

**АКТИВАЦІЯ ФРЕТИНГ-ПРОЦЕСІВ В ОБЛАСТІ ДІЇ
МІКРОЗМІЩЕНЬ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ**

Відомо, що під час контактування поверхонь номінально-нерухомих поверхонь деталей машин та відповідального устаткування відбуваються значні руйнівні процеси. Традиційно вважалося, що вони є наслідком вібраційних фрикційних мікропереміщень в області звичайних фретинг-процесів – 30...80 мкм. В роботі розглядається активація поверхонь при значно менших відносних мікропереміщеннях до 1 мкм.

Експериментальне дослідження плям контакту по схемі кулька– площина є найбільш вдалим рішенням при моделюванні малоамплітудного фретингу. Це пояснюється тим, що в границях одиничного контакту можна спостерігати всі види локального руйнування поверхні по мірі зростання амплітуди відносного проковзування від нуля при абсолютному пружному зчепленні до одиниць мікрометра на границі контакту. А також можливістю неперервного інтегрування: по всій площині та глибині контакту з метою отримання картини НДС поверхневого шару. Таким чином, отримане повне узгодження НДС з картиною руйнування контакту із наступною втратою цілісності спряження. Вібраційний характер навантаження в місцях фактичного контакту призводить до постійної зміни ведучих механізмів фретингу. В 70-х роках Б.І. Костецький висунув умови структурної пристосованості поверхневих шарів [1, 2].

Ці умови ґрунтуються на утворенні вторинних структур I типу (пересичених систем твердих розчинів в залізі Fe₂O₃, Fe₃O₄) та II типу (FeO). Нами був зафіксований момент початку виникнення вторинних структур у найбільш активних частинах контурної площини контакту. Для початку визначимо фрикційні складові цього процесу. За розрахунками величина проковзування в точці радіусом r визначається за Джонсоном [3].

$$\Delta S = \frac{3 \cdot \mu \cdot P_n}{16 \cdot G \cdot a} (2 - \gamma) \left[1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{c}{r} \right] \left[\left(1 - 2 \cdot \frac{c^2}{r^2} \right) + \frac{2c}{\pi r} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (1)$$

Визначимо роботу сил тертя в зоні проковзування за розподілом сил тертя в області $c \leq r \leq a$ (рис. 1, а, в)

$$F(r) = \int_c^a q(r) \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr, \quad (2)$$

де $q(r) = \frac{3 \mu P}{2 \pi a^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}}$ – розподіл тангенціальних зусиль в області проковзування (рис. 1, б).

Тоді робота сил тертя в будь-якої i -ї точки зон проковзування визначається за формулою

$$A_i = F_i \cdot \Delta S_i. \quad (3)$$

Для умов аналогічним експериментом були отримані діаграми роботи тангенціальних зусиль в зоні мікропроковзування (рис. 1, с).

