

УДК 539.3

В.В.Широков, І.В.Калиняк\*, О.В.Широков

Українська академія друкарства

\*ІППМ НАН України

**ВОДНЕВЕ ЗНОШУВАННЯ ЯК ПОРУШЕННЯ ГРАНИЧНОЇ РІВНОВАГИ ПРУЖНОГО СТАНУ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МЕТАЛЕВИХ ТІЛ ТЕРТЯ**

*Розглянуто основні зовнішні і внутрішні джерела водню та його вплив на дефектність і зношування металевих тіл тертя. Наведено результати аналізу порушення граничної рівноваги пружного стану тріщинуватих газонаповнених шарів металевих тіл тертя.*

Ключові слова: водневе зношування, метали, тертя, зношування, газонаповнені тріщини, гранична рівновага.

З тертям пов'язана одна з найгостріших проблем сучасності – попередження зношування машин, механізмів і інструменту, оскільки прямі та непрямі витрати на їх відновлення масштабні та мають тенденцію до наростаючого збільшення. Незважаючи на прогрес досягнутий в цій області, [1] ресурс їх працездатності залишається недостатнім [2-5]. В першу чергу це зумовлено не повним розумінням процесів, що супроводжують тертя та зумовлених ним деградаційних змін властивостей металевих поверхонь. На жаль трибологія, все ще знаходиться на стадії накопичення і аналізу даних та встановлення відповідних закономірностей. До таких відноситься водневе зношення, яке як явище було встановлене А.А.Поляковим і Д.Н. Гаркуновим та отримало багато чисельне підтвердження [6, 7]. Аналіз виходу з ладу елементів трібоспряджень показав, що за масштабами прояву водневе зношування займає одне із перших місць в процесах тертя. Наприклад, практично всі поверхні титанових, сталевих і чавунних деталей, що труться, мають підвищений вміст водню та пришвидшено зношуються. Отже, експлуатуючи ті чи інші пари тертя слід враховувати дію навколишнього середовища, як донора водню. Зокрема, можливість насичення воднем як продуктом розкладу водяних парів, палив, мастильних матеріалів та деструкції в зоні контакту полімерних матеріалів, змашуючо - охолоджуючих рідин і, відповідно, його впливу на їх трибологічну поведінку. Теоретичні та експериментальні дослідження в напрямку вивчення негативного впливу водню на матеріали з позицій тертя та зношування, запобіганню останньому, інші службові властивості матеріалів суттєво актуалізувались [8]. В першу чергу це зумовлено розширеним застосуванням водню та воденьвмісних речовин в промисловості та розширеним застосуванням зварки. Крім того, якщо раніше ця проблема була найбільш болючою для хімічної і нафтопереробної галузей, авіації то тепер вона гальмує розвиток водневої [9] і ядерної енергетики [10], криогенного енергомашинобудування [11], перехід на гідридні акумулятори [12], підвищення швидкостей і завантаженості залізничного транспорту [13], використання біопального, тощо. В останньому випадку встановлено, що істотну роль в процесах хімічних перетворень, а також в утворенні продуктів цих перетворень при терті відіграють різні домішки, що є акцепторами вільних радикалів, наприклад меркаптани, різні види яких містяться в нафті і продуктах її переробки, зокрема паливах і змашувальних маслах, а також в інших органічних паливно-мастильних матеріалах одержаних з біосировини [14]. Крім того, згідно з [9], якщо у 1998-1990рр. світове виробництво водню складало  $8,0 \times 10^7$  т то на кінець 2010р. - близько  $(1,5-3) \times 10^9$  т. Тобто різко зросло коло об'єктів різної складності, які можуть піддаватися водневому зношенню [15]. Крім того, особливе значення має стрімкий розвиток технологій механічної обробки. На долю цього технологічного процесу припадає більше 40% трудомісткості виготовлення машин, йому піддаються 80% деталей. При цьому основна увага приділяється процесам фінішної механічної обробки, яка у зв'язку із розширенням номенклатури конструкційних матеріалів вимагає інструментів оснащених, крім традиційних та швидкорізальних сталей, новими полікристалічними надтвердими матеріалами – композитами на основі алмазу і кубічного нітриду бору, а також твердими сплавами [16.14] стійкість яких в умовах водневого зношення практично не відома, хоча існують дані про відносно активну взаємодію водню з ними в процесі тертя та лезової обробки [17-20]. Складні проблеми, зумовлені водневим зношуванням, виникають у зв'язку із застосуванням наноматеріалів [21], розвитком механотроніки, забезпеченням надійності рухомих імплантатів в біологічних об'єктах.

