

**ЕФЕКТ СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ**

*Викладено результати досліджень методики випробувань металевих поверхонь на зношування*

*The results of researches of tests metallic surfaces method are expounded on a friction*

Ключові слова: металева поверхня, структура, зносостійкість, методика

**Вступ та постановка задачі**

Металева поверхня у сенсі макрооб'єкту існує тільки як математичне поняття, тобто представляється певним геометричним місцем точок або сукупністю геометричних об'єктів, яка в тій чи іншій мірі наближається до деякої уявної множини матеріальних часток, котрі і становлять субстанцію поверхневого шару. Поверхню слід розглядати як особливу різновидність дефектів, оскільки вона руйнує періодичність твердого тіла в одному напрямку – перпендикулярно поверхні в сторону зовнішнього середовища. Ця теза в певній мірі підтверджується відомим з теорії і практики хімічних процесів фактом значного прискорення реакції при наявності на поверхні твердих каталізаторів, тобто саме граничний шар, структура якого в певній мірі відрізняється від власне основи твердого тіла, може більш активно взаємодіяти із зовнішніми чинниками, що стимулюють модифікацію поверхні. В той же час саме наявність реальної поверхні як структури з певною характерною для кожного конкретного її типу впорядкованістю, є тим стимулом, завдяки якому відбуваються більшість фізичних або хімічних процесів взаємодії твердого тіла з навколишнім середовищем. Оскільки поверхня як математичне поняття не може мати структури, то її слід розглядати як сукупність дефектів або аперіодичності кристалічної решітки, апроксимованих саме вибраним типом математичної моделі. Проте в ній в межах кожного шару продовжує зберігатись двомірна впорядкованість [1], а під її структурою слід розуміти структуру твердого тіла в околі поверхні. Цю частину твердого тіла поблизу математичної поверхні, або приповерхневий шар, допустимо розглядати як трьохмірну структуру, що відрізняється від самого твердого тіла, оскільки в межах декількох атомних шарів може включати атомні вузли, відмінні від атомних вузлів основного об'єму, при цьому відстань між шарами у напрямку по нормалі до поверхні не тільки дещо відрізняється від параметрів решітки основного об'єму, але й має змінний характер, як правило – в сторону збільшення в міру наближення до математичної поверхні. Проте не слід забувати, що приповерхневий шар є кристалічною структурою, для якої зберігається двомірна періодичність в площинах, котрі паралельні математичній поверхні. Таким чином, із зазначеного логічно повинен витікати висновок щодо того, що порушення вказаної природної періодичності приповерхневих шарів неминуче певним чином впливає на всі характеристики поверхні як суцільності, в тому числі – на її здатність чинити опір зношуванню. Ця обставина в більшій чи меншій мірі відзначалась в класичних роботах з трибології [2-7], проте належного висвітлення результатів досліджень, на основі яких можна було б формувати практичні методики експериментів щодо визначення характеристик зносостійкості металевих поверхонь, ні в цих, ні в інших працях не відзначається.

Окрім впливу структури приповерхневих шарів безпосередньо на процес зношування поверхні, слід також відзначити суттєву роль цього фактора для інших супутніх процесів та видів зношування. Відомо, що при адсорбції газів, тобто концентруванні компонентів газового середовища на поверхні, утворюється мономолекулярний адсорбційний шар – моношар [4]. Заповнення поверхні, тобто міра суцільності моношару, при малих значеннях тиску пропорційне тиску адсорбату в газовому середовищі. Якщо молекули газу з огляду на наявність сильного хімічного чи фізичного зв'язку не мають можливості переміщуватись по поверхні, то це – локалізована адсорбція з утворенням адсорбційного комплексу. При цьому адсорбат і приповерхневий шар можуть утворювати свою власну двомірну структуру. Швидкість адсорбції залежить від показника суцільності моношару, тобто при наближенні до стану суцільного заповнення поверхні адсорбційним шаром вона поступово зменшується до нуля і навпаки, в протилежному напрямку зростає швидкість десорбційних явищ. Хемосорбовані та фізично сорбовані частки газу на поверхні відрізняються типом електронного зв'язку адсорбата з основою. Якщо електронний стан адсорбованої молекули терпить значні зміни аж до утворення хімічних зв'язків з поверхнею, то мова йде про хемосорбцію. В разі, коли молекула утримується на поверхні силами Ван-дер-Ваальса, обумовленими поляризацією незбудженої молекули, то такий вид адсорбції відноситься до фізичної адсорбції. Верхня межа для фізичної адсорбції становить всього 0,6 еВ. Енергія хемосорбції як правило знаходиться в межах 1...8 еВ [1, с. 378]. Якщо енергія молекули зовнішнього середовища становить декілька електрон-вольт, то вона вже зможе перебороти потенціальний бар'єр приповерхневого шару, проникнути в глибину її, причому обмін електронами між атомами створить умови для хімічної сорбції чи хімічної реакції [9, с. 241]. Очевидно, що механічний вплив на поверхню в значній мірі змінює параметри адсорбційних явищ, що також не може не впливати на процеси зношування. Суттєвий вплив на хід руйнування поверхні надає значення роботи виходу, а також кристалічна структура поверхні. Дійсно поняття роботи виходу у значній мірі умовне з огляду на умовність терміну «поза поверхнею», оскільки саме від відстані до поверхні як математичної категорії залежить потенціальна енергія. Крім того, реальна поверхня структурно неоднорідна, з різною

