

УДК 625.08

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.99.0.74

## ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО Й ТЕПЛОВОГО СТРУМІВ НА ПОВЕДІНКУ ВОДНЮ В ПАРАХ ТЕРТЯ

Вольченко Д. О<sup>1</sup>., Журавльов Д. Ю<sup>1</sup>., Бурава О. С<sup>1</sup>.,  
Снурніков В. І.<sup>1</sup>, Разарьонов Л. В.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<sup>2</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Дослідження показали, що суттєвий вплив у парах тертя гальм на поведінку водню чинять імпульсні питомі навантаження, електричні та теплові струми, а також їхні градієнти. Із зростанням імпульсних питомих навантажень електропровідність контакту збільшується порівняно швидко, що посилює термoeфект, але за умови плавного скидання навантаження вона зменшується значно повільніше й не збігається з початковими значеннями. Величина та напрямок інтегральної е.р.с. залежить від фізико-механічних властивостей металів фрикційної пари, від швидкісних і навантажувальних режимів тертя, від багатьох інших факторів, що викликають значне коливання й навіть інверсію цього параметра. Дія термоструму на зносостійкість деталей пар тертя пов'язане з особливостями перебігу релаксаційних, окисних, дифузійних та інших процесів, що впливають один на один. Окисні плівки на поверхні контактуючих металів мають напівпровідникові властивості та великий питомий опір, а також здатні відігравати роль підсилювачів термоелектричних ефектів, які можуть викликати появу досить значних вихрових струмів у місцях найбільшого зближення точок контакту і, внаслідок низької теплопровідності оксидів, сприяти локалізації. Імпульсні височастотні механічні коливання в зоні тертя невіддільні від термоелектричних релаксаційних процесів, і ці фактори завжди спільно впливають на розкид експериментальних значень зносостійкості деталей.

**Ключові слова:** гальмівний пристрій, пари тертя, імпульсні питомі навантаження, електричні та теплові струми, водень.

### Вступ

Унаслідок малої площі контактів мікронерівностей пар тертя гальм на їхніх поверхнях фрикційної взаємодії з'являються умови для руйнівної дії локальних термострумів великої сили, що протікають. Ці струми можуть змінювати (прискорювати) дифузійні процеси в поверхневому шарі деталей спряження (особливо високорухомих атомів водню, вуглецю та інших домішок), викликати електроерозійне, електродифузійне, окисне й водневе зношування пар тертя гальм, що труться.

### Аналіз публікацій

У роботі [1] наведено аналіз та синтез термоелектричних процесів, що характеризують електротермомеханічні фрикційні взаємодії пар тертя гальмівних пристроїв. Виділено верхній шар полімерної накладки за умови температури вищої за допустиму для її матеріалу, коли настає крекінг-процес. Розглянуто термодинамічні моделі взаємодії металевих елементів тертя під час його роботи в різних середовищах. Установлено вплив поверхневих та об'ємних температур, імпульсних пи-

томних навантажень, коефіцієнта взаємного перекриття пар тертя, співвідношення між кількістю реагентів, присутності інертних газів та типу реакцій на швидкість протікання хімічних реакцій під час крекінг-процесу у верхньому шарі полімерних накладок вузлів тертя. Показано, що з оцінки рівноваги хімічної реакції необхідно враховувати зміну енергії Гіббса. У роботі [2] зазначено, що спостерігається інтенсивне виділення водню в процесі електротермомеханічного тертя внаслідок трибодиструкції водомістких полімерних накладок у парах тертя гальм, що створює джерело безперервного надходження водню в поверхневий шар сталі або чавуну металевих фрикційних елементів. Крім того, установлено, що в разі важких режимів фрикційної взаємодії пар тертя стрічково-колодкового гальма бурової лебідки максимальна поверхнево-об'ємна температура утворюється на певній глибині обода шківів [3]. Це створює умови, за яких водень, якщо він адсорбується на поверхні деталі, під дією температурного градієнта дифундує вглиб поверхні, там концентрується, а отже, посилює зношування. Однак не

було враховано енергетичних умов виникнення наводнення поверхневого шару металевих фрикційних елементів.

У роботах [4–7] розглядається взаємодія водню з металами та неметалевими елементами. Ілюструється вплив водню на різні види металів і сплавів та виникнення у них особливих дефектів. Розширено відомості про водневу крихкість та вплив водню на механічні характеристики в парі «водень – метал» у групах періодичної системи Д. Менделєєва.

Зношуванню субшорсткостей поверхонь тертя у воднемісткому середовищі присвячена робота [8]. В останній праці водень закачується в приповерхневий шар металевого тіла та взаємодіє з його кристалічною ґраткою. Зазначено, що рушійною силою в процесах водневого зношування є температура, тиск, деформація, структура й дефекти кристалічних ґраток.

У роботах [9–10] досліджено фізико-механічні процеси на поверхні тертя водневого зношування деталей машин та обладнання. Установлено причини виділення водню, наводнення тертьових поверхонь і руйнування їх. Показано складну картину поведінки водню в поверхневих шарах у процесі тертя під дією різних факторів та визначено вплив «біографічного» водню на зношування деталей. Викладено причини перенесення в процесі тертя твердішого матеріалу на м'який матеріал: сталі – на бронзу, чавуну – на пластмасу. Надано практичні рекомендації щодо подавлення водневого зношування та підвищення довговічності та безвідмовності вузлів тертя машин та обладнання. Водночас не було розглянуто: дію зовнішнього водню на поверхневий шар металевого фрикційного елемента та його попадання в приповерхневий шар шляхом закачування; не враховувалося явище адгезії та типи контактів пар тертя під час їхньої фрикційної взаємодії, а також зв'язок явищ «адсорбція – дифузія», що спостерігається в поверхневих та приповерхневих шарах пар тертя. І найголовніше те, що не було виокремлено зовнішній і внутрішній водень та їхня роль у трибологічних реакціях.