Проте, незважаючи на важливість проблеми та велику кількість робіт стосовно вивчення системи водень–метал, залишається більше запитань, ніж відповідей. Багато робіт носять експериментальний характер, а отримані результати характеризуються великим розкидом даних, що на загал характерно для більшості трибологічних випробувань та не розкривають природи багатьох процесів, обумовлених присутністю водню в металі і тертям. Наприклад, існує ряд обробок, які базуються на забезпеченні водневого впливу на зону різання для системи “заготовка – інструмент”, але найчастіше вони ґрунтуються на практичному досвіді, а оптимальність їх режимів викликає сумніви у зв’язку із незадовільною відтворюваністю результатів. Розроблені ж математичні моделі торкаються в основному питань дифузії водню в чистих металах з не завжди точним аналітичним розв’язком.

На сьогодні, без врахування тертя, частково виділені первинні фактори обумовленої воднем деградації металів:

- 1) тиск газу водню, що виділився в металі в мікропорожнинах;
- 2) обумовлена воднем декогезія (послаблення сил зчеплення) в ґратці металів;
- 3) вплив водню на рухомість дислокацій;
- 4) поверхневий вплив (хемосорбція);
- 5) хімічна взаємодія водню з компонентами сплавів з виділенням фаз воднемістких з’єднань (гідридів та інших).

Ці явища ще не розглядалися в комплексі і багато виявлених ефектів не знаходили пояснення.

За останні десятиліття намітився перехід в сторону синтезованого підходу до вивчення деформування і руйнування металів при наявності водню, коли фактори його впливу розглядаються не ізольовано, а в їх зв’язку з розвитком процесу в цілому. При цьому характерне залучення більш свіжих результатів і концепцій фізики, фізичної механіки реальних кристалічних тіл, матеріалознавства, тощо. До теперішнього часу більшість спостережень, експериментів і проведених різними методами досліджень привела до висновку, що водень не тільки полегшує руйнування, а й змінює його характер. Останнє проявляється в тому, що водень сприяє локалізації власне подій руйнування на різних структурних рівнях (мікро–, і макроскопічному), причому ця локалізованість викликана підвищенням мікронеоднорідності (мікролокалізації) пластичної деформації. Локалізованість процесу руйнування приводить до ситуацій, коли міцність тіл є тісно зв’язаною із закономірностями обумовленими воднем зародження і росту тріщин різних масштабів. На макрорівні це виражається у зниженні деформаційних характеристик міцності металів і в посиленні ознак крихкого руйнування.

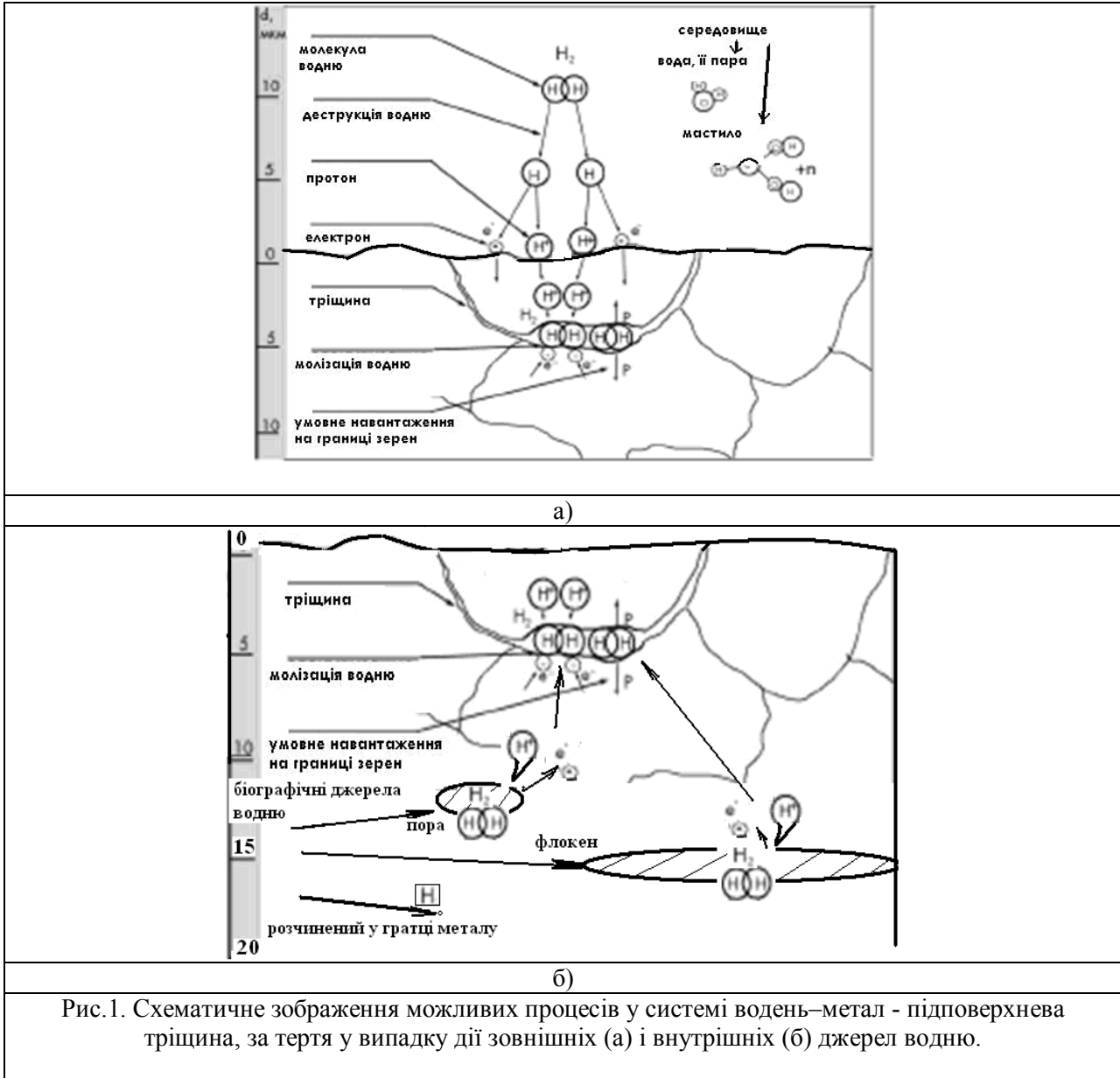
Водневе зношування розглядається як комплекс термодинамічно малоїмовірних фізико-хімічних процесів, протікання яких обумовлено тертям [2,6,8, 22] (рис.1, табл.1) і зумовлюється руйнуванням поверхневих шарів в околі контактування спряжених поверхонь, а саме:

