

УДК 625. 08

DOI: 10.18372/0370-2197.2(91).15528

Д. О. ВОЛЬЧЕНКО¹, М. В. КІНДРАЧУК², В. С. СКРИПНИК¹,
Д. Ю. ЖУРАВЛІОВ¹, М. М. РОМАНІВ¹

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

²Національний авіаційний університет, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДНЕВОГО ЗНОСУ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ МЕТАЛЕВИХ ФРИКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЛЬМ

В матеріалах статті розглянуті наступні питання стосовно до розв'язуваної проблеми: побудова кристалічних ґраток металів і їх параметри; оцінка стану атомів в кристалічній решітці металу з позицій молекулярної динаміки; напружено-деформований стан гальмівних дисків і осередки водневого зношування їх робочих поверхонь. При дослідженні металевого фрикційного елемента прийнята модель багатошарової атомної побудови у вигляді сільфона, який під дією імпульсних питомих навантажень стискає свої гофри. При знятті імпульсних питомих навантажень відбувається розширення багатошарової атомної структури за рахунок внутрішніх сил пружності. Встановлено невідоме раніше явище утворення насиченої воднем зон в приповерхневому шарі металевого елемента тертя (обода, диска) гальмівного пристрою, що містить в своєму тілі «внутрішній» водень, який циркулює між шарами атомів кристалічних ґраток, що полягає в тому, що при електротермомеханічному терті у водневомістному середовищі відбувається виділення «зовнішнього» водню під тиском при цьому за рахунок імпульсних питомих навантажень, поверхневих температур і їх змінних градієнтів в зонах тертя. Темп протікання процесу стиснення в сотні разів більше темпу протікання процесу розширення багатошарової атомної структури. Під дією імпульсних питомих навантажень виникає великий позитивний градієнт температури спалаху, який в приповерхневому шарі металевого фрикційного елемента перетворюється на негативний градієнт поверхнево-об'ємної температури. При цьому підвищується тиск закачуваного водню, який посилюється за рахунок імпульсних питомих навантажень, стискаючи багатошарову атомну структуру.

Ключові слова: гальмівні пристрої, пари тертя, металевий фрикційний елемент, кристалічна решітка, атоми, поверхневі та об'ємні температури, підповерхневий шар.

Вступ. В результаті кооперативної (синергетичної) взаємодії поверхневих процесів, явищ і ефектів: екзоємісії, адгезії, адсорбції і дифузії, трибодеструкції, виділяється водень. Джерелом для водню є вологе повітря, яке омиває пари тертя гальма при русі транспортних засобів, а також вода, яка потрапляє на робочі поверхні їх фрикційних вузлів. Збільшує кількість зовнішнього водню крекінг-процес поверхневого шару полімерної накладки спільно з нерівноважними процесами, що протікають при деформації, які носять характер трансляційно-ротаційних вихорів плям контактів мікровиступів металевого фрикційного елемента. На поверхневому і приповерхневому шарі металу, виникають температурні градієнти, електричні і напружено-деформовані поля. Це призводить до дифузії водню в метал, концентрації його в приповерхневому шарі і прискореного зносу або руйнування цього шару.

Стан проблеми. Різноманітні структури вуглецевих і легованих сталей призводить до того, що при однаковому типі кристалічної ґратки різні марки сталей

по різному реагують на фрикційну взаємодію, мають неоднакові характеристики зносостійкості. Крім того, хіміко-термічна і термохімічна обробка також значно впливає на структуру і триботехнічні властивості поверхневого і приповерхневого шарів, які є акумулятором водню в їх об'ємі.

Зношуванню субшорсткості поверхонь тертя у середовищі, яке містить водень, присвячені роботи [1, 2]. В останніх водень закачується в приповерхневий шар металевого тіла і взаємодіє з його кристалічною ґраткою. Відмічено, що рушійною силою в процесах водневого зношування є температура, тиск, деформація, структура і дефекти кристалічної решітки.

У роботах [3 - 6] розглянуто взаємодію водню з металами і неметалевими елементами. Ілюструється вплив водню на різні властивості металів і сплавів і на виникнення в них специфічних дефектів. Розширено відомості про водневу крихкість і вплив водню на механічні характеристики в парі «водень - метал» в групах періодичної системи Д. Менделєєва.