У працях [3, 4] встановлено, що в разі важких режимів тертя максимальна поверхнево-об'ємна температура утворюється на певній глибині поверхні тертя. Це створює умови, за яких водень, якщо він буде адсорбований на поверхні деталі, під дією температурного градієнта дифундує вглиб поверхні, там концентрується, викликає крихкість поверхневих шарів і посилює зношування. Однак не було

зазначено, що відбувається в шарі приповерхневого металевого елемента зі структурами його кристалічних ґраток.

У роботі [7] зазначено, що дислокації, вакансії, межі зерен мають різну енергію зв'язків, а енергія зв'язку водню впливає на той тип дефекту, в який спрямовується водень. Якщо концентрації 1000 ppm і вищі, водень починає впливати на електричні, хімічні та магнітні властивості матеріалів.

Спосіб визначення напрямків складників електричних струмів у парах тертя «полімер – метал» барабанно-колодкового гальма в процесі їхнього нагрівання в стендових умовах розглянуто в роботі [11]. Однак у цьому дослідженні відзначено вплив сумарного електричного струму на атомарний водень у робочій поверхні обода барабана.

### Мета та постановка завдання

Метою є оцінити вплив електричного та теплового струмів, що виникають у парах тертя гальм, на поведінку атомарного водню.

У цій публікації розглянуто такі питання щодо вирішуваної проблеми:

- вплив на поведінку водню в парах тертя гальма струмів: електричного, теплового;
- обговорення результатів.

### Вплив електричного струму на поведінку водню в парах тертя гальма

Вплив електричного струму на процеси зношування та руйнування робочої поверхні металевих фрикційних елементів гальм, очевидно, визначається процесами наводнення та поведінкою водню насамперед у його поверхневому шарі. Це наочно підтверджується лабораторними експериментальними результатами щодо вихрового руху водню.

Пропускання електричного струму змінює процеси пластичного деформування зразків, що перебувають під напруженням.

На рис. 1, а, б показані типові (підтвержені багатьма дослідниками) криві повзучості, отримані без впливу (1) і з впливом електричного або магнітного полів (2), у разі їхнього включення в точці А. Ділянка кривої повзучості, що відповідає впливу полів, характеризується більшою величиною пластичної деформації.

Ефект електричного та магнітного полів спостерігається лише за наявності пластичної деформації як феромагнітних матеріалів (кобальт, сталь), так і діамагнітних (мідь) і парамагнітних (алюміній, титан), оскільки попередня (до навантаження) дія полів не дала від-

чутного прискорення повзучості. Величина деформації за початковий період випробувань (тривалість випробувань – 1,5 год) залежить від зусилля та може становити 0,05...0,9 % і навіть вище.

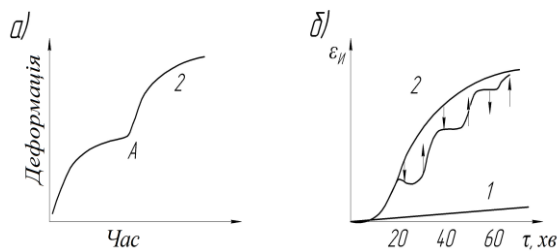


Рис. 1. Залежність повзучості без впливу (1) та з впливом (2) магнітного та електричних полів, що включаються в точці (А) та багаторазове збільшення повзучості металу до стрімкого руйнування зразків за умови безперервного наводнення (а), включення (↑) та виключення (↓) катодного струму, без наводнення (б)

Особливо інтенсивно деформація протікає за першої дії та за подальших дій зменшується. Витримка без зовнішніх полів відновлює початкову здатність повзучості.

Багаторазове збільшення повзучості металів у процесі наводнення до стрімкого руйнування зразків (на обертальному маятнику) спостерігається в момент включення катодного струму [12]. Після вимикання катодного струму повзучість різко сповільнюється. Така ступінчаста залежність повзучості в часі різко відрізняється від плавної кривої інтенсивного наростання повзучості (до тих самих значень) у процесі постійного наводнення та від залежності, що показує практично відсутність ефекту під час випробування без наводнення (рис. 1, а, б).

Закономірності концентрації електромагнітних полів на неоднорідностях різної конфігурації аналогічні відомим закономірностям із теорії пружності для полів механічних напружень. У вершинах витягнутих однорідностей типу тріщин, соєподібних непровідних включень коефіцієнт концентрації однорідного на нескінченності електричного поля (густини струму) може досягати декількох десятків, що призводить до локального перегріву в структурі зразка внаслідок збільшення об'ємної густини тепловиділення вдесятеро за умови знехтування малого середнього (не більше ніж 10 К).

Локальний розігрів короткими імпульсами струму може досягати температури випарову-

вання матеріалів, унаслідок чого відбувається мікроелектровибух та утворення кратерів у вершині гострих дефектів, а швидке охолодження – до появи зони термічного впливу із гартовими структурами, часто не мають аналогів за умови звичайного термооброблення. Унаслідок змінюються механічні властивості, збільшується або зменшується пластичність, несуча здатність, енергоємність руйнування і под.

У науковому відкритті [13], отриманому нами, встановлено невідому раніше закономірність зміни зносо-фрикційних характеристик поверхневих шарів металополімерних пар тертя під час їхньої контактної-імпульсної взаємодії. Вона полягає в тому, що в процесі тертя виникає електротермічний опір дискретних контактів із різною енергетичною активністю мікроконденсаторів і термобатарей з їхнім миттєвим перемиканням під час зміни площ плям контакту мікрориступів і градієнта механічних властивостей, а також темпу проникнення взаємодіючих між собою імпульсів електричного й теплового струмів за умови переполіризації, що веде до дестабілізації динамічного коефіцієнта тертя металополімерних пар тертя.

