

УДК 629.113.592.117

DOI: 10.18372/0370-2197.4(109).20746

О. М. СЕМЕНІЙ

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ПАР ТЕРТЯ ДИСКОВО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМ (У ВОЛОГОМУ СЕРЕДОВИЩІ)

Приділено увагу впливу змочування водою матових та полірованих поверхонь гальмівних дисків під час руху транспортних засобів мокрою дорогою.

Термокінетичні процеси, що відбуваються в середовищі води та вологого повітря, які омивають пари тертя дисково-колодкового гальма, виконані у вигляді диска та колодочки, досліджувалися на машині тертя та зносу СМЦ-2. Встановлено закономірності зміни експлуатаційних параметрів (динамічного коефіцієнта тертя, гальмівного моменту та вагового зносу) колодочки при обертанні диска з частотою 300 хв-1 при питомих навантаженнях 1,0 та 1,3 МПа та поверхневих температурах до 400°C. Дано аналіз інтенсивності зміни перелічених вище експлуатаційних параметрів.

Поліровані та матові поверхні гальмівних дисків з гарячими та холодними зонами мають різні площі. Вода на цих ділянках знаходиться в рідкому та газоподібному станах. Все це сприяє протіканню електрохімічних та хімічних реакцій на поверхні пояса тертя диска. Волога, що сконденсувалася на поясі тертя диска, виступає в ролі електроліту, що сприяє зниженню зносо-фрикційних властивостей пар тертя і утворенню корозійних вогнищ на межах полірованих і матових поверхонь диска. Виконано математичний опис при натурних випробуваннях дисково-колодкового гальма транспортного засобу моделі MAN марки TGA 26.430 при змінних термодинамічних параметрах його пари тертя.

Кисень і водень, що виділяються під час розкладання води в процесі реакції, сприяють окислювальним процесам на поясі тертя диска та інтенсифікують водневий знос його поверхні.

Ключові слова: транспортний засіб, дисково-колодкове гальмо, пари тертя, поверхні диска, змочування.

Вступ. У навколишньому середовищі, у повітрі, завжди є волога. Існує відносна та абсолютна вологість повітря. Відносна вологість характеризує граничний стан пари, що міститься в атмосфері. Інтенсивність фрикційної взаємодії пар тертя, динамічний коефіцієнт тертя і величина зносу залежать також від ступеня насиченості навколишнього середовища водяною парою. Її вплив на теплові, хімічні та електричні процеси, що відбуваються при електротермомеханічній фрикційній взаємодії пар тертя «полімер-метал», вивчені недостатньо.

Високі температури та пружно-пластична деформація матеріалів контактуючої пари при терті сприяють суттєвому зростанню фізико-хімічної активності їх поверхневих шарів. Це створює умови для протікання трибохімічних реакцій, які відносяться до потужних релаксаційних збуджень процесів, що сприяють дисипації тертя енергії, що підводиться до металевого елемента. Особливо активно проходять трибохімічні реакції в поверхневих шарах полімерних накладок вузлів тертя гальмівних пристроїв. З факторів, що впливають на швидкість протікання хімічних реакцій, виділимо наступні:

поверхневій та об'ємній температурі, питомі навантаження, коефіцієнт взаємного перекриття пар тертя, присутність інертних газів і тип реакції.

Зростання зношування пар тертя з підвищенням відносної вологості повітря може спостерігатися при конденсації парів води на поверхні тертя. Сконденсована пара утворює тонку плівку води, яка являє собою електролітичний провідний шар, що сприяє розвитку на робочій поверхні металевого елемента тертя процесів електрохімічної корозії, що роз'їдає мікроділянки поверхні. При цьому утворюються вогнища корозійних ділянок, внаслідок чого збільшується зношування сполучених поверхонь, особливо при зростанні питомих навантажень.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Ефективність дії дисково-колодкових гальм транспортних засобів залежить від кількості вологи, що потрапляє на поверхні пар тертя.

Проаналізуємо роботи, присвячені впливу вологості повітря на експлуатаційні параметри пар тертя, що випробовуються.

У парах тертя «м'яке залізо - м'яке залізо» при навантаженні $p = 1,0$ МПа зі збільшенням відносної вологості повітря в міжконтактній зоні збільшується величина питомого зношування елементів тертя [1]. У цьому випадку продуктом зношування є металевий порошок, що сприяє інтенсифікації процесу схоплювання. При зменшенні питомих навантажень до $p = 5 \cdot 10^4$ Па і збільшення відносної вологості повітря в міжконтактній зоні знос пари тертя зменшується.

Результати проведених досліджень [1-4] свідчать, що зі збільшенням відносної вологості повітря в парах тертя спостерігається збільшення зносу їх робочих поверхонь, викликаного зростанням моменту тертя. Зазначено, що підвищення вологості навколишнього середовища може спричинити збільшення зносу полімерного фрикційного елемента більш ніж 20 разів [1]. У [2, 5] доведено, що зі зростанням парціального тиску водяної пари в міжконтактному зазорі елементів тертя зменшується момент тертя, отже, і знос фрикційного матеріалу.

З [1-5] випливає, що зі збільшенням відносної вологості повітря, що потрапляє в міжконтактну зону пар тертя, виникає додатковий негативний фактор, що впливає на зміну їх експлуатаційних параметрів.

Вода має дуже малу стисливість. Молекули води розташовуються один до одного ближче, ніж у газах, внаслідок чого спостерігається більша взаємодія (притягування) між ними. Повна внутрішня енергія молекул води складається з потенційної енергії, зумовленої молекулярною взаємодією, та кінетичної, пов'язаної з температурою нагрівання води. Ці складові енергії молекул рідини близькі за величиною, що визначає багато її властивостей.