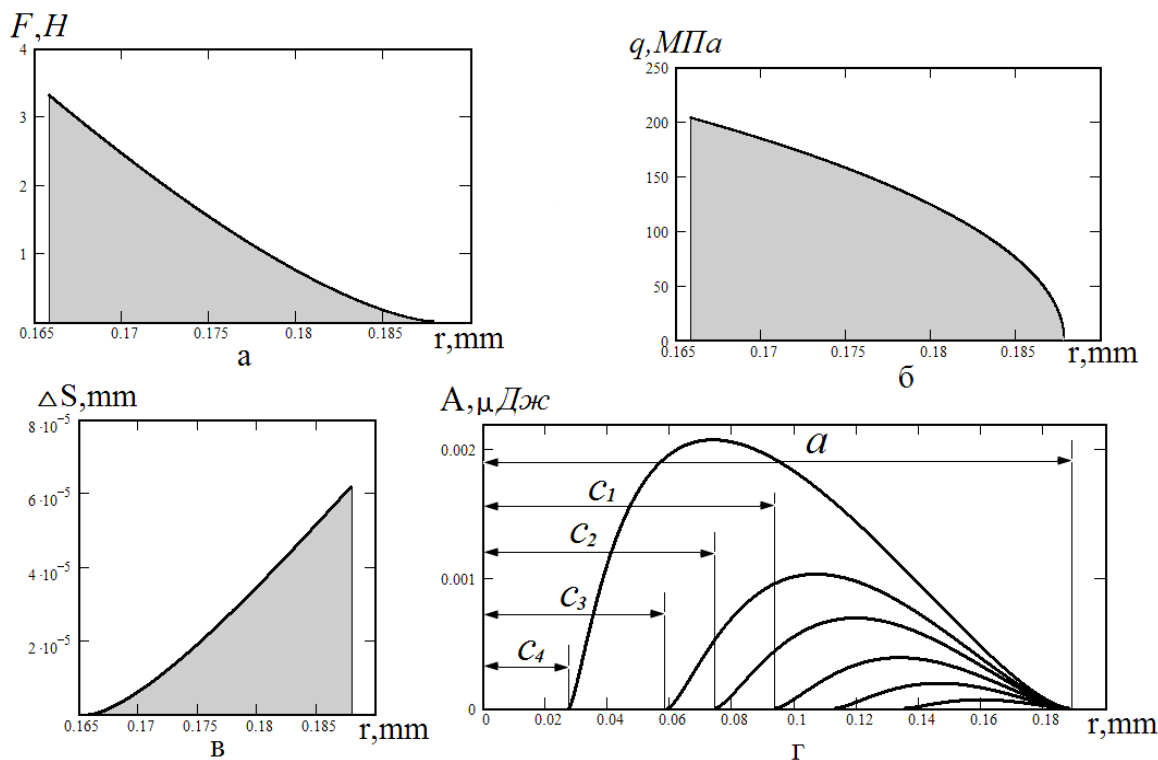


Рис. 1. Вплив сил тертя в області проковзування у ННФК (а) на розподіл тангенціальних зусиль (б), проковзування (в) та роботи сил тертя (г). Розміри зон зчеплення (c), для $Q = 20$ Н, $c_2 \rightarrow Q = 25$ Н, $c_3 \rightarrow Q = 31$ Н, $c_4 \rightarrow Q = 31,9$ Н.

Умови розрахунку $P_n = 80$ Н, $\mu = 0,4$, $E_{екв} = 115$ ГПа, $G = 80$ ГПа, $R_{кульки} = 12,7$ мм.

З рисунку 1, г можна передбачити, що руйнування ННФК буде найбільш інтенсивним в середній частині області проковзування при умові $1 < \frac{c}{a} < 0,8$. При поступовому збільшенні тангенціального зусилля максимум робіт сил тертя переміщується в напрямку зони зчеплення і при повному ковзанні співпадають з центром плями контакту. Визначимо градієнт роботи сил тертя $\frac{dA}{dx}$ в області проковзування й особливо при $1 < \frac{c}{a} < 0,8$. Асиметрія фрикційних явищ в області проковзування пояснює механізм руйнування ННФК в області проковзування й місце зародження фретинг-втомної тріщини (рис. 2).

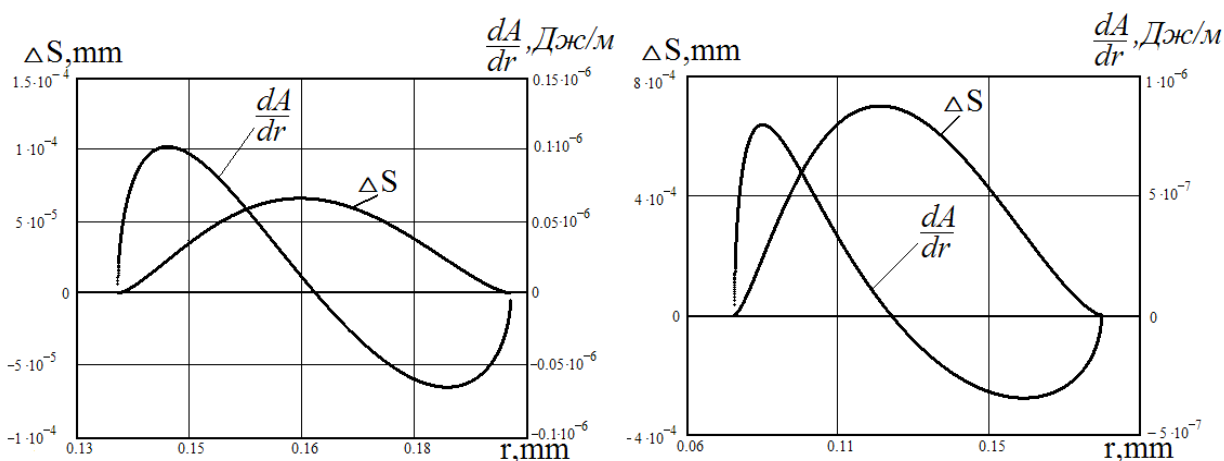


Рис. 2. Взаємозв'язок величини зміщення ΔS та інтенсивності роботи сил тертя $\frac{dA}{dr}$ в області мікропроковзування залежно від тангенціального зусилля.