- інтенсивним виділенням водню в наслідок трибодеструкції воденьвмістних матеріалів і середовищ (за нормальних тисків і температури водень не виділяється ні з мастила, ні з пластмаси, деревини, води, чи пального, тощо);
- дифузійною водню в шари, що піддаються деформуванню;
- швидкість дифузії визначається градієнтом температури і напружень, що створює ефект накопичення водню в процесі тертя;
- спецефічним видом руйнування, пов’язаним з одночасною появою великої кількості «зародків» тріщин;
- внаслідок дії водню можливе крихке або в’язке руйнування металу в зоні контакту.

Розрізняють водневе зношення диспергуванням і водневе зношення руйнуванням, але визначальним фактором у всіх цих процесах є тертя. Саме тертям обумовлені деформації і нагрів приповерхневого шару, температурні спалахи в зоні фактичного контакт, виділення водню, його дифузія в зони з максимальною дефектністю [23-25]. Аналіз продуктів зношування свідчить про підвищену концентрацію водню в них. Наприклад, за допомогою вакуум - десорбційного методу встановлено, що вміст вільного (дифузійно рухомого) водню в частинках зношення поверхонь кочення коліс залізничного транспорту, перевищує більш ніж в 400 раз фонові показники. Найбільша концентрація відмічена на глибинах до 1 мм ([23]).

Було встановлено [2,6,26], що виділення водню при терті обумовлено механохімічними ефектами, які зумовлюються трибодеструкцією, каталітичними і електрохімічними процесами (табл.1). Атом водню магнітний, протон електрично заряджений. Це обумовлює зв’язок

електричних явищ при терті з накопиченням і міграцією водню під дією магнітних і електричних полів.



Таблиця 1.

Основні етапи водневого зношування

Етапи	Процеси в зоні контакту	Процеси зумовлені тертям
1	Інтенсивне виділення водню в зоні тертя з вологи, мастил, палива, газів та неметалевих матеріалів пар тертя.	Трибохімічні реакції
2	Десорбція мастильного матеріалу з поверхні металевої деталі	Підвищена температура поверхні
3	Адсорбція водню поверхнею металевої деталі	Термодинамічно вигідна для адсорбції ситуація
4	Дифузія водню в поверхневі шари металевих трибоелементів, швидкість якої визначається градієнтами температури і напружень	Градієнт и температури і напружень
5	Концентрування водню на певній	Градієнти температури,

	глибині від поверхні тертя в зонах максимальної температури та дефектності.	напружень і дефектності в приповерхневих шарах
6	а) «Низькотемпературне» крихке руйнування насиченого воднем поверхневого шару металевих трибоелементів, як результат множинного розвитку тріщин в зоні контакту.	Сумування напружень фрикційної взаємодії і від молізації водню
	б) «Високотемпературне» в'язке руйнування металу поверхонь тертя у вигляді намащування на контртіло, як наслідок їх окиснення воднем	Перенасичення воднем металу при коливаннях високих температур фрикційного нагріву (для сталі в межах 800°C...1000°C)

Власні дослідження та дослідження інших авторів свідчать, що в процесі тертя саме під поверхнею виникають дефектні шари, зокрема з тріщинами, в яких може акумулюватись водень з різних за походженням джерел. Це явище зумовлено по крайній мірі трьома причинами.