Близько розташовані молекули води утворюють її певну структуру, що отримала назву близького порядку. Однак при видаленні молекул на величину трьох-чотирьох молекулярних діаметрів подібність у їх упаковці один щодо одного порушується. З підвищенням об'ємної температури впорядкованість у розташуванні сусідніх молекул поступово знижується, та його розташування стає дедалі хаотичним.

Особливу роль процесам, які у міжконтактній зоні пар тертя дисково-колодкового гальма, грають питомі навантаження. При невеликих навантаженнях (до 0,7 МПа) мають місце трибохімічні реакції між компонентами матеріалів поєднаних пар тертя та хімічно активними складовими

навколишнього середовища. В результаті цього на поверхнях тертя гальма утворюються пасивні плівки, що захищають метал поясів тертя диска від адгезійного зносу. Встановлено, що чим нижча інтенсивність гетерогенного впливу, пов'язаного із середовищем пари тертя, тим вищий опір руйнуванню.

При високих питомих навантаженнях в парах тертя в поверхневому шарі тіл, що взаємодіють, накопичується енергія деформації до свого деякого допустимого значення. При активізації трибохімічних процесів у твердих фазах інтенсифікується процес схоплювання, унаслідок чого збільшується знос.

При дослідженні впливу вологості навколишнього повітря та зрошення водою робочих поверхонь пар тертя дисково-колодкових гальм транспортних засобів необхідно враховувати:

- структуру трибологічних систем металополімерних пар тертя;
- термодинамічні процеси при змочуванні модельних пар тертя на машині тертя та зносу та натурних пар тертя дисково-колодкового гальма в лабораторних умовах;
- міжконтактне середовище у фрикційних вузлах;
- нанотрибологічні процеси, що відбуваються на робочих поверхнях пар тертя та приповерхневих шарах фрикційних накладок.
- багатоконпонентність впливу води, пари та вологи з властивостями діелектрика, напівпровідника та провідника.

Такий комплексний підхід до дослідження впливу вологи на експлуатаційні характеристики гальмівного вузла досі ніким не робився.

Проблема видалення вологи з поверхні тертя дисково-колодкового гальма, як і раніше, є актуальною.

Мета роботи - оцінка впливу інтенсивності омивання вологим повітрям та зрошення водою гарячих пар тертя дисково-колодкових гальм транспортних засобів, а також термодинамічних та теплообмінних процесів на їхню працездатність.

Термодинамічні процеси, що відбуваються при динамічній навантаженості пар тертя гальм у вологому середовищі. Для дослідження впливу вологого повітря змінної концентрації на знософрикційні характеристики пари тертя ФК-24А-сталь 35ХНЛ були проведені її експериментальні дослідження в лабораторних умовах.

Метою випробувань стало встановлення оптимальної вологості повітря, що найбільш ефективно охолоджує її поверхні.

Оптимальну вологість визначали за результатами порівняння інтенсивності охолодження повітрям із різною відносною вологістю фрикційної пари ФК-24А-сталь 35ХНЛ. Випробування проводили на машині тертя та зносу моделі СМЦ-2. Випробувані зразки були виконані у вигляді диска та колодочки (рис. 1).

У процесі експериментальних досліджень пари тертя ФК-24А-сталь 35ХНЛ реєструвалися такі параметри: кількість обертів диска, момент тертя та поверхневі температури.

Запис моменту тертя та контроль температури поверхні тертя фрикційної пари здійснювали електронним потенціометром. Сумарна кількість обертів диска фіксувалося за допомогою лічильника, встановленого в потенціометрі блоці. Зношування зразків визначали зважуванням до і після їх випробувань. Загальний час роботи зразків становив шість годин, що відповідає середньому часу роботи

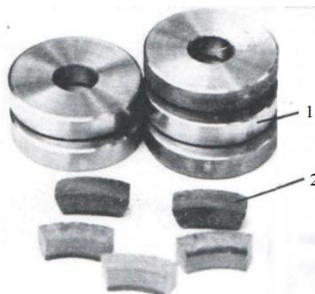


Рис. 1. Випробувані зразки: диски – 1, колодки – 2

фрикційних накладок дисково-колодкового гальма в режимі експлуатації вантажного транспортного засобу марки MAN моделі 26.430.

Величина зусилля притискання колодки до диска вибиралася з умови рівності питомих навантажень у випробуваних зразках та у фрикційній парі дисково-колодкового гальма.

Для випробування зразків у середовищі вологого повітря на машині тертя СМЦ-2 встановлювалася спеціальна камера (рис. 2).



Рис. 2. Камера машини СМЦ-2 для випробування зразків у різних середовищах

Об'єм камери послідовно заповнювали повітрям з відносною вологістю 25, 50 і 75%. Повітря вказаної вологості подавали протягом 5; 10 та 15 с через кожні 2,0-2,5 хв.

Зразки при терті нагріваються, виділяючи теплоту в довкілля, внаслідок чого волога повітря, що заповнює камеру, інтенсивно випаровується. Пар, що утворився, омив робочі поверхні диска і колодки.

До початку випробувань зразки піддавали припрацюванню для забезпечення більш повного взаємного прилягання їх поверхонь.

На повітрі зразки випробовували при швидкості обертання диска 300 хв^{-1} та питомому навантаженні 1,0 МПа. У початковий момент часу по мірі збільшення навантаження до зразків момент тертя збільшувався. Разом із ним зростала температура. Однак після закінчення 2,0-3,0 хв з часу пуску машини момент плавно падав, після чого стабілізувався, що вказувало на встановлення теплової рівноваги пари тертя при заданому питомому навантаженні (рис. 3). При збільшенні питомих імпульсних навантажень від 0,1 МПа до 1,8 МПа гальмівний момент збільшувався з 0,1 Нм до 1,5 Нм. Щодо відсотка відносної

вологості, то максимальне значення гальмівного моменту спостерігалось при $K = 50\%$.