В роботі [7] встановлено зв'язок між схоплюванням металів при терті і кристалічній будові металів. Показано, що пара металів, яка має об'ємно-гранецентровану кубічну (ОЦК і ГЦК) ґратки, інтенсивно зношується за рахунок схоплювання. Пари тертя з металів, що мають гексагональну щільноупаковану (ГПУ) ґратку, зношуються значно менше, ніж з ГЦК або ОЦК ґратками. Велика відмінність в інтенсивності зношування металів з різними типами ґраток пояснюється можливостями виникнення і розвитку водневого зношування.

В роботі [6] встановлено, що при важких режимах тертя максимальна температура утворюється на деякій глибині від поверхні тертя. Це створює умови, при яких водень, якщо він буде адсорбований на поверхні деталі, під дією температурного градієнта дифундує в глиб поверхні, там концентрується, викликає окрихчування поверхневих шарів і підсилює зношування. Однак, не було вказано, що відбувається в приповерхневому шарі металевого елемента зі структурами його кристалічних ґраток.

Становлення моделювання, пов'язане з появою «комп'ютерних технологій», вдосконалення і збільшення швидкодії яких дозволяє збільшити розміри модельного кристала і кількість ітерацій розрахункового процесу, тим самим розширити коло визначених параметрів.

Спроби найбільш достовірно реалізувати міжатомні взаємодії в кристалічній ґратці металу в комп'ютерному експерименті стикаються з наступними проблемами: яка швидкість рахунку; наскільки швидко виконується за допомогою комп'ютерного експерименту і її похибка; наскільки точно описує потенціал реальні міжатомні взаємодії і рухи внутрішнього водню в системі кристалічних ґраток тіла; наочність і різноманітність візуалізаторів структури.

Розробка математичного і чисельного апарату, в основу якого закладені уявлення про багаточасткові системи і симетрії кристалічної решітки в металах, вимагають наявності банку даних про поведінку в ній кулястих атомів.

Постановка завдання. У даній публікації розглянуті наступні питання стосовно до розв'язуваної проблеми: побудова кристалічних ґраток металів і їх параметри; прогнозування водневого зношування бігових доріжок тертя дисково-коловодкових гальм транспортних засобів.

Мета роботи - дослідити кристалічну структуру металевого фрикційного елемента гальма з урахуванням водневого зношування його робочої поверхні.

Побудова кристалічних решіток металів і їх параметри. Майже 80% всіх елементів в табл. Д. І. Менделєєва є металами. В силу ненасиченості і ненаправленості металевого зв'язку атом прагне оточити себе якомога більшою кількістю сусідів, тому кристалічні ґратки металів мають високу симетрію, велике координаційне число й компактність упаковки. Більше 80% усіх металів мають ґратки типу гранецентрована кубічна (ГЦК) і гексагонально щільноупакована (ГПУ) або об'ємно-центрована кубічна (ОЦК). Багатьом металам властивий поліморфізм – при якому змінюється тип кристалічної ґратки поверхнево-об'ємною температурою і імпульсними навантаженнями, що діють на металевий фрикційний елемент гальмівного пристрою.

На рис.1 наведена схема побудови структури кристалічних ґраток металів.

