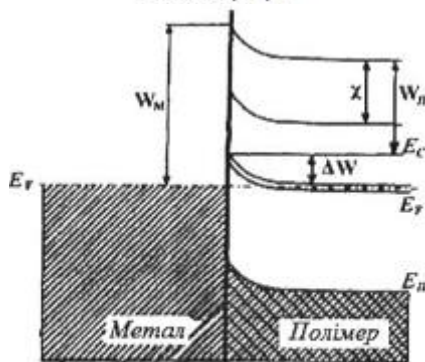
Фиг. 4 а, б, в, г



Фиг. 5 а, б, в, г

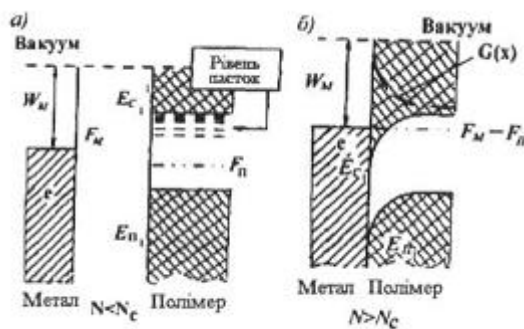


Фиг. 6 а, б, в

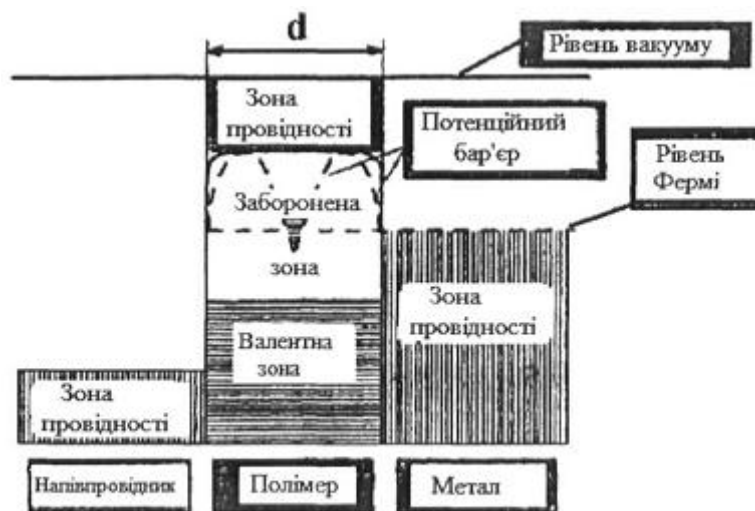


Фиг. 7

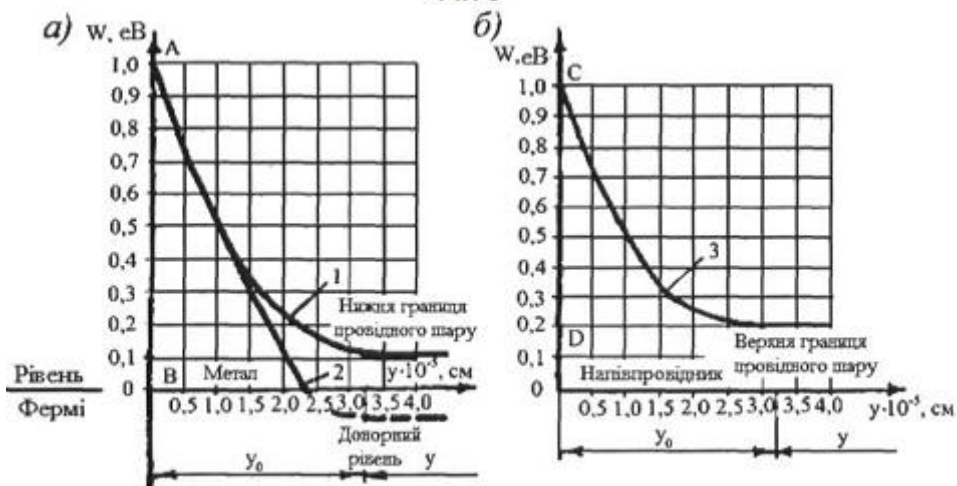
5



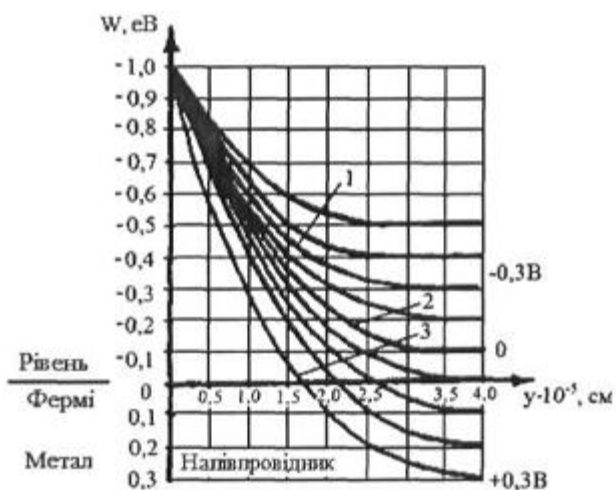
Фиг. 8 а, б



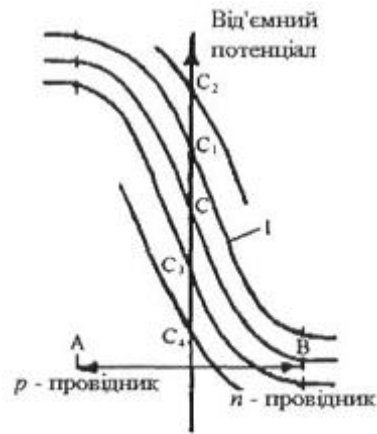
Фіг. 9



Фіг. 10 а, б



Фіг. 11



Фіг. 12

Комп'ютерна верстка Л. Литвиненко

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601