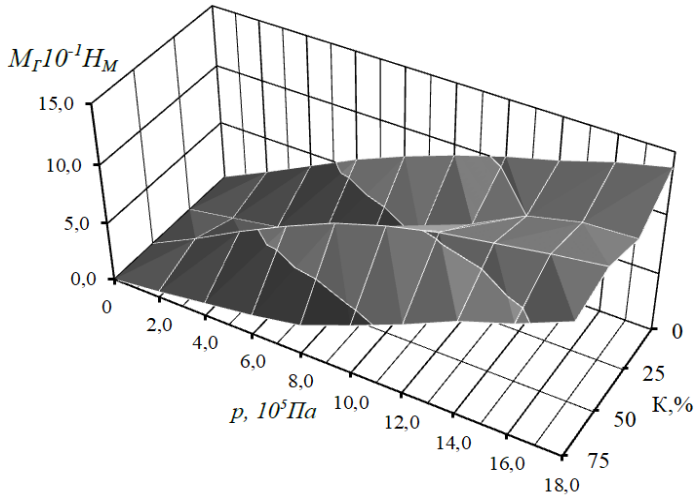


Рис. 3. Закономірності зміни гальмівного моменту (M_T) пари тертя «диск сталь 35ХНЛ - накладка ФК-24А» від імпульсних питомих навантажень (p) при охолодженні повітрям у різному стані

На рис. 4 а б наведені криві залежності зносу від моменту тертя при роботі пари тертя ФК-24А-сталь 35ХНЛ в різних середовищах протягом години. Величини зношування накладки збільшуються при збільшенні гальмівного моменту та зменшенні відсотка вологості. Що стосується зношування диска, то, навпаки, величини його зношування збільшуються зі зростанням відсотка вологості. Що для накладки, що для диска максимальне зношування їх поверхонь спостерігалось при випробуваннях в навколишньому середовищі.

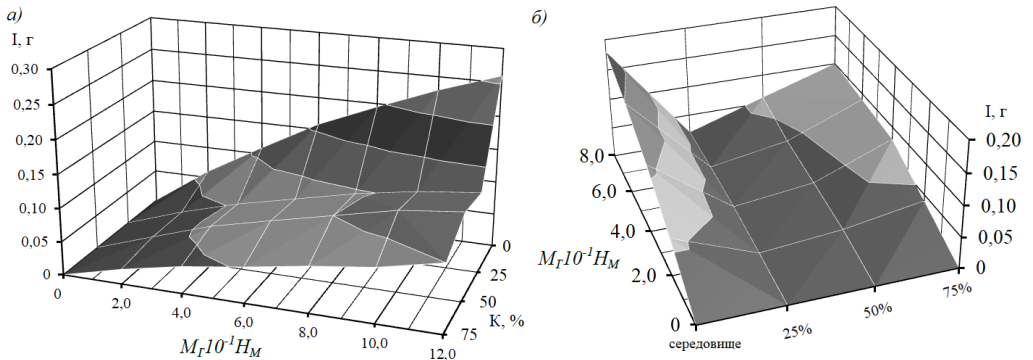


Рис. 4 а , б . Закономірності зміни зносу (I) накладки (а) і диска (б) у парі тертя «сталь 35ХНЛ - ФК-24А» в залежності від гальмівних моментів (M_T), що розвиваються, і інтенсивності охолодження в різному стані повітрям

Для виявлення ефективності примусового охолодження проведено порівняльний аналіз середніх значень моментів, що розвиваються парою тертя в середовищі води і повітря з відносною вологістю 25, 50 і 75% по відношенню до величин моментів, створюваних парою тертя, що охолоджується природно (табл. 1).

З табл. 1 випливає, що максимальне середнє значення відносин моментів тертя було за охолодженні пари тертя повітрям із відносною вологістю 25 і 75%, мінімальне - 50 %. При роботі пари тертя в повітряному середовищі з відносною

вологістю 50% спостерігалось відносне проковзування диска та колодочки внаслідок присутності окисної плівки на поверхні диска.

Таблиця 1

Величини моментів тертя та їх співвідношень під час роботи пари тертя ФК-24А-сталь 35ХНЛ у різних середовищах

Середовище	Значення M_T , $Nm \cdot 10^{-1}$		Відношення M_T у різних середовищах до M_T у повітрі		Середнє значення співвідношень	
	при питомих навантаженнях у парі тертя, МПа					
	1,0	1,3	1,0	1,3		
Повітря Вода	6,0	17,25	1,0	1,0	1,0	
	5,25	19,5	0,875	1,13	1,0025	
Відносна вологість повітря	25	7,5	21,75	1,26	1,26	1,255
	50	6,75	14,25	1,125	0,826	0,9755
	75	7,75	19,5	1,375	1,13	1,25025

При випробуваннях зразків на машині СМЦ-2 на повітрі та в камері протягом 6 годин при 300 хв^{-1} встановлено, що:

- в межах питомих навантажень $0,6 \dots 1,0$ МПа мали місце мінімальні значення моментів тертя при роботі диска та колодочки у середовищі повітря з відносною вологістю 75 %, які збільшувалися за його вологості 25 %;

- при питомих навантажень понад $1,5$ МПа мінімальні моменти тертя відмічені в середовищі повітря при відносній вологості 50 і 75%.