кристалічною орієнтацією окремих фрагментів, деякі з них знаходяться в прискорюючому полі, інші – в гальмівному. Щільно запаковані кристалічні грані характеризуються високими значеннями роботи виходу, навпаки, атомно-неоднорідні або нещільно запаковані – малими. За наявності абсорбційного шару виникає додатковий поверхневий подвійний шар, який теж суттєво впливає на величину роботи виходу.

Із зазначеного вище слідує висновок стосовно важливості врахування параметрів процесу зношування та інших умов, котрі характеризують цей процес, на об'єктивність результатів досліджень, особливо в аспекті їх аналізу та формування практичних рекомендацій.

**Результати досліджень.** В роботі [10] були проаналізовані результати досліджень зносостійкості, які одержані в умовах граничного тертя. Головні висновки з аналізу зводились до того, що будь-який процес зношування є сукупністю послідовного ущільнення приповерхневих шарів та їх видалення. При цьому вирішальне значення мають параметри випробувань, які повинні вибиратись з огляду на матеріал та попередню обробку поверхні. Результати експериментів свідчать про те, що в умовах граничного тертя надзвичайно важко, а в деяких випадках неможливо використовувати такі значення питомого тиску на поверхню тертя, при яких реальним було б співставлення результатів, одержаних для різних взірців, виготовлених з різних марок матеріалів та оброблених за допомогою різних технологічних процесів. Оскільки в ході випробувань забезпечувалось постійне змашування зони тертя, то до певного значення тиску на поверхні тертя був присутній шар мастила, що призводило до надзвичайно малих показників лінійного зношування. Проте залежно від характеристик модифікованої поверхні існувало критичне значення тиску, при якому шар мастила витискувався із зони тертя, що призводило до миттєвого схоплювання поверхонь. Про наявність ущільнення і, таким чином, структурних перетворень поверхні свідчить той факт, що при поступовому збільшенні тиску вдавалось досягати відносно великих значень критичного тиску. Спроба зразу ж проводити на нових взірцях випробування при тиску, близькому до цих критичних значень, неминуче викликала схоплювання поверхонь. Причиною подібного явища могло бути тільки поетапне ущільнення поверхні та її зміцнення, природно – зі зміною структури приповерхневого шару. Зазначене разом з неможливістю об'єктивного порівнювання результатів випробувань, отриманих при різних тисках, пояснює необхідність переходу до схеми експериментів при сухому терті. Деякі результати попередніх випробувань показані на рис. 1.

Насамперед, з рис. 1 слідує висновок, що в режимі сухого тертя суттєво зростає інтенсивність процесу зношування, що призводить до аналогічно значного підвищення продуктивності експериментальних досліджень (в деяких випадках один експеримент в режимі граничного тертя тривав тижнями, в режимі сухого – в деяких випадках вдавалось виконати за декілька змін). Крім того підтвердилась теза стосовно вирішальності впливу на інтенсивність зношування тиску на поверхні тертя, оскільки одні і ті ж показники лінійного зносу  $d$  досягались зі збільшенням тиску при суттєво більшому шляхові тертя  $L$ . Марка матеріалу (початкові значення фізико-механічних показників) в сукупності з наявною модифікацією поверхні також суттєво впливали на інтенсивність зношування. Так, наприклад, для азотованої в тліючому розряді сталі 38Х2МЮА в деяких випадках інтенсивність зношування практично на порядок менша в порівнянні зі сталю 20. На відміну від методики експериментальних досліджень, оснований на принципі застосування граничного тертя, в режимі сухого тертя результатів можливо досягти при однакових значеннях тиску практично для всіх сталей, що виключає при аналізі результатів досліджень питання порівнянності. Про важливість цього положення свідчить співставлення кривих зношування для одних і тих же сталей при різних значеннях тиску (рис. 1). Оскільки одне і те ж значення лінійного зносу для одного матеріалу, але при різному тиску, досягається при суттєво різних значеннях шляху тертя, то встановлення взаємозв'язку між перерахованими факторами становило би певну проблему. Графіки на рис. 1 підтверджують вплив на інтенсивність зношування фізико-механічних параметрів поверхні та її модифікації, при цьому міцніші сталі, а також сталі, котрі пройшли певну