а - $P_n = 80$ Н, $Q = 15$ Н, $\mu = 0,4$, $(a - c) = 56$ $\mu\text{м}$.

б - $P_n = 80$ Н, $Q = 28$ Н, $\mu = 0,4$, $(a - c) = 112$ $\mu\text{м}$.

Отримавши кількісні чинники мікропереміщень у зоні проковзування, дослідимо механізми

руйнування контакту. На рис. 3. представлена картина початкової фази розвитку фретингу в тонкій зоні проковзування шириною 10...12 μm .

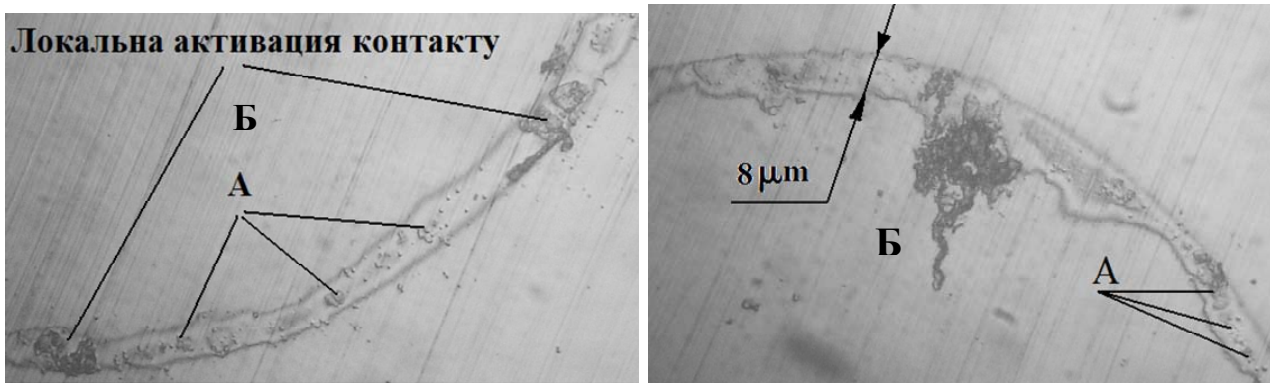


Рис. 3. Виникнення центрів активної генерації окислів у зоні проковзування. $P_n = 15H$, $F_\tau = 2H$, $N = 120$ циклів, сталь 3ХГСА загартована. А – зародження центрів активації, Б – вихід продуктів окислення з області схоплення

Аналізуючи картину поверхневих дефектів, можемо чітко виділити кільцеву зону проковзування, у якій теоретично можливі мікрозміщення поверхонь до 0,005...0,1 μm . Як видно, це досить для того, щоб вже при кількох циклах осциляцій відбувається активне руйнування найбільш нестійких з енергетичної точки зону локальних місць контакту. Незбалансованість окремих мікроконтактів в області проковзування полягає у тому, що підвищений нормальний тиск в цих точках та зсув у тангенціальному напрямку призводить до утворення металічного зв'язку, який за кілька циклів руйнується й відновлюється одночасно. На сусідніх ділянках спостерігається механізм сталості або слабо затухаючої релаксації напружень у тангенціальному напрямку. Останнє реалізується через можливість відбутися акту мікропроковзування. При цьому сліди руйнування розташовані по центру зони проковзування так як і було спрогнозовано теоретично при визначенні максимальної роботи сил тертя (рис. 2). Згідно з [4, 5, 6] процес схоплення металів розглядається як хімічна реакція у твердій фазі, в результаті якої відбувається електронна дифузія атомів, що перетворюється у енергетично сталі металічні зв'язки. Перші зсувні процеси є динамічно незрівноваженими і, власне, є перехідним етапом до схоплення – зрівноваженого стану [4]. Однак, зауважимо, що мінімальний час, за який відбувається два стани може зривуватися до часу одного періоду. По мірі зміни конфігурації контакту утворюються нові центри активного окислювання та зношування, які займають всю кільцеву зону.

Прослідкуємо подальший перебіг малоамплітудного фретингу у зоні проковзування (рис. 4). Володіючи розвинутою вільною поверхнею після розриву адгезійних зв'язків, продукт фретинг-корозії адсорбують на себе молекули води, мастила, водню. Період утворення та накопичення продуктів корозії традиційно називають латентним. В нашому випадку більш коректним та прогнозованим вважати за латентний період такий час або кількість циклів, під час якого ННФК знаходиться в режимі номінального зчеплення після якого система може перейти у режим змішаного фретингу або режим динамічного зчеплення-проковзування. У випадку відсутності таких переходів ННФК знаходиться у латентній стадії фретингу.