На рис. 5 наведена залежність вигляду $t_T = M(p)$, з якої випливає, що при числі обертів диска 300 хв^{-1} при збільшенні імпульсного питомого навантаження поверхнева температура пари тертя диск-накладка досягала 360°C , а при 500 хв^{-1} - 310°C . Другий режим випробувань при природному охолодженні інтенсивніше першого на 13,5%. У діапазоні температур $380-430^\circ\text{C}$ спостерігалось вигорання сполучного компонента полімерної накладки, що супроводжується характерним запахом, сталевий диск при цьому мав синюватий відтінок. У діапазоні питомих навантажень $0,5-1,55$ МПа мало місце зниження поверхневих температур поверхонь диска, що труться, і накладки в середньому на 27,0 % при їх роботі в повітряному середовищі з відносною вологістю 25 % порівняно з природним охолодженням.

За поточними значеннями моментів тертя в процесі випробування пари тертя ФК-24А - сталь 35ХНЛ визначили динамічний коефіцієнт тертя:

$$f = 2M_T / PD, \quad (1)$$

де M_T - реєстрований момент тертя; P - зусилля притискання колодочки до диска, що обертається; D - діаметр робочої поверхні диска.

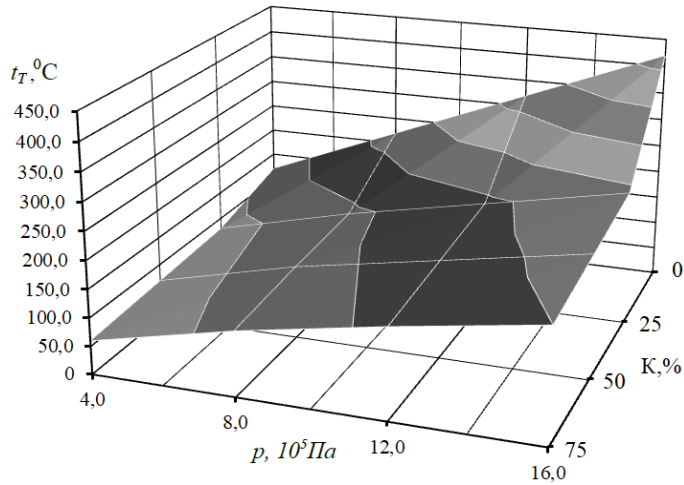


Рис. 5. Закономірності зміни поверхневої температури (t_T) накладки ФК-24А від імпульсних питомих навантажень (p) та інтенсивності охолодження повітрям у різному стані

Результати розрахунків динамічного коефіцієнта тертя представлені графічними залежностями на рис. 6.

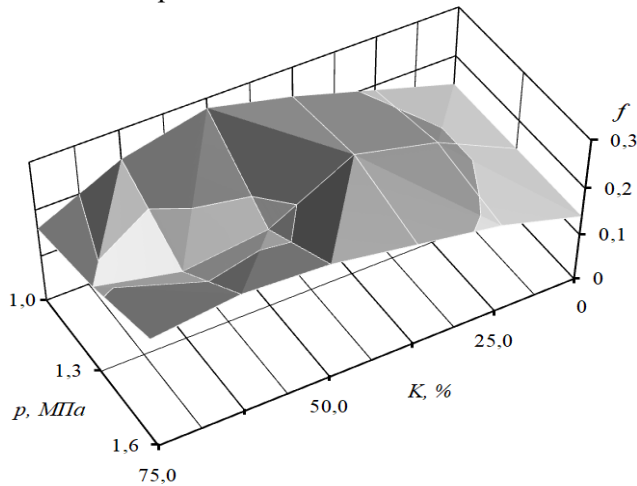


Рис. 6. Закономірності зміни динамічного коефіцієнта тертя (f) фрикційної пари «диск сталь 35ХНЛ – накладка ФК-24А» від відносної вологості повітря (K , %) та імпульсних питомих навантажень (p) при частоті обертання диска 300 хв^{-1}

Аналіз кривих показує, що при швидкості обертання диска 300 хв^{-1} зі збільшенням навантаження в парі тертя і зростанням відносної вологості повітря динамічний коефіцієнт тертя спочатку збільшується, досягає максимального значення при $K = 50\%$, а потім зменшується. Підвищення швидкості обертання диска до 500 хв^{-1} сприяло зменшенню динамічного коефіцієнта тертя у 2,06 рази.

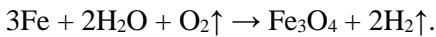
Результати випробувань пари тертя ФК-24А - сталь 35ХНЛ на машині тертя СМЦ-2 показали, що їхнє зношування зменшується, а фрикційні характеристики підвищуються в середовищі повітря з відотною вологістю 25%.

Випробування мокрих пар тертя дисково-колодкового гальма на стенді. У стендових умовах досліджували дисково-колодкове гальмо автомобіля

марки MAN моделі TGR 26.420. Випробувальний стенд обладнаний системою для змочування пар тертя дисково-колодкового гальма [6].

Випробування, виконані в середовищі повітря з різним вмістом водяної пари, показали значну зміну складу середовища поблизу зони тертя пари в результаті трибохімічних реакцій. Зі збільшенням відносної вологості повітря спостерігалось взаємопов'язане підвищення кількості водню, що виділяється. Водяна пара є вихідним компонентом трибохімічної реакції, водень – продуктом. Виділення водню - результат реакції взаємодії парів води з активованим металом диска.