**По-перше** поверхні тертя мають криволінійну форму, навіть коли вони номінально гладкі. У цьому випадку незалежно від того, чи контакт статично навантажений, чи відбувається ковзання між поверхнями (рис. 2) максимальні напруження виникають під поверхнею [2, 27-31]. Слід брати

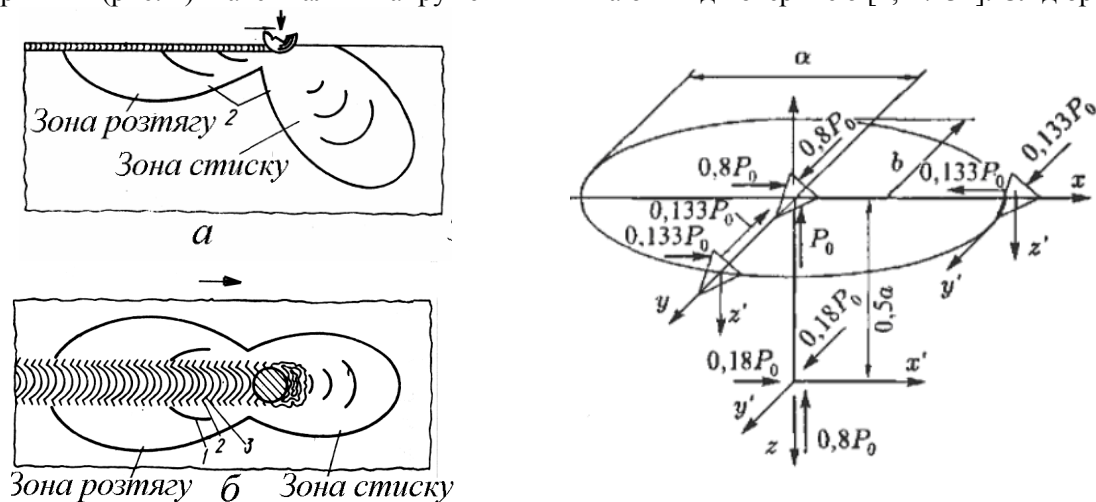


Рис.2. Схема напружено-деформівного стану за зовнішнього тертя і статичного контактного навантаження:

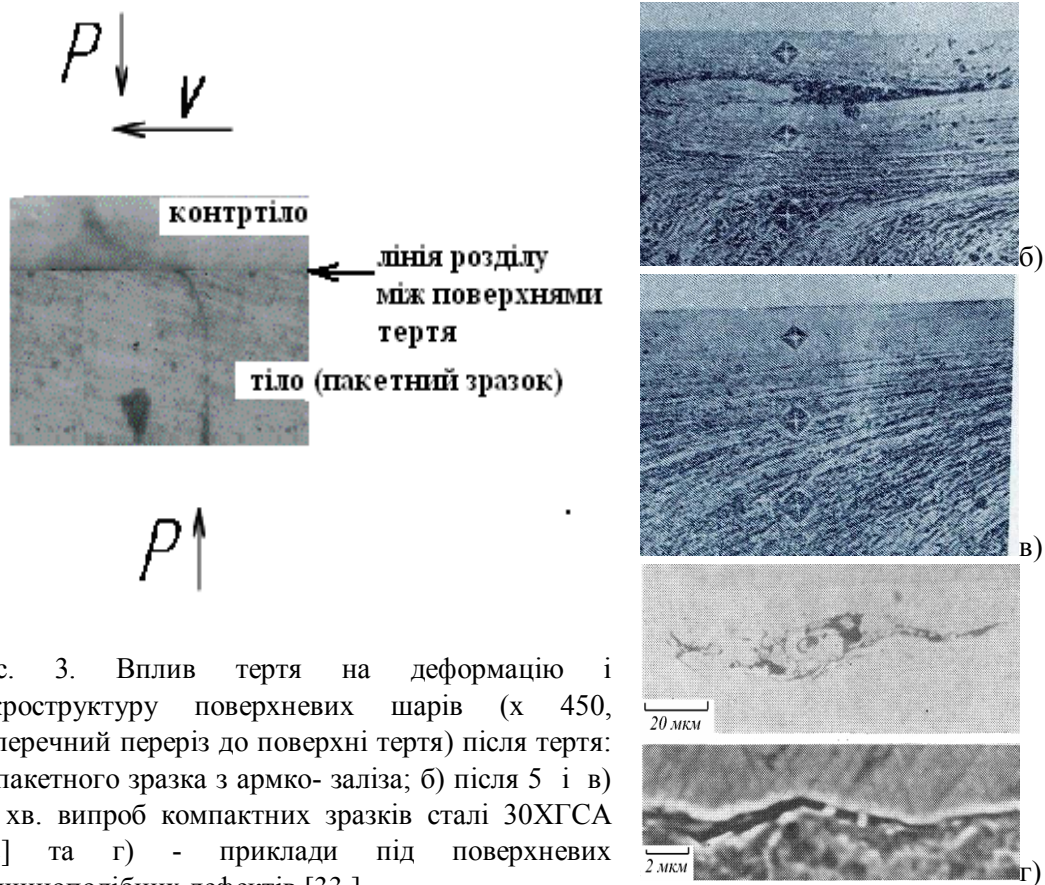
а) у перерізі (1 – зона пружно-пластичних деформацій; 2 – зона пружних деформацій) та б) в плані (1 – зона пружних деформацій; 2,3 – зона пружно-пластичних деформацій; 2 – впливу; 3 – контакту); в) статично навантажена еліптична (герцівська) площадка контакту і напруження на ній [31], де  $P_0$  - максимальне напруження в центрі контакту,  $a, b$  – півосі контуру площадки.