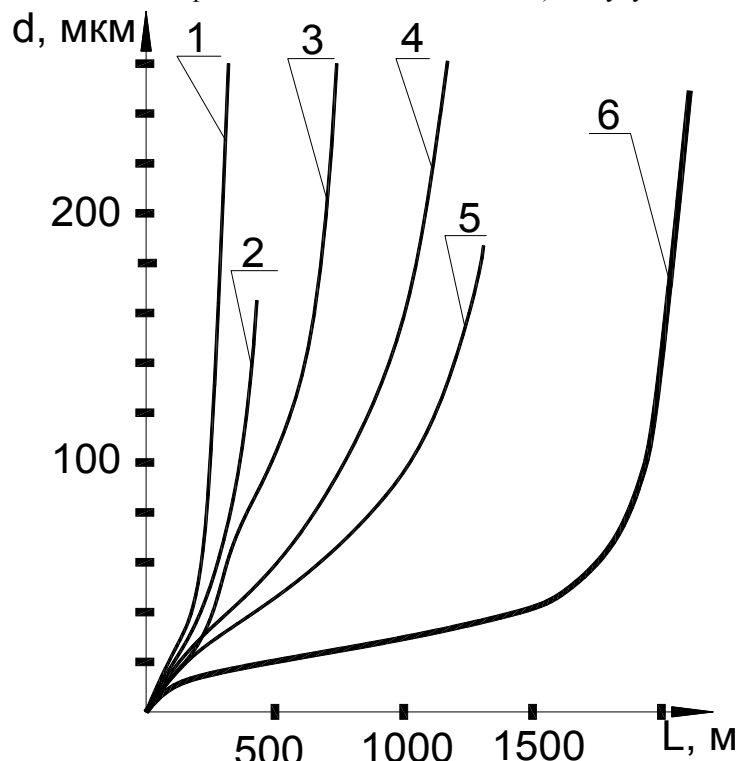


Рис. 1 Залежність лінійного зносу від шляху тертя та тиску:  
 1 – сталь 20,  $p=16$  МПа; 2 – сталь 45,  $p=16$  МПа; 3 – сталь 20,  $p=10$  МПа;  
 4 – сталь 40Х,  $p=16$  МПа; 5 – сталь 45,  $p=10$  МПа;  
 6 – сталь 38Х2МЮА,  $p=16$  МПа

модифікаційну обробку, зношуються при однакових умовах (тиск та швидкість відносного руху, яка для всіх експериментів становила 0,1 м/с) з меншою інтенсивністю, що на графіках відповідає куту їх нахилу.

Ефект структурних перетворень поверхні підтверджується рисунком 2, на якому приведені результати фіксації лінійного зносу з малим інтервалом шляху тертя. Графік зношування в цьому випадку являє собою ступінчасту криву слідування періодів утворення зміцнених структур на поверхні, коли зношування практично відсутнє, та періодів руйнування цих поверхневих структур. Для модифікованих поверхонь подібне явище особливо характерне в початковий період, коли зношується зона нітридів та внутрішнього азотування. Встановлене ще одне важливе для аналізу впливу результатів модифікації на параметри зносостійкості поверхні явище – ефект релаксаційних процесів в приповерхневих шарах, котрі вже набули деяких структурних перетворень під дією тиску в зоні тертя.