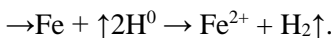
Порівняння статичних умов енергетичних характеристик реакцій показало, що енергія активації (E_A) реакції окислення заліза водою становить 56 кДж/моль [7] і значно менше енергії окислення вуглецю водою, для якої $E_A=146$ кДж/моль. При цьому хімічна реакція має вигляд:



Залежно від зовнішніх умов та складу середовища твердими продуктами такої реакції можуть бути і гідроксиди $\text{Fe}(\text{OH})_2$ та $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Однією із стадій гетерогенної реакції є адсорбція реагенту на поясі тертя диска. Між кількістю (g) адсорбованої речовини та її парціальним тиском (p) у газовій фазі існує пропорційна залежність, яка для поверхні з нерівномірним мікропрофілем виражається ізотермою Фрейндліха $a = k'p^{1/n}$ (де k' - коефіцієнт пропорційності). Зі збільшенням відносної вологості повітря парціальний тиск пари води підвищується, що призводить до збільшення трибосорбції води на утвореній у процесі тертя свіжої поверхні. В результаті збільшується кількість одиничних актів взаємодії води з активованим металом пояса тертя диска при зростанні швидкості виділення водню.

Утворення водню відбувається як у результаті безпосередньої хімічної взаємодії води з активованим металом, і у результаті дисоціації молекул води активних центрах пояса тертя. Атоми водню, що утворилися, моляризуються і виділяються в газову фазу у вигляді молекул. Хімізація процесу має вигляд:



Зниження парціального тиску кисню при підвищенні відносної вологості повітря зумовлює його трибоадсорбцію на поверхні тертя, внаслідок чого зменшується витрата O_2 . Внаслідок зменшення доступу кисню в зону тертя спостерігається уповільнення хімічних процесів з його участю, про що свідчить зменшення кількості оксиду, що утворився, і діоксиду вуглецю (рис. 7 а, б).

Збільшення об'єму виділеного метану (CH_4) у зв'язку з підвищенням відносної вологості середовища (рис. 8, б) є результатом збільшення парціального тиску водню, який виступає одним з компонентів трибохімічного синтезу CH_4 . У присутності водяної пари відбувається прискорення реакції взаємодії вуглецю з воднем [8].

В умовах електротермомеханічної фрикційної взаємодії матеріали пари тертя чутливі до присутності в повітрі водяної пари (рис. 9 а, б, в). При зростанні відносної вологості повітря відбувається зменшення величини моменту тертя та зношування полімерної накладки.

Взаємодія пояса тертя диска з парою води може відбуватися як електрохімічних і хімічних реакцій. Для реалізації електрохімічного процесу на поверхні тертя диска необхідно мати шар електроліту, в якості якого виступає

волога, що сконденсувалася. Конденсація парів води та розвиток електрохімічних реакцій призводить до посилення корозії пояса тертя та зниження знософрикційних властивостей пар тертя. Проведені дослідження [7, 8] показали, що, починаючи з поверхневої температури 333 К пояса тертя диска волога, що сконденсувалася на ньому, інтенсивно випаровується, цей процес найбільш інтенсивний при температурі 378 К.

Дослідження проводилися за високої об'ємної температури всередині камери $T=373$ К досить жорстких навантажувально-швидкісних режимах роботи вузла тертя.

Це дозволило досягти на поверхні тертя температур, що перевищують 500 К, що сприяло конденсації парів води та утворенню шару електроліту.

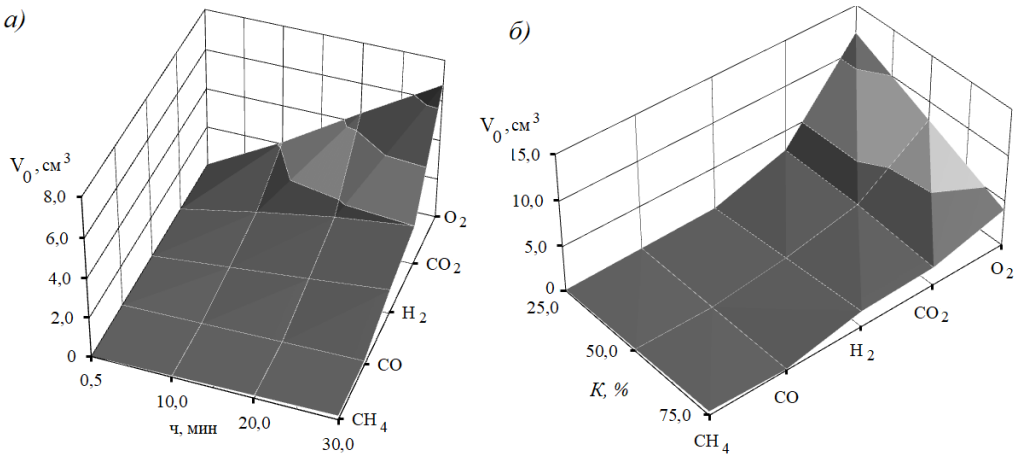


Рис. 7 а , б . Закономірності зміни об'ємної кількості газів, що виділяються у фрикційному вузлі при терті: а - залежно від часу при відносній вологості повітря 75%; б - від відносної вологості повітря, що змінюється в інтервалі $K = 25\text{-}75\%$

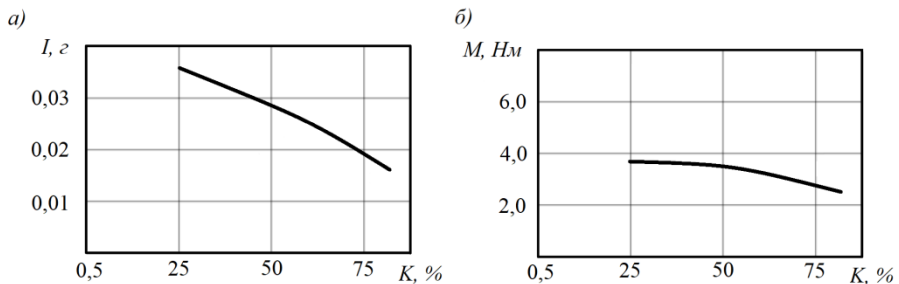


Рис. 8 а , б - Закономірності зміни: а - гальмівного моменту, що розвивається паром тертя; б – зносу робочої поверхні полімерної накладки залежно від відносної вологості повітря $K, \%$

Взаємодія металу пари тертя з водяними парами відбувається за механізмом газової та електрохімічної корозії.