до уваги, що в загальному випадку контакту двох тіл, до деформації співдотичних в одній точці і обмежених криволінійними поверхнями, кривина яких в обох головних площинах постійна являє собою еліпс.

**По – друге**, в зоні максимальних напружень виникають скачки деформацій та ротаційні зсуви деяких об'ємів металу.

Нами було встановлено розподіл деформації зсуву на поверхні тертя і в глиб металу методом використання пакетного зразка. Принципово його конструктивні особливості полягають в наступному. Зразок для випробування на тертя складався з набору тонких пластин сталі, що вивчалася. набір упакувався в металеву оправу і стискався пресом із зусиллям до 5 тонн, заливався розплавленим алюмінієм або свинцем, після чого навантаження знімалося. У найпростішому варіанті металева оправу з набором пластин після навантаження стягується через попередньо висвердлений отвір і заливається легкоплавким металом (сплав Вуда, олово, свинець і т.п.).

Після випробувань на поперечних шліфах чітко видно тонкі риски – границі пластин. За згином рисок визначаюлися напрям, величина та глибина деформаційних змін (рис. 3). Через певний час тертя тонкі поверхневі шари втрачають свою структуру і текстуру, і тому риси полщин спайності між пластинками взірця прослідковуються на певній глибині під ними (рис.3 б, в).



а)  
Рис. 3. Вплив тертя на деформацію і мікроструктуру поверхневих шарів (х 450, поперечний переріз до поверхні тертя) після тертя: а) пакетного зразка з армко- заліза; б) після 5 і в) 20 хв. випроб компактних зразків сталі 30ХГСА [32] та г) - приклади під поверхневих тріщиноподібних дефектів [33 ]

Параметри деформаційних зміщень в поперечному ( $\delta$ ) та поздовжньому ( $\lambda$ ), напрямках, а також відносна деформація за формулою

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(\lambda)^2 + (\delta)^2} - \delta}{\delta} \times 100\%$$

наведено в таблиці 2.

Таблиця 2.

Деформаційна здатність поверхневих шарів армко-заліза і деяких вуглецевих сталей під дією сил тертя

Трибоматеріал	$\lambda$	$\delta$	$\lambda / \delta$	$\varepsilon, \%$
армко-залізо	20	35	0,67	15,17
сталь 20	18	32	0,56	14,73
сталь 35	18	32	0,56	14,73
сталь 45	12	20	0,60	16,61

На жаль, спосіб малоінформативний у випадках малих пластичних деформацій, які характерні для високоміцних металів після гартування, інших зміцнюючих обробок, метод також малоприслатний для вивчення впливу зовнішніх параметрів на деформацію в процесі реверсивного ковзання. Отримані нами дані для пари ковзання армко-залізо - армко-залізо (відпалених) узгоджуються з аналогічними даними, отриманими [33] і підтверджують можливість утворення

“біжучих тріщин” (рис.3г). Вони виникають внаслідок втрати стійкості матеріалу в мікронеоднорідному полі великих пластичних деформацій зсуву за високих гідростатичних тисків. Враховуючи дані інших авторів в [33], підтверджено висновок про те, що значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{II}$  у вершинах біжучої тріщини різні, що і визначає її однонаправлене розповсюдження. Ця різниця тим більша, чим більша її довжина і менші стискуючі зусилля на тертя між берегами. Необмежений зсув за таким механізмом відбувається послідовним проходженням одиничних біжучих тріщин або їх груп. Розповсюджуючись в структурно-неоднорідному середовищі, біжуча тріщина здатна огинати бар’єри, переповзати на інші поверхні свого розповсюдження, утворюючи уступи, розмножуватись або зливатися, розпушуючи матеріал системою розрізів, орієнтованих вздовж напрямку ковзання

Геометрична подібність берегів біжучої тріщини різних розмірів, відсутність ознак їх взаємного тертя, висококутова розорієнтація ділянок ломаної лінії контура берегів і сліду від її проходження, свідчать, що відносний тангенціальний зсув поверхонь при терті ковзання відбувається, в основному, в момент їх розведення (рис.4.).

Схема локального зсуву за умови введення розрізу (тріщини) в пластину наведена на рис.4., [33].