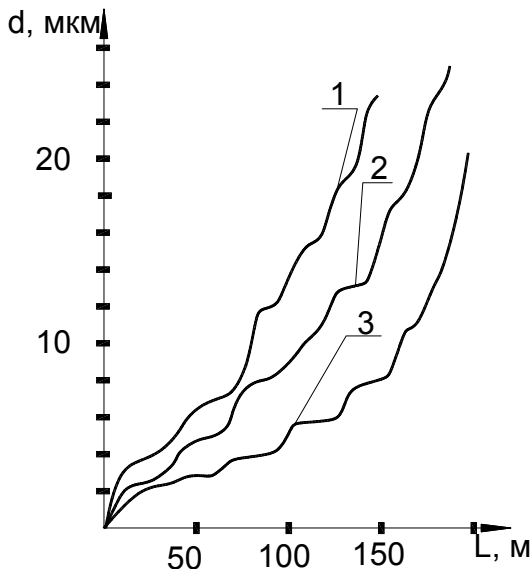


Рис. 2 Характер зношування поверхні в початковий період (1- сталь 20, 2 – сталь 40X, 3 – сталь 39X2МЮА)

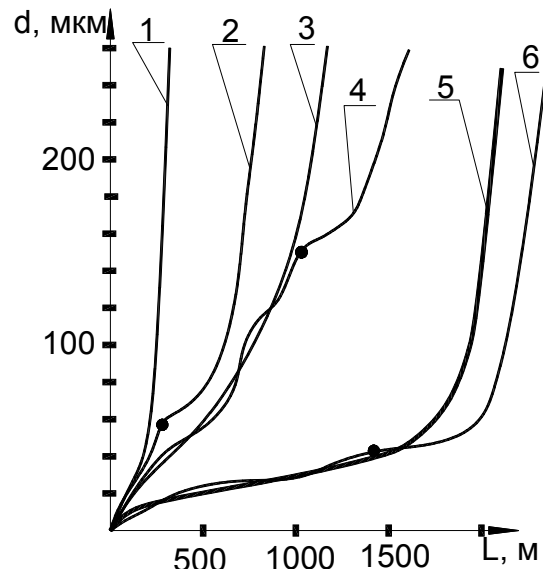


Рис. 3 Ефект релаксаційних структурних перетворень поверхні (1, 2 – сталь 20; 3, 4 – сталь 40X, 5, 6 – сталь 38X2МЮА)

Чорними точками на графіках 2, 4, 6 зафіксовані точки, коли випробування на зносостійкість призупинялись і відновлювались наступної доби. Для всіх сталей відмічається деяке сповільнення процесу зношування після перерви з поступовим поверненням до інтенсивності, характерної для певної марки сталі. Причиною зазначеного явища можуть бути тільки релаксація напружень, вирівнювання характеристик структури в приповерхневих шарах, причому наслідком всього цього може бути зміцнення поверхні, що і пояснює зниження інтенсивності процесу зношування. З часом в міру руйнування зміцненого прошарку показники стану поверхні стають рівними з тими, що були до перерви і інтенсивність зношування відновлюється.

### Висновки

1. Дослідження зносостійкості при сухому режимі тертя забезпечує суттєво більшу продуктивність експериментів.
2. На відміну від експериментів при граничному терті сухе тертя може застосовуватись для різних сталей при однаковому значенні тиску, що виключає проблему порівнянності результатів та сприяє об'єктивності висновків стосовно ефективності різних процесів модифікації. За результатами попередніх експериментів таким компромісним значенням тиску може бути 16 МПа.
3. Встановлений ефект релаксаційних перетворень поверхневих структур, на основі чого рекомендується проводити дослідження зносостійкості протягом однієї безперервної сесії.

### Література

1. Вудраф Д. Современные методы исследования поверхности / Вудраф Д., Делчар Т. – М.: Мир, 1989. – 564 с.
2. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Справочник по триботехнике / [под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе]: в 3 т. Т. 1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение; 1989. – 400 с.
4. Словарь-справочник по трению, износу и смазке / [Е. Л. Швидков, Д. Я. Ровинский, В. Д. Зозуля, Э. Д. Браун]. – К.: Наукова думка. – 1979. – 188 с.
5. Крагельский И.В. Узлы трения машин: Справочник / Крагельский И.В., Михин Н.М. – М.: Машиностроение, 1983. – 320 с.