Окислення поверхні тертя паром води відбувається або внаслідок взаємодії з киснем, що виділяється при дисоціації молекул води, або прямою реакцією. При терті у більшості випадків продуктами окиснення металів парами води за високої температури є оксиди [9]. Властивості утворених твердих продуктів реакції залежить від хімічної властивості газового середовища. Чим вище концентрація пари води і нижче парціальний тиск кисню в стаціонарних умовах високого температурного окиснення [10], тим більше вміст у твердих продуктах

взаємодії окисленого двовалентного заліза. Це пов'язано з нестачею кисню для повного перебігу хімічної реакції. Аналогічні залежності спостерігалися і за динамічному контакті поверхонь тертя.

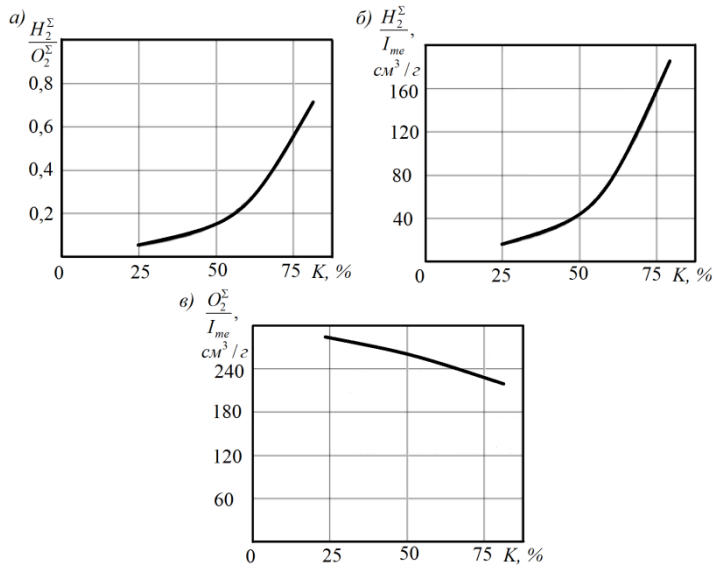
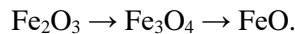


Рис. 9 а , б , в – Закономірності зміни складу трибохімічних компонентів (а - $H_2^{\Sigma} / O_2^{\Sigma}$; б - $H_2^{\Sigma} / I_{me}^{\Sigma}$; в - $O_2^{\Sigma} / I_{me}^{\Sigma}$), що виникають при електротермомеханічному терті, залежно від відносної вологості повітря К %

Аналіз співвідношень компонентів трибохімічних реакцій (рис. 9 а, б, в) показав, що з підвищенням відносної вологості повітря з 25 до 75% відношення об'єму кисню, витраченого на окислення металу (O_2^{Σ}), до величини зносу пар тертя (I_{me}^{Σ}) $O_2^{\Sigma} / I_{me}^{\Sigma}$ знижується, відповідно, з 265 $\text{см}^3/\text{г}$ до 196 $\text{см}^3/\text{г}$. Продуктами окислення сталі є сполуки із вмістом тривалентного (Fe_2O_3) і двовалентного (FeO) заліза, а також змішаного стехіометричного складу: Fe_2O_3 - 285 $\text{см}^3/\text{г}$, магнетиту (Fe_3O_4) і вюститу (FeO) - 180 $\text{см}^3/\text{г}$.

Отже, в умовах фрикційної взаємодії поверхонь з незначним вмістом у повітрі води ($k=25\%$) утворюються оксиди переважно тривалентного залізогематиту та частково магнетит. Зі зростанням відносної вологості повітря відбувається процес окислення заліза до двовалентного – від магнетиту до вюститу. Мастильна здатність оксидів заліза залежить від їхньої хімічної властивості і підвищується в ряді [13]:



Встановлено, що захисна плівка в присутності пари води утворюється швидше ніж чисто оксидний шар на повітрі [14-16], що має велике значення в процесі тертя, коли його регенерація відбувається за дуже короткий час.

Таким чином, при збільшенні відносної вологості повітря спостерігається зниження зносо-фрикційних властивостей пар тертя та їх регенераційна здатність, обумовлена присутністю парів води. Це сприяє зниженню гальмівного моменту.

Обговорення результатів досліджень. Обговорення результатів теоретичних та експериментальних досліджень у стендових умовах щодо встановлення впливу зрошення водою суцільних дисків у гальмах транспортних засобів проводимо з позицій нового підходу до термомікнетичних процесів. Результати теоретичних та експериментальних досліджень гарячих пар тертя в умовах їх змочування дозволили встановити:

- структуру трибологічних систем металополімерних пар тертя, у яких враховано попадання води з їхньої поверхні; при цьому приділено увагу крекінг-процесу при досягненні поверхнею полімерної накладки допустимої температури:

- триботехнічні властивості пари тертя в умовах змочування водою та омивання повітряним середовищем з різним вмістом у ній вологи пов'язані зі зміною характеру, інтенсивності трибологічних реакцій та складу компонентів взаємодії. Збільшення відносної вологості повітря веде до інтенсифікації трибоокислення поверхонь поясів тертя диска парами води, про що свідчить збільшення величини відношення H_2^Σ / I_{me} (де H_2^Σ - сумарна кількість водню, що виділився, I_{me} - знос пояса тертя диска);

- при однакових умовах трибоконтакту зі зростанням вмісту в омиваючому середовищі парів води на поверхнях тертя збільшується товщина шару утворених компонентів взаємодії, що сприяє зменшенню зносу поверхонь, що труться. Збільшення в омиваючому повітрі парціального тиску парів води призводить до нестачі кисню і зниження повноти окислення з утворенням на контактуючих поверхнях оксидів двовалентного заліза. При підвищенні відносної вологості повітря (з 25 до 75%) спостерігається збільшення зносостійкості пари тертя в 2,5 рази і зменшення гальмівного моменту.