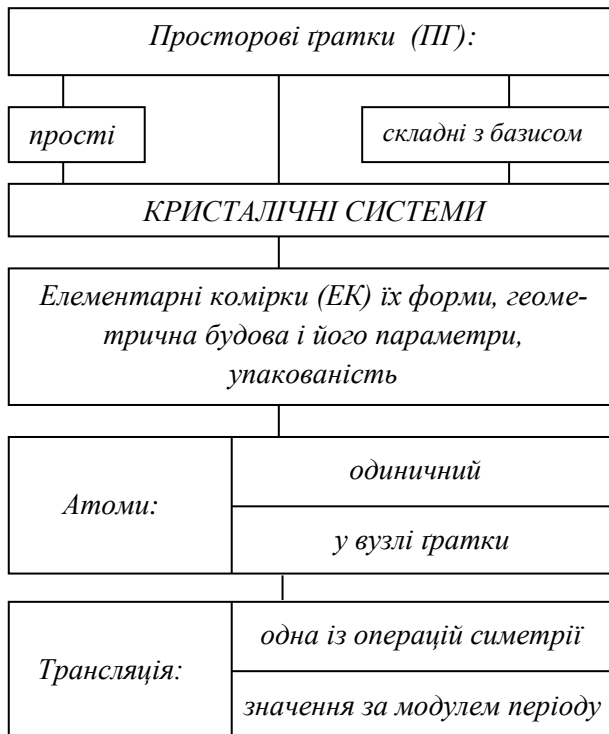


Рис. 1. Схема побудови структури кристалічних ґраток

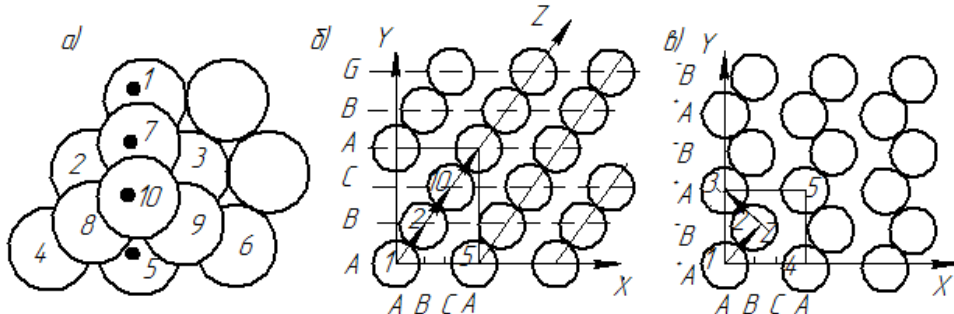


Рис. 2. Упаковка атомів (а) в кристалічній ґратці і їх розташування у тривимірному (б) і двовимірному (в) просторі

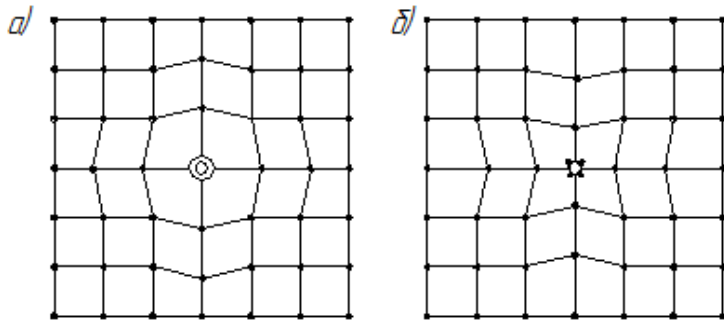


Рис. 3. Спотворення кристалічної ґратки при електротермомеханічному терті:
a – розтяг; *b* – стиск

Координаційне число (КЧ) для ГЦК-ґратки $z = 12$: кожен атом має 6 найближчих сусідів у своєму шарі і по 3 – в вище-і нижчих шарах. На елементарну комірку припадає $n = 4$ атома, тому коефіцієнт компактності

$$k = \frac{n \cdot \frac{4}{3} \pi R^3}{a^3} = \frac{4 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\alpha \sqrt{2}}{4} \right)^3}{a^3} = 0,740 (74\%)$$

Ці значення z і k є максимально можливими для ґраток простих речовин.

Найкоротша міжатомна відстань - (вздовж діагоналей граней куба), тому радіус атома дорівнює $R = a\sqrt{2}/4$. Площина (по осі y) в ГЦК - структурі є щільноупакованою (ЩУ) - атоми в ній укладені у вузлах.

Між кулястими атомами в шарі є трикутні лунки двох типів: вістрям вниз (тип В) і вгору (тип С); літерою А позначимо центри атомів (рис. 2). Щоб другий ЩУ шар щільно прилягав до першого, його атоми повинні лежати в лунках першого шару: атом 7 лежить в лунці типу В, утвореної атомами 1, 2 і 3, і точно так само укладені атоми 8 і 9. Третій шар (атом 10) лежить в точно таких же лунках другого шару, що знаходяться над лунками типу С першого шару атомів. Четвертий ЩУ шар виявиться розташованим точно над першим, тобто буде проектуватися в позицію А. Період укладання складається з трьох площин: АВС АВС АВС ... Кожен наступний щільноупакований шар (площини осі y) в ГЦК-ґратці зсунутий відносно попереднього на один і той же вектор $1/2 a$ (площини осі z) або $1/6 a$ (площини осі x) в проекції на площину осі y .

При щільному приляганні шарів один до одного між їх параметрами (довжиною ребра основи a й висотою c) має дотримуватися співвідношення $c/a = (8/3)^{1/2} = 1,633$. В цьому випадку координаційне число z і компактність упаковки k для ГПУ - структури будуть такими ж, як для ГЦК. Але в дійсності ні для одного металу відношення c/a не дорівнює ідеальному: у Zn і Cd ґратка «розтягнута» уздовж осі c ($c/a = 1,86$ і $1,89$, відповідно), а інших ГПУ-металів - «стиснута» z ($c/a = 1,57 - 1,62$) (рис. 3).