Наукове відкриття [14], отримане нами, встановлює не відомі раніше закономірності зміни електродинамічних характеристик у металополімерних парах тертя в процесі фрикційної взаємодії, як електричного вибуху в приповерхневому шарі полімерної накладки та електричного розряду між плямами контактів її мікрориступів за умови дії імпульсу струму. У процесах електротермомеханічного тертя, коли безперервно виникають електричні та теплові мікроланцюги, генеруються імпульсні електричні та теплові струми, що нагрівають і плавлять до рідкого стану електроди плям контактів полімерних мікрориступів. Це веде до інтенсифікації падіння напруги й до втрати ними електропровідності, що супроводжується збільшенням опору, яке зумовлює обрив струму в мікроелектроланцюгах. Водночас імпульс напруги, що виникає на їхній індуктивності, у кілька разів перевищує зарядну напругу плям контактів мікрориступів металевого фрикційного елемента (мікроконденсаторів). Це сприяє генеруванню потужного зовнішнього об'ємного заряду, який викликає електротермічний вибух, унаслідок чого продукти, що утворилися, потрапляють у зазори між мікрориступами. Це супроводжується збільшенням об'єму та зменшенням їхнього тиску. Але у цьому разі під впливом

імпульсного струму й залишкової напруги генерується об'ємний заряд, що сприяє виникненню електротерморозряду для пробою товщини шару продуктів, що залишилися, забезпечуючи цим їхнє масоперенесення на робочу поверхню металевго фрикційного елемента.

### Оцінення впливу електричного та теплового струмів

Існує низка особливостей взаємодії водню зі сталлю, пов'язаних із характером зовнішнього впливу та двома формами елемента попадання водню в поверхневий шар металевго фрикційного елемента.

Перша дифузійно-активна форма – водень у вигляді іона розчинений у кристалічній ґратці металу, і друга – водень у вигляді іона перебуває в молекулярному стані в дефектах кристалічних ґраток.

Дифузійно-активна форма в процесі розчинення досягає рівноважного значення концентрації даних градієнтів температур і напружень, електричних і теплових полів. Ця форма зворотна й не впливає на крихкість сталі.

Молекулярна форма надає крихку дію на сталь і деякі інші метали. Перехід від розчиненої форми до молекулярної залежить від дефектності сталі, температури й особливо сильно від напружено-деформованого стану. Концентрація молекулярної форми залежить від дефектності металу й може досягати граничної концентрації, що викликає руйнування.

Залежно від впливу імпульсних питомих навантажень у парі тертя виникає те чи інше співвідношення між двома формами стану водню:

- у першому випадку за умови корозійного впливу відбувається поступовий, незворотний перехід розчиненого в рівноважній концентрації водню в сегрегійовану (молекулярну) форму;

- у другому випадку, коли відбувається механічна дія на пару тертя, водень під дією градієнта напружень у металі концентрується в зоні максимальних напружень, де переходить у молекулярну форму й викликає руйнування;

- у третьому випадку, коли є тертя й на поверхні виникають градієнти температур і напружень, електричні та теплові поля, відбувається утворення в поверхневому шарі надрівноважної концентрації водню, що виділився (під час тертя) з адсорбованої води та робочої поверхні полімерної накладки.

Рушійною силою в процесах, явищах та ефектах, що виникають у парах тертя гальм за умови різних режимів навантаження, є потенціали.

Схема зміни електродного потенціалу в часі під час стрибкоподібної зміни  $p$  або  $v$  наведена на рис. 2, а, б. У процесі прикладання навантаження відбувається різке негативне зміщення електрохімічного потенціалу  $\phi$ , а потім його плавне зростання (облагоджування) до певного значення  $\phi_{уст}$ , коли потенціал є установленим. Основними параметри перехідного процесу є: час до досягнення потенціалу  $\tau_{уст}$ , максимальне зміщення потенціалу щодо встановленого значення  $\Delta\phi$ , кутова характеристика часу початкового зриву потенціалу  $\alpha$  [15].

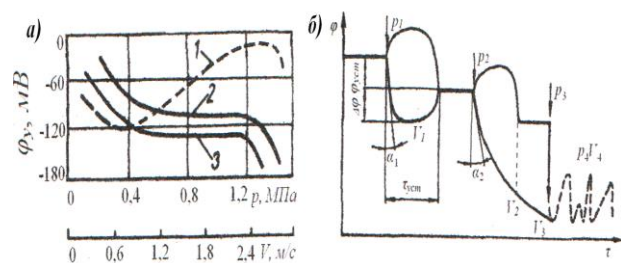


Рис. 2. Закономірності зміни електродного потенціалу: а – від швидкості ковзання ( $V$ ) та імпульсного питомого навантаження, що змінюється малими (1) та більшими (2) стрибками (3); б – за умови різних режимів навантаження ( $p$ ) та швидкості ковзання ( $V$ ) пар тертя гальма

Для вивчення встановлених режимів і перехідних процесів було проведено п'ять серій дослідів: стрибкоподібне (послідовне) збільшення навантаження через 0,15 МПа (малі стрибки); стрибкоподібне збільшення навантаження відповідно на 0,15; 0,30; 0,45; 0,50; 0,90; 1,05 МПа (великі стрибки); стрибкоподібна зміна швидкості ковзання на величини від 0,1 до 1,8 м/с; стрибкоподібне зменшення навантаження до значень  $p = 0,15$  МПа та  $p = 0$  (зупинка); стрибкоподібне зменшення швидкості до нуля (зупинка).