Видно, що процес руйнування локальних місць супроводжується лавиноподібним утворенням ланцюгового конгломерату окислів металу та адсорбційних з повітря та поверхні молекул води. Звичайно, об'єм цих продуктів набагато перевищує об'єм зруйнованого матеріалу. Таким чином, зміна НДС контакту при циклічних тангенціальних навантаженнях в умовах часткового проковзування відбувається не тільки за рахунок деформаційних чинників, а й від втручання у перерозподіл напружень окислів, що активно заповнюють міжконтактний простір. Існує кілька пояснень механізмів накопичення окислів на граничній поверхні. Це моделі Ахматова, Харді, Ландмуїра, Мареліна, Годфрі, Ребіндера, Виноградова та інших. В основу механізму покладена ланцюгова кристалізація адсорбованих полярних часток (рис. 4) з навколишнього середовища: повітря, водяні пари, суміш $\text{CO}-\text{CO}_2$, вуглеводні, з'єднання сірки H_2S , SO_2 , SO_3 , хлору, азоту, аміаку та інші.

Не враховуючи змащувальні матеріали, джерелом поляризованих часток є зорієнтовані групи окислів та гексагонів, які утворюються звільненням з карбідів молекул вуглецю при їх розпаді. Трибохімічна реакція відбувається з утворенням оксидів (гідрооксидів) металів у присутності вуглеводневого середовища й водяного пару. На поверхні відбувається полімеризація продуктів трибоокислювальної реакції, поляризовані частки яких вибудовуються у ланцюги (рис. 5). Це є свідченням про малі розміри того контакту, який активований тертям та адсорбцією. Поступово, ближче до місця активації відбувається накопичення агломерату з продуктів фретинг-корозії (рис. 6).