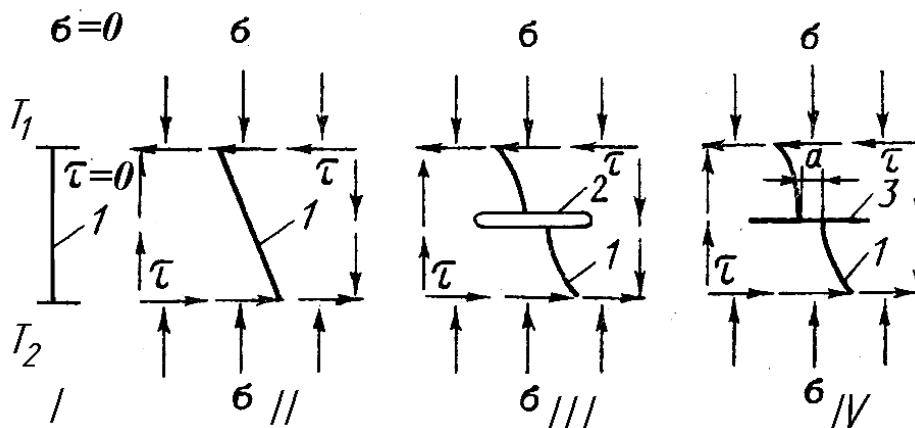


Рис. 4. Схема локального зсуву як наслідок введення розрізу в пластину, що знаходиться під дією сил стиску і зсуву:

- 1 – реперна лінія, вертикальна до моменту прикладання сил; 2 – розріз;  
 3 – розріз після зведення берегів (стан I – до моменту прикладання сил; II – початкова стадія деформування; III – введення розрізу; IV – утворення біжучої тріщини).

**По – третє**, надзвичайно важливе значення має тепловий стан поверхонь тертя. Він визначає зони переважного акумулювання водню.

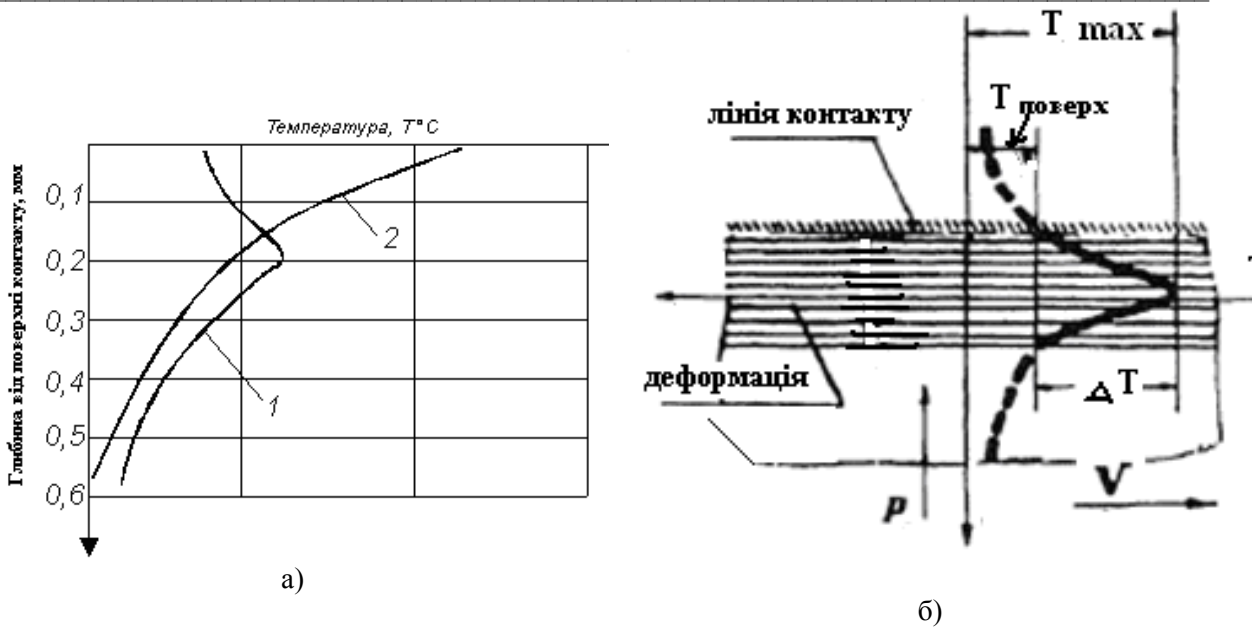


Рис.5 Варіанти теплового стану поверхні за тертя: а) за високої тепловіддачі (1) і низької; б) зміна температури ( $T$ ) по нормалі до поверхні тертя в zdeформованому шарі .

Таким чином, існує висока ймовірність того, що в процесі тертя можливе утворення воденьвмісних підповерхневих дефектів типу тріщин. Протягом певного часу вони групуються комплексами під поверхнею, взаємодіючи між собою, а за певних умов відбувається скачок деформацій, який на практиці спостерігається і ідентифікується як водневе зношування руйнуванням. Логічним є припущення, що тріщини подібні між собою, знаходяться на невеликих відстанях між собою, компланарні та згруповані.