Висновок. Результати проведених випробувань мокрих пар тертя в лабораторних (на машині тертя та зношування моделі СМЦ-2) та експлуатаційних (на вантажному транспортному засобі марки MAN моделі TGA 26.420) дозволили встановити їм запропонувати таке:

- зі збільшенням вологості повітря, що омиває пару тертя, її момент тертя та поверхнева температура знижуються в середньому на 25-40%;

- зі збільшенням швидкості руху транспортного засобу кількість води, що потрапляє на зовнішню поверхню гальмівного диска, зростає швидше, ніж на внутрішню. На диски гальм заднього моста попадає води до 60% менше, ніж передньої осі;

- зі збільшенням відносної вологості повітря внаслідок зниження гальмівного моменту збільшується гальмівний шлях, щоб уникнути чого необхідно на поверхні тертя створювати великі питомі навантаження;

- зменшення кількості води, що потрапляє на поверхні дисків, можна досягти: застосуванням захисних кожухів; виконанням отворів та канавок різного профілю, конфігурації та розташування; нанесенням супергідрофобних покриттів на поверхні дисків з використанням нанотехнологій та ін.

Список літератури

1. Malinovskyi, Y., Mikosianchuk, O., Uchytel, O., Skvortsov, O., Vlasenkov, D., Sytnyk, S., & Oliinyk, S. (2025). Dynamic processes in surface layers of parts as a source

of their multicycle failure under friction and wear. *Problems of Tribology*, 30(3/117), 41–48. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-117-3-41-48>.

2. Uetz H. Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf den Gleitverschleiß metallischer Werkstoffe // *Verstoffe und Korrosion*. - 1968. - Heft 8. - S. 665-676.

3. Мадаминов Б.А. Исследование влияния влажности воздуха на степень наводо-ржавивания стали У8 при трении и ее износ / Б.А. Мадаминов, А.В. Сахаров // Тезисы докладов В НТК «Влияние среды на взаимодействие твердых тел при трении». - Днепропетровск, 1981. - С. 144-145.

4. Morstein, C.E., Klemenz, A., Dienwiebel, M. et al. Humidity-dependent lubrication of highly loaded contacts by graphite and a structural transition to turbostratic carbon. *Nat Commun* 13, 5958 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33481-9>.

5. Дедков А.К. Влияние влагосодержания атмосферы на фрикционно- износные характеристики пар трения // *Известия вузов: Машиностроение*. - 1975. - № 1. - С. 65-69.

6. Mitshke Manfred, Braun Horst, Das Verhalten von Scheibenremsen bei Nass. “*Dtsch. Kraftfahrtforsch. und Strassen- verkehrstechn*”, 1970, №240, 31 s.

7. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. - Киев: Техника, 1970. - 395 с.

8. Хайнике Г. Трибохимия. - М.: Мир. 1987. - 584 с.

9. Шевеля В.В. Трибохимия и реология износостойкости / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко. - Хмельницкий: ХНУ, 2006. - 278 с.

10. Олександренко В.П. Влияние влажности воздуха на триботехнические характеристики пары трения / В.П. Олександренко // *Проблемы трения и изнашивания: научн. техн. сб. К.: НАУ. 2009. Вып. 51. - С. 77-85.*

11. Тейбор Д. Трение как диссипативный процесс // *Трение и износ*. - 1994. - Т. 15, №2. - С. 296-315.

12. Трибология: трение, износ и смазка / А.Х. Джанахмедов, А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко [и др.] // Баку: «Апострофф-А», 2019. - 640 с.

13. Влияние влаги на триботехнические параметры фрикционных узлов тормозных устройств и ее удаление с их поверхности трения / М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко, Я.Б. Сторож [и др.] // *Проблемы трения и изнашивания: научн.-техн. сб. К.: НАУ, 2010. Вып. 54. - С.95-105.*

15. Kindrachuk M.V. Polymeric Materials Modified by Semiconductor Substances in Friction Units of Braking Devices / Kindrachuk M.V., Volchenko O.I., Volchenko D.O., Volchenko N. O., Polyakov P. O., Kornienko A.O., Yurchuk A.O. // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. - Vol. 11. №3, 2019. - P. 03014-1 - 03014- 8.

16. Kindrachuk M. Polymeres with enhanced energy capacity modified by semiconductor materials / M. Kindrachuk, A. Volchenko, D. Volchenko, O. Tisov, A. Kornienko / *Functional Materials*, 2019.

17. Volchenko N.A. Electrochemistry with double electrical layers in frictional interaction metal-polymer tribolink / Volchenko, N.A., Krasin, P.S., Volchenko, D.A., Voznyi, A.V. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2025

Семеній Олександр Михайлович – аспірант кафедри будівельних та дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, <https://orcid.org/0009-0004-2464-6508> .

O. M. SEMENIY

PERFORMANCE OF FRICTION PAIRS OF DISC-SHOE BRAKES (IN A WET ENVIRONMENT)

This article examines the effects of water wetting on matte and polished brake disc surfaces when vehicles are moving on wet roads.