Якщо дотримуватися моделі твердих шарів, то в першому випадку шари залишаються відсунуті один від одного, а в другому - атоми сусідніх шарів один одного доторкаються, але в самому шарі між атомами з'являється зазор, і тому все реальні ГПУ-структури не є істинно ЩУ-ми. Насправді ж відмінність означає, що атоми в ГПУ-металах мають форми не куль, а еліпсоїдів (стислі кулі

атомів із співвідношенням в площинах $1,633 < \frac{c_r}{\partial_e} > 1,633$ [7].

Можливі й інші, більш складні закони почерговості шарів в щільноупакованих ґратках. Наприклад, для багатьох лантаноїдів характерна чотиришарова структура: ABCB, ABCB ... (зрушення чергуються по два: «+ + - -»). Зустрічаються структури з семи-, дев'яти- і навіть вісімнадцятишаровим укладанням.

Прогнозування водневого зношування бігових доріжок тертя дисково-колодкових гальм транспортних засобів. Водневий знос бігових доріжок тертя дисково-колодкових гальм пов'язаний із зовнішніми експлуатаційними параметрами, якими є: імпульсні питомі навантаження, температура спалаху, поверхнево-об'ємна температура і еквівалентне напруження першого роду (механічне + теплове). Параметри структури металевго фрикційного елемента залежать від: типу конструкції кристалічної решітки, кількості атомних шарів, поверхнево-об'ємної температури приповерхневого шару, напруження другого роду (макроскопічні зональні напруження, що охоплюють цілий металевий фрикційний елемент), напруження третього роду (субмікроскопічні, що відносяться до спотворень атомів в шарах твердого тіла).

Уявімо багатшарову атомну систему твердого тіла у вигляді сільфона.

У чому ж полягає сільфонний ефект стосовно до металевго фрикційного елемента різних видів гальмівних пристроїв. Сільфон – тонкостінна об'ємно-металева) циліндрична оболонка з поперечною гофрованою бічною поверхнею: розширюється або стискається вздовж осі (подібно пружині) під дією різниці тиску всередині і зовні або від зовнішнього впливу. Застосовується в пневмоавтоматиці як чутливий орган [10].

Під дією імпульсних питомих навантажень виникає великий позитивний градієнт температури спалаху, який в приповерхневому шарі металевго фрикційного елемента перетворюється на негативний градієнт поверхнево-об'ємної температури. При цьому підвищується тиск закачуваного водню, який посилюється за рахунок імпульсних питомих навантажень, стискаючи багатшарову атомну структуру. При знятті імпульсних питомих навантажень відбувається розширення багатшарової атомної структури за рахунок внутрішніх сил пружності. Темп протікання процесу стиснення в сотні разів більше темпу протікання процесу розширення багатшарової атомної структури. Що стосується хаотичного руху водню між окремими атомами і їх шарами то його можна привести до поздовжнього і поперечного руху.

Розрізняють декілька видів водневої крихкості першого і другого роду. Окрихлення першого роду обумовлене джерелами, які є у вихідному металі внаслідок підвищеного вмісту внутрішнього водню. Окрихлення другого роду, обумовлене джерелами, які акумулюють в поверхневий шар металу зовнішній водень. Встановлено, що окрихлення першого роду є зворотнім і посилюється з підвищенням швидкості деформації; другого роду - при малих швидкостях деформацій і може бути як зворотнім, так і незворотнім [11,13].

Теорію водневої крихкості можна розділити на чотири групи.

1. Адсорбційні гіпотези, що пояснюють зниження руйнівного напруження внаслідок зменшення поверхневої енергії всередині тріщин при адсорбції водню (водень діє як поверхнево - активна речовина).

2. Дифузійні гіпотези:

- на робочих поверхнях пари тертя «метал - полімер» відбувається аномальна дифузія - клас явищ, в яких середній квадрат зсувів не є лінійною функцією від часу, а описується ступеневим законом.