Математичні моделі взаємодії таких тріщин розглянуто в роботах [34, 35], а також проведено аналіз можливих напрямів їх поширення у випадку, коли тріщини знаходяться під дією внутрішнього тиску.

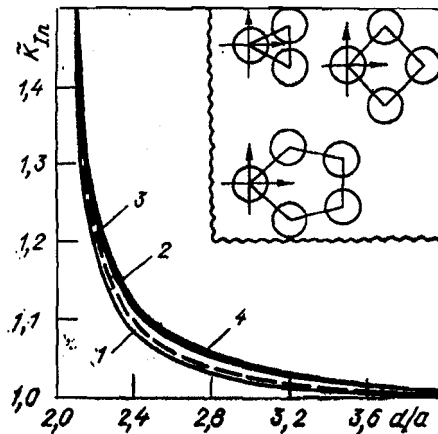


Рис. 6. Залежності максимальних значень  $\tilde{K}_{1n}(\varphi_n)$  від віддалі між центрами сусідніх двох (1), трьох (2), чотирьох (3) та п'яти (4) компланарних тріщин, розміщених у вершинах правильних багатокутників. Пунктирна крива відповідає випадку взаємодії трьох тріщин, розміщених на одній прямій.

На даному рисунку наведені значення приведених коефіцієнтів інтенсивності напружень

$$\tilde{K}_{1n}(\varphi_n) = K_{1n}(a, \varphi_n) / K_{\infty}, \quad (K_{\infty} = 2p_0 \sqrt{a/\pi})$$

для крайньої лівої тріщини, коли усі тріщини знаходяться під дією внутрішнього тиску  $p_0$ .  $K_{\infty}$  - це коефіцієнт інтенсивності напружень для однієї тріщини радіуса  $a$ , що знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p_0$  в безмежному тілі.

Дані теоретичні дослідження показали, що суттєва взаємодія тріщин під дією такого навантаження проходить на віддаль між їх центрами менших  $4a$  і практично не залежить від кількості тріщин. Цей факт дозволяє при дослідженнях обмежитись випадком взаємодії лише двох тріщин, що значно спрощує математичну модель задачі.

Отже, зовнішні і внутрішні джерела водню за певних умов стимулюють зношування більшості металевих поверхонь тертя. Водень здатний накопичуватися в під поверхневих шарах з максимальною термонапруженістю, локалізацією дефектів та молізуватися в тріщиноподібних утвореннях, створюючи тиск, який може бути критичним для стрибка тріщини. Дослідження показують, що тріщини при взаємодії між собою мають тенденцію до злиття і утворення більшої за розміром тріщини, яка переростає в біжучу перед зоною стиску, зумовленого тиском контртіла, внаслідок чого збільшується область пошкоджень. На практиці це і призводить до катастрофічного руйнування поверхонь тертя.

1. Кіндрачук М.В., Кульгавий Е.А. Трибологія -наука двадцять першого століття/ Вісник НАНУ, 2005, – №4, – с.67-72
2. Справочник по триботехнике. Теоретические основы / Под ред. М.Хебды, А.В. Чичинадзе.- Москва-Варшава : Машиностроение ВКЛ, - 1989.- т.1. - 397с.
3. Широкова О.В. Економічні аспекти трибології// Эффективность реализации научного ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях . Материалы 10-ой ежегодн промышленной междунар. науч.-техн. конф.), 18-22 февраля 2010г., п. Славское Львовской обл. – С. 252–255.
4. П. Джост. Мировые достижения в области трибологии / Трение и износ, – 1986г., – т.7, – №4, – с.593-603.
5. Ивасышин Г.С. Научные открытия в микро- и нанотрибологии./ Деловая слава России. Нанотехнологии, с.47-48.
1. 6. Гаркунов Д.Н. Триботехника ( износ и безызносность): . – М.: “МСХ”, 2001.- 616 с.
6. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А. Избирательный перенос в узлах трения. – М.:Транспорт. 1969. – 104с.
7. Широков В.В., Ковальчик Ю.І. Особливості моделювання гідрофільної зони з урахуванням водневого зношування під час тертя.// ФХММ, – №4, – 1998 – с.121-126.
2. V. V. Shyrovkov and Yu. I. Koval'chyk/ Features of simulation of a hydrophilic zone with regard for hydrogen wear in the process of friction/*Materials Science, Volume 34, Number 4 / July, 1998, 584-590.*
8. Л.Ф.Козин, С.В.Волков. Водородная энергетика и экология. - К., Наукова думка, - 2002 - 158 с.
9. Иолтуховский А.Г., Калинин Б.А., Шмаков А.А. Водородное охрупчивание и гидридное растрескивание циркониевых элементов легководных реакторов. – Москва, МИФИ, – 2001. – 50с.
- 10.Н.К.Мешков, В.И.Холодный Материалы и металлургические технологии энергоустановок на криогенных компонентах.// International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAEЕ, – 2004, – № 2(10), – р.41-47.
3. 12.Такахаси Коки Технологии топливных элементов набирает обороты. (Спецрепортаж) / НИППОНИЯ No.28, 15 марта 2004г.
4. 13. Подавление водородного износа во фрикционном сопряжении "колесо-композиционная тормозная колодка" подвижного состава / В.И. Тер-Оганесян, В.И. Колесников // Актуальные проблемы железнодорожного транспорта : Межвуз. сб. науч. тр. – 1995. – Ч.2. – С. 58-60.
5. 14. Кичкин Г.И. Влияние меркаптанов на противозадирные свойства топлив для газотурбинных двигателей. // Химия и технология топлив и масел. – 1974. – №3, – с.52- 55.
6. 15.В.М. Ажажа, М.А. Тихоновский, А.Г. Шепелев, Ю.П. Курило, Т.А. Пономаренко, Д.В. Виноградов Материалы для хранения водорода: анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках // Вопросы атомной науки и техники. - 2006. - № 1. - Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (15), с.145 – 152.
7. 16.Сверхтвердые материалы. Получение и применение. /Под общ. ред. Н.В.Новикова в 6 т. Т.5. Обработка материалов лезвийным инструментом./под ред.С.А.Коваленко. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля. ИПЦ “АЛКОН НАНУ”, – 2006 – 316с.