6. Гаркунов Д.Н. Триботехника: [учебник для студентов вузов]. – [2-е изд.]. – М.: Машиностроение. – 1989. – 328 с.
7. Долговечность трущихся деталей / [под ред. Д. Н. Гаркунова]. – М.: Машиностроение. – 1986. – Вып. 1. – 264 с.
8. Справочник химика: Т.1 – [2-е изд.]. – Л. – М.: Госхимиздат, 1962. – 1071 с.
9. Плешивцев Н.В. Катодное распыление / Плешивцев Н.В. – М.: Атомиздат, 1968. – 339 с.
10. Пастух І.М. Дослідження зносостійкості при граничному терті азотованих металевих поверхонь / Пастух І.М., Лук'янюк М.В., Здибель О.С // Вісник ХНУ, Хмельницький, 2010, № 3. – С. 15-20.

Надійшла 15.11.2010 р.

УДК 519.832.3+004.032.26

В.В. РОМАНЮК  
Хмельницький національний університет

## ВИКОРИСТАННЯ МІНІМАКСНОГО ПРИНЦИПУ У ПРОГНОЗНОМУ КОНТРОЛІ КОРПУСНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕДУРИ МІНІМІЗАЦІЇ ПОМИЛКИ

*Пропонується антагоністична модель для оптимізації вибору процедури мінімізації помилки для нейромережевої моделі контролю. Показано, що відповідна гра розв'язується у чистих стратегіях, що значно спрощує реалізацію запропонованого мінімаксного принципу.*

*There is suggested an antagonistic model for optimizing the selection of the error minimization routine within neural net control model. It has been shown, that the corresponding game is solved in pure strategies, what simplifies the suggested minimax principle realization considerably.*

Ключові слова: математична модель, імітаційна модель, динамічна модель, нейромережа, антагоністична гра, оптимальна стратегія, мінімаксний принцип, MATLAB Simulink®, блокова модель, процедура мінімізації помилки.

### Постановка й актуальність проблеми у загальному виді

Моделювання і прогнозування складних систем та об'єктів є безперечно важливим етапом перед їх введенням у дію або експлуатацію. Натурне моделювання тут зазвичай є практично неможливим, тому застосовують або виключно математичні моделі, або їх імплементацію у структурні блокові моделі. Одним з найкращих засобів для блокового моделювання є середовище MATLAB Simulink®, де містяться демонстраційні приклади для імітаційного моделювання декількох динамічних систем [1, 2] з можливістю [3] їх уточнення або добудовування. Серед цих динамічних блок-моделей є нейромережева система прогнозного контролю концентрації корпусного ядерного реактора (рис. 1 з файлу predcstr.mdl), у якій нейромережа використовує одну з п'яти наявних процедур мінімізації помилки (за умовчанням, процедура CSRCHBAC — One-dimensional minimization using backtracking for the NN Predictive Controller). Однак при увімкненні деяких інших процедур виявляються подекуди кращі результати, ніж дає процедура CSRCHBAC. Щоправда, ці результати залежать від часу імітації.

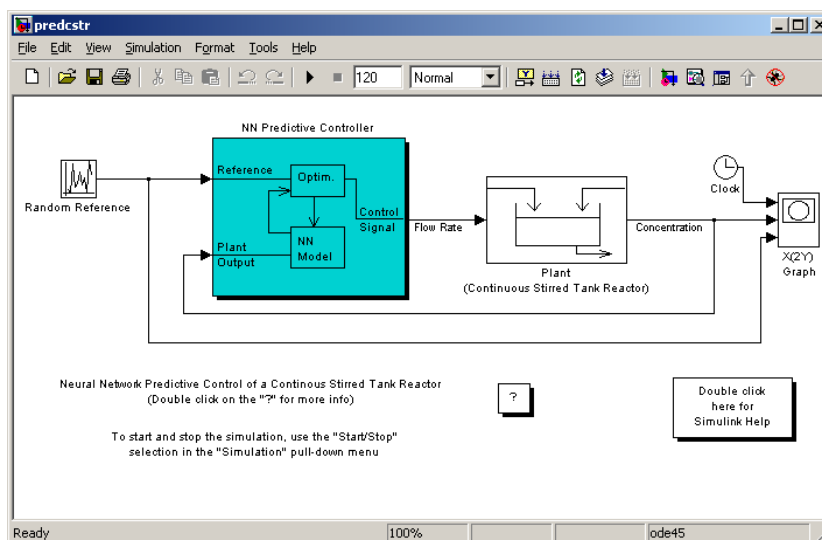


Рис. 1. Блок-модель нейромережевого прогнозного контролю концентрації корпусного ядерного реактора у MATLAB Simulink®

**Аналіз останніх досліджень і публікацій за предметом дослідження та окреслення питання  
щодо неоднозначності вибору параметрів нейромереж**