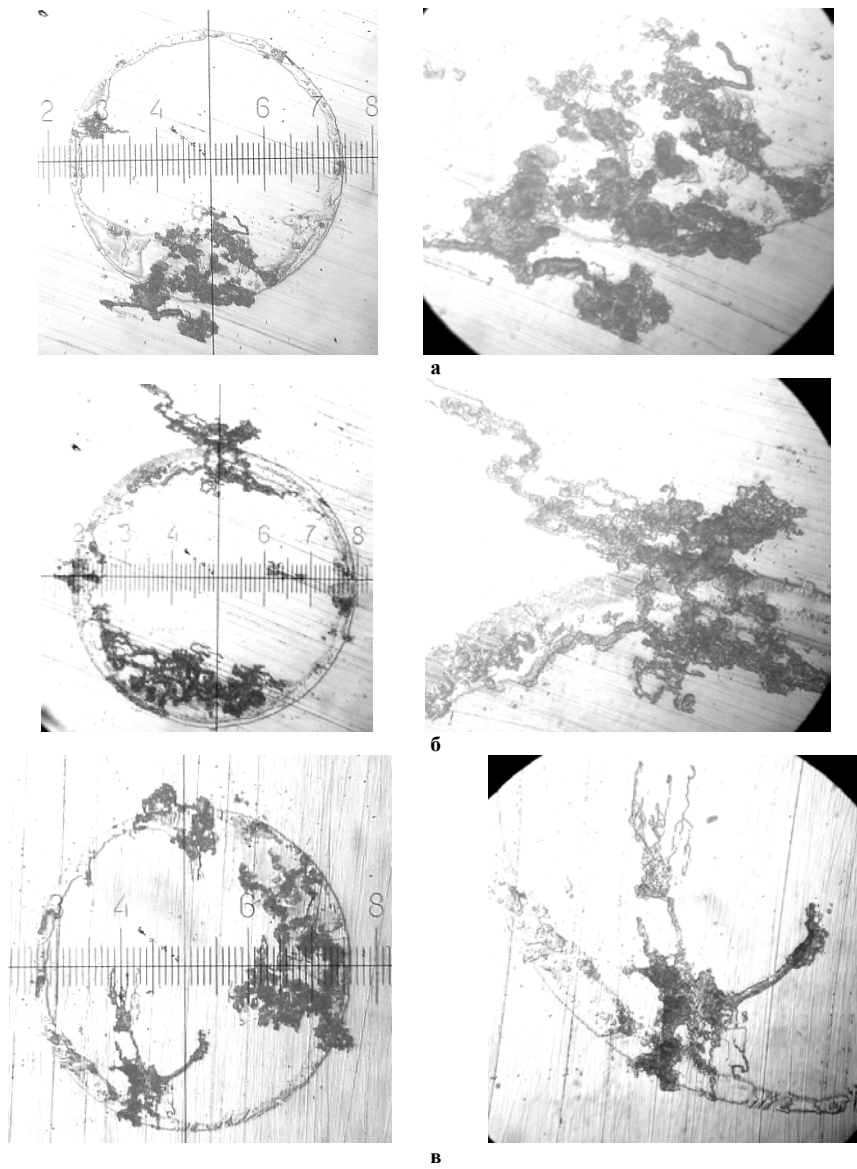


Рис. 4. Реакційна властивість зони проковзування та продукування окислів у місцях ювенільного контакту поверхонь:
а – 120 циклів, б – 300, в – 500

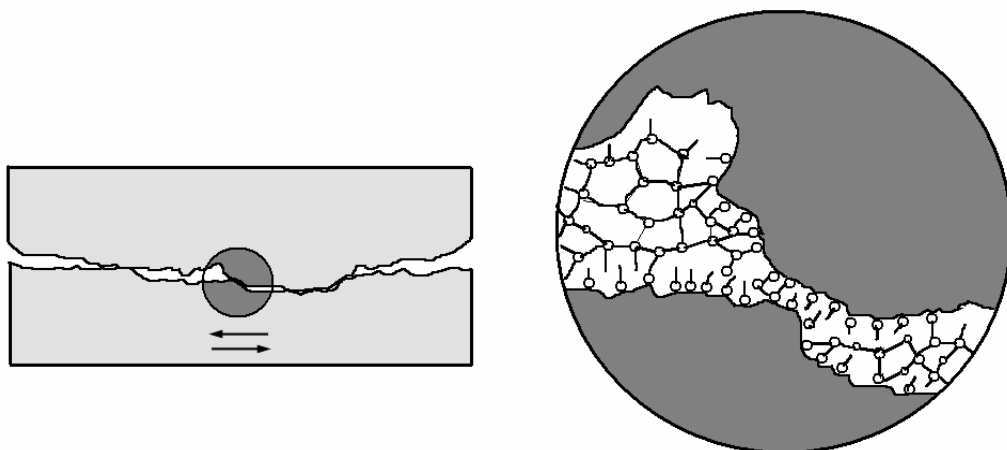


Рис. 5. Орієнтація поляризованих часток адсорбованих молекул на ювенільних ділянках контакту

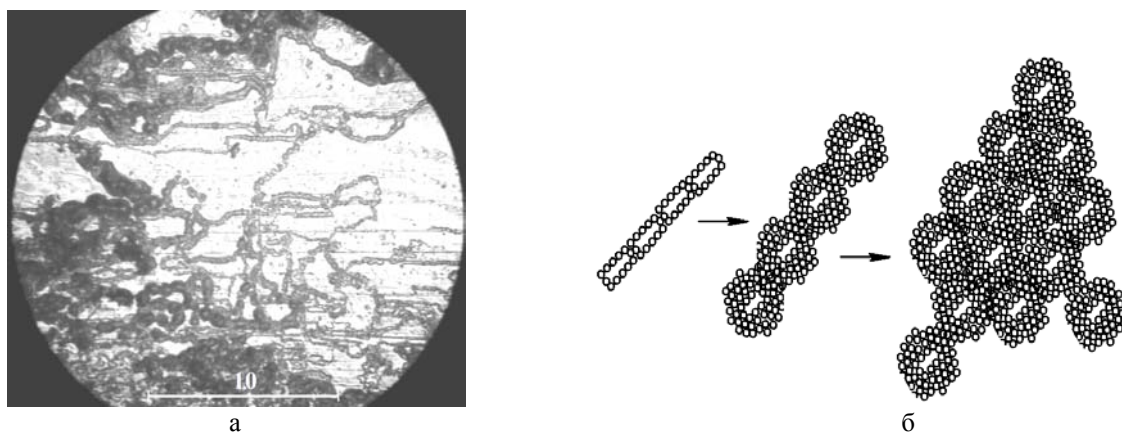


Рис. 6. Агломерація поляризованих часток адсорбованих молекул та окислів при виході з активованої області контакту (а). Механізм агломерації (б)

При подальшому збільшенні нормального тиску у міжконтактному просторі частинки окислів перетворюються у щільні та тверді скупчення, які відіграють роль абразиву у присутності вільних металевих ділянок або у захисний шар при формуванні третього тіла (рис. 7).