Характер зміни електродного потенціалу в часі  $\tau$  за умови різних режимів тертя схематично показаний на рис. 2, б. Спочатку відбувається від'ємне зміщення потенціалу. Для величин  $p$ ,  $v$ , які не перевищують певних значень, після деякого перехідного процесу потенціал стабілізується. За умови критичних значень  $p_{кр}$  і  $v_{кр}$  відбувається зрив потенціалу та його неусталовлені коливання. Про це сві-

дчить рис. 3 а, б, з якого видні нестановлені коливання з різними амплітудами. Більш систематизований хвильовий характер мають спектри термостимульованих струмів ( $I$ ) від поверхневої температури робочої поверхні накладки ( $t$ ). У разі збільшення останнього та імпульсного питомого навантаження спостерігається зростання термостимульованих струмів.

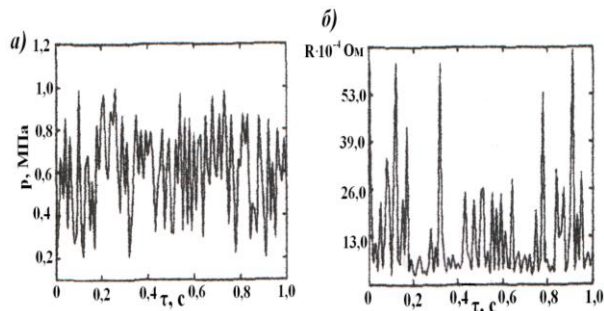


Рис. 3. Часові залежності імпульсних питомих навантажень, що діють на плями контактів мікроступів металополімерного трибоспряження з нерівномірним розподілом амплітуди фрикційної взаємодії (а) та перехідного електротермоопору за умови цієї взаємодії (б)

Утворення подвійних електричних шарів відбувається на міжфазній границі двох середовищ з різними характеристиками провідності електронної (металевий елемент тертя) та іонної (поверхневий та приповерхневий шари накладки, що перебувають у різних термодинамічних станах). Поверхневий і приповерхневий шари фрикційних накладок є багатокомпонентними структурами, тобто гетерогенною системою, у якій розгляд їхніх моделей необхідно вести з погляду хімічної кінетики коливання реакцій. Хімічний потенціал залежить від концентрації компонентів у накладці. На рис. 4, а, б проілюстровано зміну електрохімічного потенціалу металеві (а) та неметалевої (б) поверхонь під час навантаження пари тертя в ділянці їхнього різного структурного та теплового стану. Установлено, що хімпотенціал (крива 3', див. рис. 4, а) збільшується в зоні температур, які перевищують допустиму для накладки матеріалів, оскільки на її поверхні є острівці електроліту.

Наявність хімпотенціалу супроводжується накопиченням зарядів протилежного знака та проявом у контактній зоні особливостей кожної фази: іонів у поверхневих і приповерхневих шарах накладок та електронів (дірок) у металевому елементі тертя. Іншими словами,

фізичний контакт між зазначеними вище середовищами призводить до виникнення та формування подвійного електричного шару.

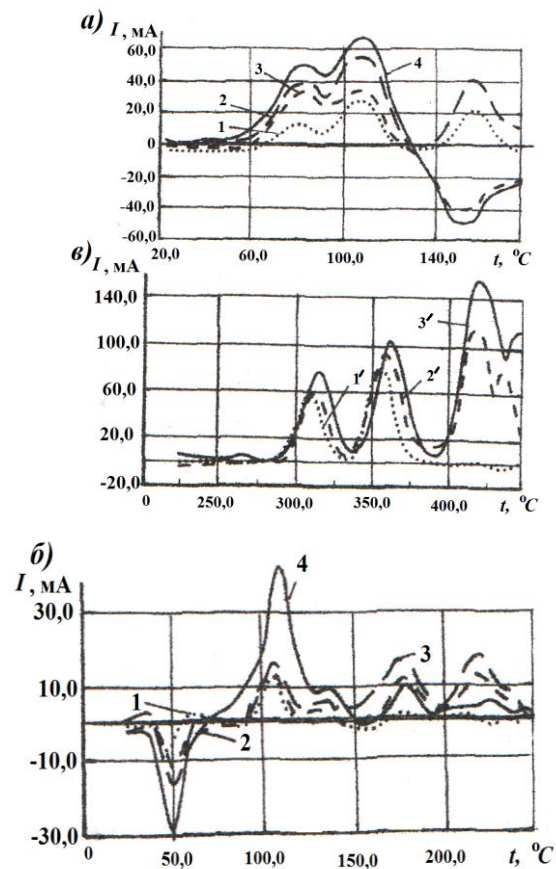


Рис. 4. Спектри термостимульованих струмів залежно від поверхневої температури [до (а, б) та вище за (в) допустиму температуру для матеріалів полімерної накладки] за умови фрикційної взаємодії пар тертя «полімер – метал» (ФК-24А – сталь 35ХНЛ), якщо товщина накладки (а –  $\delta_n = 15,0$  мм; б, в –  $\delta_n = 25,0$  мм) у процесі дії імпульсних питомих навантажень:  $p = 0,15$  МПа (1);  $0,3$  МПа (2);  $0,45$  (3);  $0,6$  МПа (4) та  $p = 0,25$  МПа (1');  $0,5$  МПа (2');  $0,75$  МПа (3')

В останньому заряди локалізуються на дуже невеликій відстані, товщина шару в більшості випадків якого знаходиться в межах  $4,0\text{--}7,0$  А.

Виникнення електрохімічного циліндричного конденсатора можливе за умов, які забезпечують надійний просторовий поділ зарядів на його обичайках і поляризацію об'ємного заряду в приповерхневих шарах фрикційних накладок. Такі умови є «ідеально поляризованими», а відповідна обичайка в заданих електролітичних системах і певних границях потенціалів є поляризованою. Їхня

природа така, що в процесі поляризації робочої поверхні металевго елемента тертя на ній не відбуваються фарадівські процеси, що пов'язані з масопереносом матеріалу накладок через границю розділу фаз.