8. 17.Ширяев А.А. , Grambole D., Herrmann F. , Rivera A. Диффузия водорода в алмазах // Электронный научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» №1(24)' – 2006.
9. 18.Білик Н. В., Бассараб А. І. Застосування швидкорізальних сталей та проблеми підвищення їх ресурсу (Інформ. огляд) // Інструмент 2000 - с. 20-32
- 10.19. Бурлаков А.А. Зносостійкість інструментальних матеріалів у водневому газовому середовищі та фізико-хімічні особливості водневодифузійної обробки матеріалів. – Автореф., к. т. н. – Технологічний університет Поділля, Хмельницький, 2000. - 19с.
- 11.20. В.В. Широков, Х.Б.Василів, О.В.Широков Моделювання та методи комплексних досліджень трібопроцесів за контактної взаємодії ріжучого інструменту з поверхнею оброблюваного матеріалу. // Мат. Першої н.-практична конф. Інструменти та інструментальне виробництво, 24-25 жовтня 2007 р., Львів, ЛьЦНТІ, 2007, 68-72.
- 12.21. Андриевский Р.А. Водород в наноструктурах/ УФН, 2007, (177) №7, с.721-735)
- 13.22. В.В. Широков, О.В.Павлина Термодинамічний аналіз воднеутворення в трибосистемах та особливості водневого зношування металів. // Науковий вісник: Лісопромисловий комплекс напередодні ХХІ століття: освіта, наука, виробництво/Збірник н.-т. праць.-Львів:УкрДЛТУ. – 1999. – Вип.9.6. – С.183-185.
- 14.23. В. И. Балабанов, В. И. Беклемышев, Н. И. Махонин. Трибология для всех. - М.: – 2002, – 208с.
- 15.24. Защита от водородного износа в узлах трения /Под ред. А.А.Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – 135с.
- 16.25. Поляков А.А. ,Гаркунов Д.Н. Водородная хрупкость поверхностных слоев при трении .ФХММ, - 1969, - № 2. - с.48.
- 17.26. Матушенко В.Я. Исследования наводораживания металлов при трении с фрикционными пластмассами. Автореф. дисс. к.т.н. Научно-исследовательский институт им. Л.Я.Карпова. М., 1974. 21с.
- 18.27. Широков В.В.,Максимук О.В. Контактна взаємодія тіл з врахуванням зношування та її особливості стосовно тонкостінних елементів конструкцій (огляд). // ФХММ. – №1. – 2002р. – с.51-62
- 19.28. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С., Основы расчетов на трение и износ.- М.:Машиностроение, 1977.-525с
- 20.29. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев: –Техника,– 1976.–с. 294.
- 21.30. Д. Бакли. Поверхностные явления при адгезии и фрикциом взаимодействии. – М.: "Машиностроение" – 1986, – 359 с.
- 22.31. Современная трибология: Итоги и перспективы / Под ред.К.В.Фролова. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 480с.
- 23.32. Голего Н.Л. Технологические мероприятия по борьбе с износом в машинах. – М.: ГНТИ, Киев, – 1961. – 193с.
- 24.33. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации/ Лихачев В.А., Панин В.Е., Засимчук Е.Э. и др. – Киев.:Наук.думка, – 1989. – 320с.
- 25.34. Хай М.В., Лаушник И.П., Кальняк И.В. Взаимодействие близко расположенных дискообразных компланарных трещин // ФХММ - 1985 – №6 – с.87-88.
- 26.35. Кальняк И.В., Лаушник И.П., Хай М.В. Предельное равновесие бесконечного тела, содержащего близко расположенные газонаполненные дискообразные трещины // Проблемы прочности – 1986 – № 8 – с.110-113.