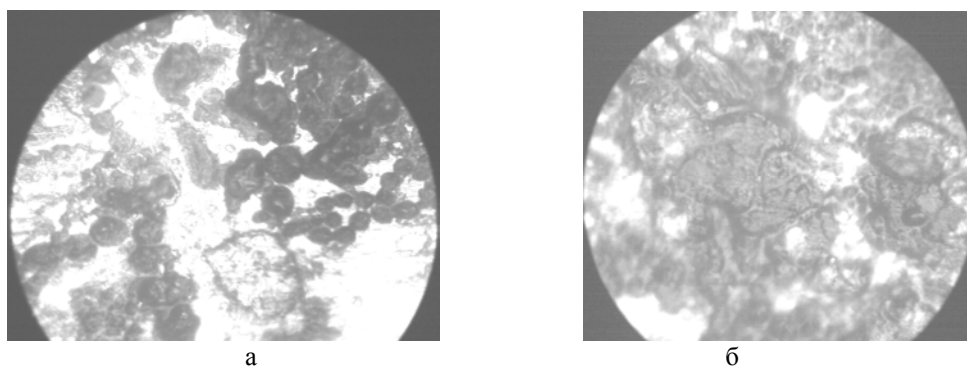


Рис. 7. Формування третього тіла з продуктів механічних реакцій в умовах мало амплітудного фретингу: а – стан відносної рухомості продуктів фретингу, б – утворення щільних нерухомих часток

В кінці 30-х років П.А. Ребіндер висунув гіпотезу про зменшення міцності матеріалів в присутності поверхнево-активних речовин [8, 9]. А у 1968 році ним же був проведений перший семінар з механохімії [10].

Підсумуємо принципові відмінності у протіканні механічних реакцій малоамплітудного фретингу від звичайних хімічних перетворень:

- Пружна взаємодія в контакті підвищує внутрішню енергію реагентів. В контексті цього важливо, що термодинамічні параметри вихідних реагентів, проміжних речовин і кінцевих продуктів фретингу відрізняються від стандартних значень. Це призводить до відмінностей констант рівноваги й ентальпії реакції.

- Робота мікродеформацій витрачається на подолання енергетичного бар'єру, який розділяє в елементарних станах вихідний та кінцевий стан системи.

- Для активації поверхонь при мікропереміщеннях вигідна низька температура ($t < 0,5 t_{\text{плавлення}}$). В цих умовах різні форми теплового руху загальмовані і в тому числі поступальна дифузія. Незрівноважені стани відносно стійкі й встигають проявити себе в хімічних реакціях. Рухомість необхідна для здійснення реакцій, при низькій температурі забезпечується пластичною деформацією контакту.

Таким чином, трансформація локальних місць контакту через механічні ланцюгові реакції можна охарактеризувати як нетеплові, бездифузійні, незрівноважені. Активація й наступний синтез продуктів фретингу кількісно описується величиною енергетичного виходу, як відношення кількості продуктів, що утворюються під час фретингу до витрат енергії (моль/Дж). Відмітимо, що продуктами за П.А. Ребіндером можуть бути як синтезовані речовини, так і носії надлишкової енергії: точкові дефекти, атоми на лініях дислокацій або ювенільних поверхнях, електрони емісії або збурений стан складових кристалічної ґратки.

Література

1. Костецкий Б.И. Трение. Смазка и износ в машинах. – К.: Техніка, 1970. – 396 с.
2. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении. – К.: Техніка, 1976. – 293 с.
3. Johnson K.L. Contact Mechanics Cambridge University Press 1985
4. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. – М.: Металлургия, 1976 – 236 с.
5. Семенов А.П. Схватывание металлов. – М.: Машгиз, 1988. – 280 с.
6. Шевеля В.В., Калда Г.С. Фретинг-усталость металлов // Технологический университет Подолья,

1998. – 299 с.

7. Лихтман В.И. Физико-химические явления при деформации металлов // Успехи физических наук. – Т.LIV. – 4 вып. – 1958.

8. Ребиндер П.А. Новые методы физико-химических исследований / АН СССР, 1950.

9. Ребиндер П.А. Zeits.Phys., 1931. – Т.72. – С. 91-108.

10. Ребиндер П.А. О природе трения твердых тел. – Гомель, 1969

Надійшла 10.3.2008 р.