Розглянемо на нанотрибологічному рівні електричні струми, що генеруються, у парах тертя різних типів.

Діаграма зміни струму в прямій («колодочка-диск») парі тертя (рис. 5, а), отримана на машині тертя та зношування СМЦ-2 в лабораторних умовах, показала, що струми є нестабільними (криві 1 і 2).

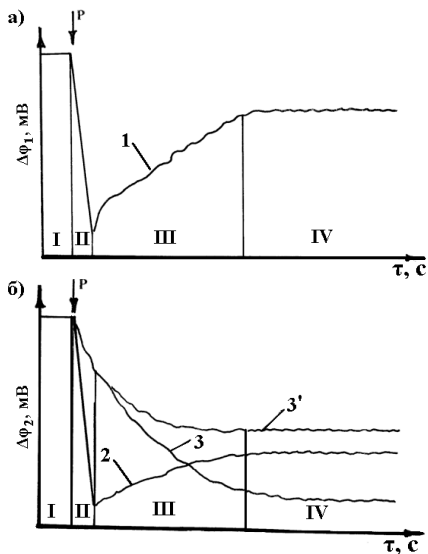


Рис. 5. Зміна електрохімічного потенціалу металевої (а) та неметалевої (б) поверхонь тертя за умови навантаження фрикційної пари в ділянці: I, II – природних плівок оксидів (первинних структур) та їхнього руйнування; IV – динамічної рівноваги та автоматичного регулювання процесів утворення та руйнування вторинних структур; I – закономірності для металевго елемента тертя; 2, 3, 3' – закономірності для поверхневих та приповерхневих шарів фрикційних накладок до, в зоні та вище від допустимих температур для їхніх матеріалів

Зазначені криві беруть початок за умови однакового негативного напрямку струмів, а потім крива 2 в разі навантаження 2,0 Н переходить у зону позитивного напрямку струму. Вигляд кривої 3 істотно відрізняється від кривих 1 і 2. Зазначена крива починається за умови максимального значення негативного напрямку струму (-9,7 нА), перетинає вісь абсцис системи координат, якщо навантаження 1,35 Н, і піднімається до максимального значення позитивного напрямку струму (5,2 нА).

У діапазоні навантаження від 4,5 Н до 7,3 Н має місце майже однакова аперіодична зміна напрямку струму. За умови 7,3 Н значення позитивного напрямку струму (4,5 нА) змінюється до негативного (-11,75 нА). Зміна напрямку струму (крива 3) відбувається за швидкості ковзання  $V_{\text{ковз}} = 1,5$  м/с.

З діаграми кінетики у зворотній парі тертя (рис. 5, б) видно, що в разі низьких швидкостей тертя (крива 1) величина струму електризації в початковий період тертя збільшується та залишається практично незмінною. Можна вважати, що система перебуває в нестабільному стані. Зі збільшенням швидкості ковзання (криві 2–4) відбувається зміна напрямку (інверсія) струму електризації (відповідно, якщо сила  $F$ , яка дорівнювала 10,5; 3,0 і 2,0 Н). У цьому разі вона мала характер множини. Із збільшенням швидкості ковзання кількість інверсій струму теж збільшується і водночас для прямої та зворотної пар тертя (див. рис. 6, а і б) показує, що в обох випадках спостерігаються як позитивні, так і негативні значення струмів електризації залежно від режиму гальмування. Проаналізуємо теплонавантаженість поверхневого та приповерхневого шарів елементів тертя металополімерних пар.

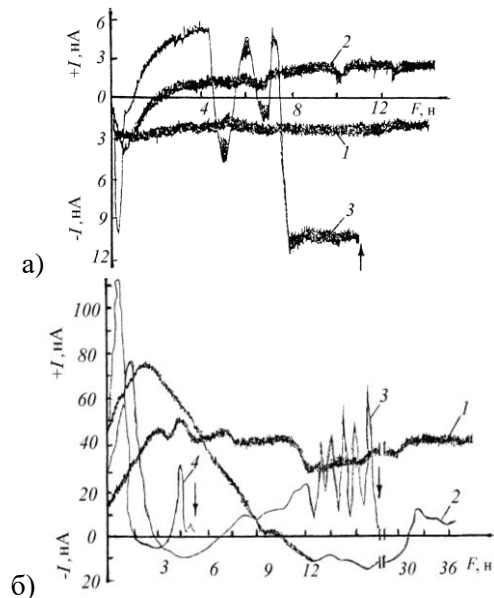


Рис. 6. Закономірності зміни струмів електризації у часі ( $\tau$ ) прямої («колодочка – диск») (а) та зворотної («диск – колодочка») (б) пари тертя за умови різних швидкостей ковзання ( $V_{\text{ковз}}$ ) та питомих навантажень ( $p$ ): а –  $V_{\text{ковз}} = 0,3$  м/с (1);  $V_{\text{ковз}} = 0,8$  м/с (2);  $V_{\text{ковз}} = 1,5$  м/с (3);  $V_{\text{ковз}} = 2,0$  м/с (4), якщо  $p = 0,15$  МПа;  $\uparrow$  – позначені моменти руйнування поверхонь полімерних накладок

Відповідно до класичної теорії в безпосередній близькості від точок контакту пари тертя «метал (1) – полімер (2)» утворюються окремі ізотермічні напівсферичні поверхні, що зливаються в загальну поверхню на деякій глибині матеріалів. Розташування ізотермічних поверхонь характеризується величиною температурного градієнта. У загальному випадку температурне поле в металевому та полімерному фрикційних елементах, які належать, відповідно, до поверхневого та приповерхневого їхніх шарів. Відомо, що в зоні взаємодії мають місце такі температури: тертя – виникає в зоні деформації мікроділянок робочої поверхні; контактна – виникає в точках контакту; поверхнева – виникає на макроділянках поверхонь тертя; об'ємна – виникає в тілі елемента тертя нижче за зону деформації.