Етапи водневого зносу наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Етапи водневого зносу робочих поверхонь металевого фрикційного елемента гальма при електротермомеханічному терті

Етапи	Процеси, явища і ефекти, які виникають при дії	
	імпульсних навантажень в парах тертя гальма	та їх наслідків
1	Інтенсивне виділення водню в зоні тертя з вологи під дією імпульсних питомих навантажень	Сприяло триботехнічним реакціям за рахунок температур спалаху
2	Десорбція води з поверхні пояса тертя диска	
3	Адсорбція водню робочою поверхнею пояса тертя диска	Сприяло адсорбції за рахунок підвищення циклічної енергонавантажності пояса тертя диска
4	Дифузія водню в приповерхневі шари пояса тертя диска пари тертя, швидкість якої визначається градієнтами: негативними температурами і позитивними еквівалентними напруженнями	Викликало градієнти температури і механо-температурних напружень
5	Концентрація водню в приповерхневому шарі в зоні максимальної поверхнево-об'ємної температури	Сприяло виникненню в приповерхневому шарі від'ємних градієнтів температури
6	а) Низькотемпературне крихке руйнування по-поверхневого шару пояса тертя диска, насиченого воднем, в результаті утворення великої кількості мікротріщин в зоні контакту.	Викликало позитивні градієнти напружень і молізацію водню
	б) Високотемпературне в'язке руйнування тертьового металу у вигляді намашування на контртіло в результаті зрідження поверхневого шару	Перенасичення воднем поверхні пояса тертя диска при коливаннях температури спалаху нагрівання близько 800 ... 1000 °С

Така дифузія може бути двох типів - супердифузія (прискорене блукання) і субдифузія (уповільнене блукання).

Комп'ютерна модель агрегації, обмеженою дифузією є поле, заповнене частинками, які здійснюють хаотичний броунівський рух. На поле вноситься центр агрегації, до якого «прилипає» всяка випадково доторкнута частинка; починається ріст конгломерату частинок - фрактального кластеру. Найчастіше в моделюванні використовується тільки одна рушійна частинка.

3. Теорія тиску молекулярного водню, згідно з якою окрихлення є результатом градієнта тиску молекулярного водню в макро- і мікропорожнечах, а також в три-

щинах всередині металу. Тиск виникає в результаті молізації атомарного водню.

4. Теорія взаємодії внутрішнього водню з кристалічною решіткою металу; водень є різновидом дефекту, понижуючого міцність когезійного металевго зв'язку.

5. Теорії, засновані на взаємодії водню з дислокаціями; водень проводить блокуючу дію на дислокації, сприяючи виникненню в парах тертя блокуючих контактів.

Виявлення механізму водневого зношування металевих фрикційних елементів різних видів гальмівних пристроїв дозволяє формулювати основні способи захисту від трибонаводнювання. Гальмування процесу проникнення водню може здійснюватися покриттям активних ділянок поверхні шаром нейтральних молекул. Ефективним способом захисту від водневого зносу є введення до складу композиційних матеріалів оксиду міді, що призводить в результаті взаємодії його з воднем до утворення мідної плівки, що є бар'єром для проникнення водню; створення електромагнітного поля за рахунок кріплення мідних пластин до перпендикулярно розташованих бічних поверхонь фрикційних накладок по відношенню до бігової доріжки тертя металевго елемента.

Висновки. Встановлено невідоме раніше явище утворення насиченої воднем зон в приповерхневому шарі металевго елемента тертя (обода, диска) гальмівного пристрою, що містить в своєму тілі «внутрішній» водень, який циркулює між шарами атомів кристалічних ґраток, що полягає в тому, що при електротермомеханічному терті у водневомістному середовищі відбувається виділення «зовнішнього» водню під тиском при цьому за рахунок імпульсних питомих навантажень, поверхневих температур і їх змінних градієнтів в зонах тертя.

Відбуваються механічні та теплові деформації елементарних комірок, що мають форму, геометричну будову і параметри з певними їх співвідношеннями, коефіцієнтами упакованості атомами, що забезпечують компактність кристалічної ґратки і при цьому її атомні шари, піддані стисканню і розтягу, сприяють змішуванню поперечних і поздовжніх потоків рухомого зовнішнього і внутрішнього водню в приповерхневому шарі металевго фрикційного елемента, викликаючи локальне окрихлення і руйнування його поверхонь.