Thermokinetic processes occurring in water and humid air surrounding the friction pairs of a disc-and-pad brake, consisting of a disc and a pad, were studied using an SMC-2 friction and wear machine. Patterns of changes in the operating parameters (dynamic friction coefficient, braking torque, and wear) of the pad were established as the disc rotates at 300 min⁻¹ under specific loads of 1.0 and 1.3 MPa and surface temperatures up to 400°C. An analysis of the intensity of changes in the above operating parameters is provided.

The polished and matte surfaces of brake discs, with hot and cold zones, have different areas. Water in these areas exists in both liquid and gaseous states. All of this facilitates electrochemical and chemical reactions on the surface of the disc friction zone. Moisture condensed on the disc friction zone acts as an electrolyte, reducing the wear and friction properties of friction pairs and forming corrosion pits at the interfaces between polished and matte disc surfaces. A mathematical description was developed for full-scale testing of a MAN TGA 26.430 disc-shoe brake on a vehicle under variable thermodynamic parameters of the friction pair's cleaning medium.

Oxygen and hydrogen, released during the decomposition of water during the reactions, promote oxidative processes on the disc friction zone and intensify hydrogen-induced wear on its surface.

Keywords: vehicle, disc-shoe brake, friction pairs, disc surfaces, wettability

References

1. Malinovskyi, Y., Mikosianchuk, O., Uchytel, O., Skvortsov, O., Vlasenkov, D., Sytnyk, S., & Oliinyk, S. (2025). Dynamic processes in surface layers of parts as a source of their multicycle failure under friction and wear. *Problems of Tribology*, 30(3/117), 41–48. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-117-3-41-48>.
2. Uetz N. Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf den Gleitverschleiß metallischer Werkstoffe // *Verstoffe und Korrosion*. - 1968. - Heft 8. - S. 665-676.
3. Madaminov B.A. Issledovanie vliyaniya vlazhnosti vozduha na stepen navodorazhivaniya stali U8 pri trenii i ee iznos / B.A. Madaminov, A.V. Saharov // *Tezisy dokladov V NTK «Vliyanie sredy na vzaimo-dejstvie tverdyh tel pri trenii»*. - Dnepropetrovsk, 1981. - S. 144-145.
4. Morstein, C.E., Klemenz, A., Dienwiebel, M. et al. Humidity-dependent lubrication of highly loaded contacts by graphite and a structural transition to turbostratic carbon. *Nat Commun* 13, 5958 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33481-9>.
5. Dedkov A.K. Vliyanie vlagosoderzhaniya atmosfery na frikcionno-iznosnye harakteristiki par treniya // *Izvestiya vuzov: Mashinostroyeniye*. - 1975. - № 1. - S. 65-69.
6. Mitshke Manfred, Braun Horst, *Das Verhalten von Scheibenremsen bei Nass. "Dtsch. Kraftfahrtforsch. und Strassen-verkehrstechn"*, 1970, №240, 31 s.
7. Kosteckij B.I. *Trenie, smazka i iznos v mashinah*. - Kiev: Tekhnika, 1970. - 395 s.
8. Hajnike G. *Tribohimiya*. - M.: Mir. 1987. - 584 s.
9. Shevelya V.V. *Tribohimiya i reologiya iznosostojkosti* / V.V. Shevelya, V.P. Oleksandrenko. - Hmel'nickij: HNU, 2006. - 278 s.
10. Oleksandrenko V.P. *Vliyanie vlazhnosti vozduha na tribotekhnicheskie harakteristiki pary*

treniya / V.P. Oleksandrenko // Problemy treniya i iznashivaniya: nauchn. tekhn. sb. K.: NAU. 2009. Vyp. 51. - S. 77-85.

11. Tejbor D. Trenie kak dissipativnyj process // Trenie i iznos. - 1994. - T. 15, №2. - S. 296-315

12. Tribologiya: trenie, iznos i smazka / A.Kh. Janahmadov, A.I. Volchenko, N.A. Volchenko [i dr.] // Baku: «Apostroff-A», 2019. - 640 s.

13. Vliyanie vlagi na tribotekhnicheskie parametry frikcionnyh uzlov tormoznyh ustrojstv i ee udalenie s ih poverhnosti treniya / M.V. Kindrachuk, D.A. Vol'chenko, Ya.B. Storozh [i dr.] // Problemy treniya i iznashivaniya: nauchn.-tekhn. sb. K.: NAU, 2010. Vyp. 54. - S.95-105.

14. Kindrachuk M.V. Polymeric Materials Modified by Semiconductor Substances in Friction Units of Braking Devices / Kindrachuk M.V., Volchenko O.I., Volchenko D.O., Volchenko N. O., Polyakov P. O., Kornienko A.O., Yurchuk A.O. // Journal of Nano- and Electronic Physics. - Vol. 11. №3, 2019. - P. 03014-1 - 03014- 8.

15. Kindrachuk M. Polymeres with enhanced energy capacity modified by semiconductor materials / M. Kindrachuk, A. Volchenko, D. Volchenko, O. Tisov, A. Kornienko / Functional Materials, 2019.

16. Volchenko N.A. Electrochemistry with double electrical layers in frictional interaction metal-polymer tribolink / Volchenko, N.A., Krasin, P.S., Volchenko, D.A., Voznyi, A.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018.

Semeniy Oleksandr Mykhailovych - graduate student of the Department of Construction and Road Machinery, Kharkiv National Automobile and Road University, str. Yaroslav the Wise, 25, Kharkiv, 61002, <https://orcid.org/0009-0004-2464-6508>