За умови контактної-імпульсної взаємодії мікрорівнів поверхонь тертя металополімерних пар гальмівних пристроїв елементи тертя зазнають електротермомеханічного напружено-деформованого стану й водночас відбувається розподіл електричних та теплових полів біля зони контактної взаємодії. На макрорівні (зовнішні параметри) – це експлуатаційні параметри (швидкість ковзання, податливість елементів пари тертя та її контактної стики); коефіцієнти (статичного та динамічного) взаємного перекриття; нормальні зусилля; імпульсні питомі навантаження; динамічний коефіцієнт тертя; гальмівний момент; температури: спалаху, поверхневі, об'ємні тощо, які визначаються з урахуванням відомих умов взаємодії та мікроформи тертьових поверхонь. На мікрорівні (внутрішні параметри) – це фактично імпульсно діючі: нормальні сили, імпульсні питомі навантаження, деформації, механічні та термічні напруження, електричні та теплові струми та поля, що породжуються ними, температури в приповерхневих шарах і под., які визначаються на підставі теорії єдиного поля взаємодії. На нанорівні розглядаються умови рівноваги на енергетичних рівнях у роботі полімерної накладки (її робочого поверхневого шару) у зоні температур, нижче та вище допустимих для її матеріалів; потенційні бар'єри в умовах рівноваги в процесі контактної-імпульсної взаємодії термоелементів мікротермобатарей у парах тертя; контакти між мікрорівнями металевих елементів тертя та напівпровідниковими плівками полімерної накладки; переходи типу  $p-n$  у мікротермобатареях металевих елементів тертя та напівпровідниковими плівками полімерних

накладок; взаємодії електричних та теплових полів тощо.

Поняття стану взаємодії плям контактів мікрорівнів металополімерних пар тертя містить напружено-деформований стан і генеровані електричні та акумульовані теплові струми на їхніх поверхнях і в приповерхневих шарах [16].

На макрорівні це номінальні характеристики, визначені з урахуванням відомих умов взаємодії в макроформі поверхонь. На мікрорівні – це фактичні імпульсні питомі навантаження, а також фактичні, механічні, електричні, теплові та хімічні поля у поверхневих та приповерхневих шарах, що омиваються швидкісними струмами, у яких зростає абсолютна величина струму електризації в початковий період роботи. У цьому разі необхідно проводити аналіз струмових діаграм компонентів середовищ, що виникли на поверхнях плям контактів мікрорівнів під час їхньої взаємодії.

Руйнування матеріалів у процесі тертя обумовлено контактної-імпульсною взаємодією, що супроводжується спільною дією механічного, електричного та теплового навантаження. Це викликає зростання поверхневих температур і температурних градієнтів, що призводить до значних термічних напружень у металевому елементі тертя.

Теплові напруження, що виникають в елементах пари тертя гальм, є наслідком теплового удару, викликаного швидким наростанням температури. Це супроводжується структурними змінами в матеріалах пари тертя.

Електротермомеханічне тертя у високонавантажених металополімерних парах стрічково-колодкового гальма бурової лебідки здійснюється в разі змінних швидкостей ковзання та питомих навантажень, в умовах генерованих електричних та акумульованих теплових струмів із нерівномірністю нагрівання приповерхневих шарів пар тертя «метал – полімер». У цьому випадку процеси, явища та ефекти, що протікають у приповерхневих шарах пар тертя, відрізняються великою складністю. Так, на поверхні кожного з тіл у парі характерний високий рівень неоднорідності матеріалів і дефектів структур, масштаби яких можна порівняти з розмірами плям контакту, що впливає на електротермомеханічне тертя. Оцінка енергонавантажених поверхонь тертя та її вплив на основні процеси, явища та ефекти необхідні у вирішенні завдань забезпечення надійності фрикційних вузлів шляхом збі-

льшення ресурсу як полімерних накладок, так і робочих поверхонь металевих елементів.

### Обговорення результатів

Теоретичні та експериментальні дослідження впливу електричного й теплового струмів на поведінку водню в парах тертя гальм дозволили встановити таке:

- основний вплив на поведінку водню чинять імпульсні питомі навантаження, електричні та теплові струми;

- величина та напрямок інтегральної е.р.с залежить від фізико-механічних властивостей металів фрикційної пари, від швидкісних та навантажувальних режимів тертя, від багатьох інших факторів, що викликають значне коливання та навіть інверсію цього параметра;

- імпульсні високочастотні механічні коливання в зоні тертя невіддільні від термоелектричних релаксаційних процесів, і обидва ці фактори завжди спільно впливають на розкид експериментальних значень зносостійкості деталей;

- дія термоструму на зносостійкість деталей пар тертя пов'язана з особливостями перебігу релаксаційних, окисних, дифузійних та інших процесів, що впливають один на одного;

- окисні плівки на поверхні контактуючих металів мають напівпровідникові властивості і великий питомий опір. Вони здатні відігравати роль підсилювачів термоелектричних ефектів, які можуть викликати появу досить значних вихрових струмів у місцях найбільшого зближення точок контакту і внаслідок низької теплопровідності окисів сприяти локалізованому виділенню теплоти;

- із зростанням імпульсних питомих навантажень електропровідність контакту збільшується порівняно швидко, що посилює термоелектричний ефект, але за умови плавного скидання навантаження вона зменшується значно повільніше й не збігається з початковими значеннями.

### Висновки

Отже, проілюстровано вплив електричного та теплового струмів на поведінку атомарного водню в парах тертя гальм.