Список літератури

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника. Водородное изнашивание деталей машин / Д. Н. Гаркунов, Г. И. Суранов, Ю. А. Хрусталеv // Из-во УГТУ. Ухта, 2007. – 260 с.
2. Гаркунов Д. Н. О способе повышения долговечности колесных и тормозных пар [Текст] / Д. Н. Гаркунов, Г. И. Сураигов // Эффект безизносности и триботехнологии. – 1998. – №1. – С. 32 – 36.
3. Галактионова Н. А. Водород в металлах / Н. А. Галактионова // М.: Из-во «Металлургия». – 1967. – 303 с.
4. Влияние водовода на износостойкость материалов в парах трения тормозных устройств / М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко [и др.] // Физ.-хим. механика материалов. – 2017. – 53. №2. – С. 135–141.
5. Диплом № 482 на научное открытие «Явление массопереноса продуктов трения в металлополимерных парах» от 27.02.2015 г. авторов А. Х. Джанахмедова, А. И. Вольченко, Э. А. Джанахмедова и др. - М.: Международ. акад. авторов научн. откр. и изобрет. – Экспертиза заявки на открытие №А-618 от 18.12.2014 г.
6. Научное открытие [Диплом №378] [Текст] / А. А. Поляков Д. Н. Гаркунов, Г. П. Шпеньков, В. Я. Матюшенко // Явление образования насыщенной водородом зоны в подповерхностном слое металлов при трении (явление водородного изнашивания металлов) // Открытия, изобретения. – 1990. – №30.
7. Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров/ Ю.К. Машков// Омск: Изд-

во ОмГТУ, 2013. – 240с.

8. Электротермомеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть III) / А.Х. Джанахмедов, Э.С. Пирвердиев, Н.А. Вольченко [и др.] // Вестник Азербайджанской инженерной академии. №1, 2016. – С. 27 – 51.

9. Дисково-колодочные тормозные устройства: теория, расчет и конструирование (часть I) / А.Х. Джанахмедов, А.И. Вольченко, Э.С. Пирвердиев [и др.] // Вестник Азербайджанской инженерной академии. №1, 2017. – С. 15 – 31.

10. Мышкин Н.К. Трибология полимеров: трение, изнашивание, адгезия и фрикционный перенос (обзор) (Н.К.Мышкин, М.И.Петроковец, А.В. Ковалев // Трение и износ. 2006. –Т.17, № 4. – С. 429-436.

11. Briscoe B.J.; Fiori L., Pellino E. Nano-indentation of polymeric surfaces // J. Phys. D: Applied Phys. – 1998 (31), 2395-2405.

12. Shulga H., Kovaiev A., Myshkin N., Tsukruk V.V. Some aspects of AFM nanomechanical probing of surface polymer films // European Polymer J – 2004 (40), 949-956.

13. Kramer I.R., Demer L. J. // Progr. Mater. Science, – 1961. –V.9. – P. 131-199.

Стаття надійшла до редакції 31.05.2021.

Вольченко Дмитро Олександрович – докт. техн. наук, професор кафедри видобування нафти і газу Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-373-82-42, E-mail: divo99@ukr.net.

Кіндрачук Мирослав Васильович – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства, Київський національний авіацій університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: nau12@ukr.net

Скрипник Василь Степанович – докт. техн. наук, професор кафедри автомобільного транспорту Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-950-04-18, E-mail: divo99@ukr.net

Журавльов Дмитро Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри технічної механіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-950-04-18, E-mail: dmytro.2103@ukr.net

Романів Микола Миколайович – аспірант кафедри комп'ютеризованого машинобудування Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-233-08-48, E-mail: romaniv2809@ukr.net

D. O. VOLCHENKO, M. V. KINDRACHUK, V. S. SKRYPNYK, D. Yu. ZHURAVLEV, M. M. ROMANIV

INVESTIGATION OF HYDROGEN WEARING OF HEAVY LOADED METAL FRICTION ELEMENTS BRAKES

The materials of the article consider the following issues in relation to the problem to be solved: construction of crystal lattices of metals and their parameters; assessment of the state of atoms in the crystal lattice of metal from the standpoint of molecular dynamics; stress-strain state of brake discs and hydrogen wear cells of their working surfaces. In the study of the metal friction element, a model of a multilayer atomic structure in the form of a bellows is adopted, which compresses its corrugations under the action of pulsed specific loads. When the pulse specific loads are removed, the multilayer atomic structure expands due to the internal elastic forces. The previously unknown phenomenon of formation of hydrogen-saturated zones in the near-surface layer of a metal friction element (rim, disk) of a brake device containing in its body "internal" hydrogen circulating between the layers of atoms of crystal lattices, which is that electrothermomechanical friction in a hydrogen-containing medium is the release of "external" hydrogen under pressure due to pulsed specific loads, surface temperatures and their variable gradients in the friction zones. The rate of compression is hundreds of times greater than the rate of expansion of the multilayer atomic structure. Under the action of pulsed specific loads there is a large positive flash point temperature gradient, which in the near-surface layer of the metal friction element turns into a negative surface-volume temperature gradient. This increases the pressure of the injected hydrogen, which is amplified by pulsed specific loads, compressing the multilayer atomic structure. When the pulse specific loads are removed, the multilayer atomic structure expands due to the internal elastic forces.