### Література

1. Электротермомеханическое фрикционное взаимодействие в парах трения при крекинг процессе (часть I) / А. Х. Джанахмедов и др. *Вестник Азербайджанской инженерной академии*. 2020. № 3 (12). С. 12–31.
2. Электротермомеханическое фрикционное взаимодействие в парах трения при крекинг процессе (часть II) / А. Х. Джанахмедов и др. *Вестник Азербайджанской инженерной академии*. 2020. № 4 (12). С. 19–26.
3. Гаркунов Д. Н., Суранов Г. И., Хрусталеv Ю. А. Водородное изнашивание деталей машин. *Труды УГТУ*. 2007. 260 с.
4. Гаркунов Д. Н., Суранов Г. И. О способе повышения долговечности колесных и тормозных пар. *Эффект безызносности и триботехнологии*. 1998. № 1. С. 32–36.
5. Галактионова Н. А. Водород в металлах. Москва: *Металлургия*. 1967. 303 с.
6. Influence of a water conduit on the wear resistance of materials in the friction couples of braking units / М. V. Kindrachuk et al. *Materials Science*. 2017. № 2 (53). P. 135–141.
7. Мухаметишина Р. М. Водородное изнашивание деталей дорожно-строительных машин. *Известия КГСАУ*. 2015. № 4 (34). С. 334–338.
8. Шалыгин М. Г. Изнашивание субшероховатости поверхностей трения в водосодержащей среде: дисс. ... на соиск. научн. степени докт. техн. наук: 05.02.04 – трение и износ в машинах. Брянск, 2017. 254 с.
9. Юдин В. М., Лукашев Е. А., Стаvровский М. Е. Трибохимия водородного износа. Москва: МГУПС, 2004. 282 с.
10. Liu D Bai B., Fang H. Zhang W., Gu J Chang K. Effect of temperature and carbide free bainite on the mechanical characteristics of a high stre-low alloy steel. *Materials Science and Engineering A*. 2004. Vol. 371. P. 40–44.
11. Костецкий Б. И. Трение, смазка, и износ в машинах. Киев: *Техника*, 1980. 394 с.
12. Исследование водородного износа тяжелонагруженных металлических фрикционных элементов тормозов / А. Х. Джанахмедов и др. *Вестник Азербайджанской инженерной академии*. 2021. Т. 13. № 4. С. 34–46.
13. Диплом № 462 на научное открытие «Закономерность изменения износофрикционных характеристик поверхностных слоев металлополимерных пар трения при их контактно-импульсном взаимодействии» от 28.12.2013 / А. М. Пашаева и др. Москва: Международ. акад. авторов научн. открыт. и изобрет. Экспертиза заявки на открытие № А-588 от 07.09.2013.
14. Диплом № 482 на научное открытие «Явление массопереноса продуктов трения в металлополимерных парах» от 27.02.2015 / А. Х. Джанахмедов и др. Москва: Международ. акад. авторов научн. откр. и изобрет. Экспертиза заявки на открытие № А-618 от 18.12.2014.
15. Патент 2462628 С2 РФ F16D 65/82, F16D51/10. Способ определения направлений составляющих электрических токов в парах трения «полимер-металл» барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях / А. И. Вольченко и др.; заявитель и патентообладатель – Ивано-Франковск. Национал. техн. ун-т



- нефти и газа. № 2010115528/11; заявл. 19.04.2010; опубл. 27.10.2011. Бюл. № 30. 27 с.
16. Основы трибологии / под ред. А. В. Чичинадзе. Москва: Машиностроение, 2001. 664 с.

### References

1. Elektrotermomekhanicheskoye friktsionnoye vzaimodeystviye v parakh treniya pri kreking-protse (chast' I) / A. Kh. Dzhanakhmedov, A. I. Vol'chenko, D. A. Vol'chenko, V. Ya. Popovich, A. S. Yevchenko. *Vestnik Azerbaydzhanskoj inzhenernoy akademii*, 2020, no. 3 (12), pp. 12–31.
2. Elektrotermomekhanicheskoye friktsionnoye vzaimodeystviye v parakh treniya pri kreking-protse (chast' II) / A. Kh. Dzhanakhmedov, A. I. Vol'chenko, V. S. Skrypyk, A. S. Yevchenko, V. N. Vol'chenko. *Vestnik Azerbaydzhanskoj inzhenernoy akademii*, 2020, no. 4 (12), pp. 19–26.
3. Garkunov D. N., Suranov G. I., Khrustalev Yu. A. Vodorodnoye iznashivaniye detaley mashin. *Trudy UGTU*, 2007, 260 p.
4. Garkunov D. N., Suranov G. I. O sposobe povysheniya dolgovechnosti kolesnykh i tormoznykh par. *Effekt bezyznostnosti i tribotekhnologii*, 1998, no. 1, pp. 32–36.
5. Galaktionova N. A. Vodorod v metallakh. Moskva: Metallurgiya, 1967, 303 p.
6. Influence of a water conduit on the wear resistance of materials in the friction couples of braking units / M. V. Kindrachuk, D. A. Volchenko, N. A. Volchenko, N. M. Stebeletskaya, A. V. Voznyi. *Materials Science*, 2017, no. 2 (53), pp. 135–141.
7. Mukhametishina R. M. Vodorodnoye iznashivaniye detaley dorozhno-stroitel'nykh mashin. *Izvestiya KGSAU*, 2015, no. 4 (34), pp. 334–338.
8. Shalygin M. G. Iznashivaniye subsherokhovatosti poverkhnostey treniya v vodosoderzhashchey srede: diss. ... na sosisk. nauchn. stepeni dokt. tekhn. nauk: 05.02.04 – treniye i iznos v mashinakh. Bryansk, 2017, 254 p.
9. Yudin V. M., Lukashev Ye. A., Stavrovskiy M. Ye. Tribokhimiya vodorodnogo iznosa. Moskva: MGUPS, 2004, 282 p.
10. Liu D Bai V., Fang N. Zhang W., Gu J Chang K. Effect of temperature and carbide free bainite on the mechanical characteristics of a high strength alloy steel. *Materials Science and Engineering A*, 2004, vol. 371, pp. 40–44.
11. Kostetskiy B. I. Treniye, smazka, i iznos v mashinakh. Kiyev: Tekhnika, 1980, 394 p.
12. Issledovaniye vodorodnogo iznosa tyazhelonagruzhenykh metallicheskikh friktsionnykh elementov tormozov / A. Kh. Dzhanakhmedov, V. S. Skrypyk N. A. Vol'chenko, A. N. Yakh'yayeva, D. Yu. Zhuravlev, A. S. Yevchenko. *Vestnik Azerbaydzhanskoj inzhenernoy akademii*, 2021, t. 13, no. 4, pp. 34–46.
13. Diplom № 462 na nauchnoye otkrytiye «Zakonomernost' izmeneniya iznosofriktsionnykh kharakteristik poverkhnostnykh sloyev

- metallopolimernykh par treniya pri ikh kontaktno-impul'snom vzaimodeystvii» ot 28.12.2013 / A. M. Pashayeva, A. Kh. Dzhanakhmedova, A. I. Vol'chenko i dr. Moskva: Mezhdunarod, akad. avtorov nauchn. otkryt. i izobret. Ekspertiza zayavki na otkrytiye № A-588 ot 07.09.2013.
14. Diplom № 482 na nauchnoye otkrytiye «Yavleniye massoperenosa produktov treniya v metallopolimernykh parakh» ot 27.02.2015 / A. Kh. Dzhanakhmedov, A. I. Vol'chenko, E. A. Dzhanakhmedov i dr. Moskva: Mezhdunarod, akad. avtorov nauchn. otkr. i izobret. Ekspertiza zayavki na otkrytiye № A-618 ot 18.12.2014.
  15. Patent 2462628 S2 RF F16D 65/82, F16D51/10. Sposob opredeleniya napravleniy sostavlyayushchikh elektricheskikh tokov v parakh treniya «polimer-metall» barabanno-kolodochnoy tormoza pri ikh nagrevanii v stendovykh usloviyakh / A. I. Vol'chenko, N. A. Vol'chenko, D. A. Vol'chenko, I. V. Bachuk, D. N. Gorbey, P. A. Polyakov; zayavitel' i patentoobladatel'. Ivano-Frankovsk. Natsional. tekhn. un-t nefti i gaza. № 2010115528/11; zayavl. 19.04.2010; opubl. 27.10.2011. Byul. no. 30, 27 p.
  16. Osnovy tribologii / pod red. A. V. Chichinadze. Moskva: Mashinostroyeniye, 2001, 664 p.

**Вольченко Дмитро Олександрович**, д-р техн. наук, професор кафедри видобування нафти і газу, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, divo99@ukr.net, тел. +38 0342 72 71 41, 050-373-82-42;

**Журавльов Дмитро Юрійович**, канд. техн. наук, доцент кафедри технічної механіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, dmytro.2103@ukr.net, тел. +38 0342 72 71 41;

**Бурава Олександр Степанович**, старший викладач, підполковник кафедри військової підготовки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, burava2012@ukr.net, тел. +38 0342 50 25 06;

**Снурніков Володимир Ігорович**, аспірант кафедри технічної механіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, dmytro.2103@ukr.net, тел. +38 0342 72 71 41;

**Разарьонов Леонід Володимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедри доцент кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Lrazarenofgmail.com, тел. +38 057 738-77-37.

### The influence of electric and thermal currents on the behavior of hydrogen in friction pairs

*Studies have shown that the main influence in brake friction pairs on the behavior of hydrogen is pulsed: specific loads, electric and thermal currents, as well as their gradients. With the growth of impulse specific loads, the electrical conductivity of the contact increases relatively quickly, which increases the thermal effect, but when the load is smoothly reset, it*

*decreases much more slowly and does not coincide with the initial values. The magnitude and direction of the integral e.m.f depends on the physical and mechanical properties of the metals of the friction pair, on the speed and load modes of friction, and on many other factors that cause significant fluctuations and even inversion of this parameter. The effect of thermal current on the wear resistance of parts of friction pairs is related to the peculiarities of the course of relaxation, oxidation, diffusion and other processes that affect each other. Oxide films on the surface of contacting metals have semiconducting properties and high resistivity and can play the role of amplifiers of thermoelectric effects, which can cause the appearance of fairly significant eddy currents in the places of the greatest convergence of contact points and, due to the low thermal conductivity of oxides, contribute to localized discharge. Impulsive high-frequency mechanical oscillations in the friction zone are inseparable from thermoelectric relaxation processes, and these factors always jointly affect the spread of experimental values of wear resistance of parts.*

**Key words:** *brake device, friction pairs, impulse: specific loads, electric and thermal currents, hydrogen.*

**Volchenko Dmytro**, doctor of technical sciences, professor of the Department of Oil and Gas Extraction, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

[divo99@ukr.net](mailto:divo99@ukr.net)

phone: +38 0342 72 71 41, 050-373-82-42;

**Zhuravlev Dmytro**, PhD in Engineering Associate Professor of the Department, of the Department of Technical Mechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

[dmytro.2103@ukr.net](mailto:dmytro.2103@ukr.net),

phone: +38 0342 72 71 41;

**Burava Oleksandr**, senior lecturer, lieutenant colonel of the Department of Military Training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, [burava2012@ukr.net](mailto:burava2012@ukr.net),

phone: +38 0342 50 25 06;

**Snurnikov Volodymyr**, graduate student of the Department of Technical Mechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

[dmytro.2103@ukr.net](mailto:dmytro.2103@ukr.net),

phone: +38 0342 72 71 41;

**Razarenov Leonid**, PhD, Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University, [Lrazarenof@gmail.com](mailto:Lrazarenof@gmail.com), тел. +38 057 738-77-37.