Keywords: braking devices, friction pairs, metal friction element, crystal lattice, atoms, surface and volume temperatures, subsurface layer.

References

1. Garkunov D. N. Tribotekhnika. Vodorodnoye iznashivaniye detaley mashin / D. N. Garkunov, G. I. Suranov, YU. A. Khrustalev // Iz-vo UGTU. Ukhta., 2007.- 260 s.
2. Garkunov D. N. O sposobe povysheniya dolgovechnosti kolesnykh i tormoznykh par [Tekst] / D. N. Garkunov, G. I. Suraigov // Effekt bezvznosnosti i tribotekhnologii. - 1998. - №1. - S. 32 - 36.
3. Galaktionova N. A. Vodorod v metallakh / N. A. Galaktionova // M.: Iz-vo «Metallurgiya». - 1967.-303 s.
4. Vliyaniye vodovoda na iznosostoykost' materialov v parakh treniya tormoznykh ustroystv / M. V. Kindrachuk, D. A. Vol'chenko, N. A. Vol'chenko [i dr.] // Fiz.-khim. mekhanika materialov. -2017.-53. №2. - S. 135-141.
5. Diplom № 482 na nauchnoye otkrytiye «Yavleniye massoperenosa pro-duktoy treniya v metalopolimernykh parakh» ot 27.02.2015 g. avtorov A. X. Dzhanakhmedova, A. I. Vol'chenko, E. A. Dzhanakhmedova i dr. - M.: Mezhdunarod, akad, avtorov nauchn. otkr. i izobret. - Ekspertiza zayavki na otkrytiye №A-618 ot 18.12.2014 g.
6. Nauchnoye otkrytiye [Diplom №378] [Tekst] / A. A. Polyakov D. N. Garkunov, G. P. Shpen'kov, V. YA. Matyushenko // Yavleniye obrazovaniya nasvyshchen-nov vodorodom zony v podpoverkhnostnom sloye metallov pri trenii (yavleniye vodorodnogo iznashivaniya metallov) // Otkrytiya, izobreteniya. - 1990. - №30.
7. Mashkov YU.K. Tribofizika metallov i polimerov/ YU.K. Mashkov// Omsk: Izd-vo OmGTU, 2013. – 240s.
8. Elektrottermomekhanicheskiy iznos i razrusheniye obodov tormoznykh shkivov bu-rovykh lebedok (chast' III) / A.KH. Dzhanakhmedov, E.S. Pirverdiyev, N.A. Vol'chenko [i dr.] //Vestnik Azerbaydzhanskoynzhenernoy akademii. №1, 2016. – S. 27 – 51.
9. Diskovo-kolodochnyye tormoznyye ustroystva: teoriya, raschet i konstruirovaniye (chast' I) / A.KH. Dzhanakhmedov, A.I. Vol'chenko, E.S. Pirverdiyev [i dr.] //Vestnik Azerbaydzhans'koynzhenernoy akademii. №1, 2017. – S. 15 – 31.
10. Myshkin N.K. Tribologiya polimerov: treniye, iznashivaniye, adgeziya i friktsionnyy perenos (obzor) (N.K.Myshkin, M.I.Petrokovets, A.V. Kovalev // Treniye i iznos. 2006. - T.17, № 4. - S. 429-436.
11. Briscoe V.J.; Fiori L., Pellino E. Nano-indentation of polymeric surfaces // J. Phys. D. Applied Phys. - 1998 (31), 2395-2405.
12. ShulgaN.,Kovalev A., Myshkin N., Tsukruk V.V. Some aspects of AFM nanomechanical probing of surface polymer films // European Polymer J - 2004 (40), 949-956.
- 13.Kramer I.R., Demer L. J. //Progr. Mater. Science, - 1961. -V.9. - P. 131-199.