

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПІСЛЯ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

*Проаналізовані та обґрунтовані питання розробки методики випробувань на зносостійкість деталей пар тертя після модифікації їх азотуванням в тліючому розряді.*

*The analysis is executed and the development methods questions of tests by durability of tribological situation after their modification by nitriding in a glow discharge.*

Ключові слова: азотуванням в тліючому розряді, дослідження зносостійкості.

Зносостійкість деталей після азотування в тліючому розряді, головним чином, визначається властивостями модифікованого поверхневого шару, а також в певній мірі впливом технологічного процесу на фізико-механічні характеристики основи. Останнє, насамперед проявляється у випадку, коли параметри технології підібрані невдало та призводять до зниження міцності матеріалу, який безпосередньо знаходиться під модифікованою поверхнею. Доречно також зазначити, що цей фактор в максимальній мірі відслідковується в тому випадку, коли схема випробувань передбачає одночасне зношування як основи, так і модифікованого поверхневого шару.

В загальному вигляді певний параметр зносостійкості визначається:

$$Z(x) = z \left( h \left( H_m, H_0, \frac{dH}{dp}, \frac{dH}{dx} \right), r \left( R_K, R_0, \frac{dR_V}{dx} \right), P \left( p, \frac{dp}{dt}, \frac{dp}{dy} \right), q(A_K, R_K, \theta), v(V) \right), \quad (1)$$

де  $h$  – функція впливу твердості,

$H_m$  – максимальна твердість досліджуваного зразка,

$H_0$  – твердість основи,

$dH/dp$  – характер впливу зміни тиску на поверхні контакту,

$dH/dx$  – градієнт зміни твердості в напрямку нормалі до поверхні,

$r$  – функція впливу шорсткості поверхонь контакту,

$R_K$  – параметр шорсткості поверхні контртіла,

$R_0$  – параметр шорсткості поверхні зразка,

$R_V/dx$  – градієнт зміни приведенного параметра шорсткості поверхонь контакту в міру зношування

зразка в напрямку нормалі до поверхні,

$P$  – функція впливу тиску на поверхні контакту,

$p$  – номінальний тиск на поверхні контакту,

$dp/dt$  – градієнт зміни тиску в часі,

$dp/dy$  – градієнт зміни тиску в напрямку дотичної до поверхні,

$\theta$  – параметр впливу виду тертя (сухе, граничне чи рідинне),

$q$  – функція впливу абразивних властивостей поверхні контртіла,

$A_K$  – параметр абразивних властивостей контртіла,

$v$  – функція впливу відносної швидкості взаємного руху зразка і контртіла,

$V$  – відносна швидкість руху зразка і контртіла.

Очевидно, що ця надзвичайно складна багатофакторна модель зносостійкості, яка, до речі, далеко не в повній мірі адекватна реальним процесам зношування, малоімовірно може відобразитись однією універсальною залежністю. Крім того, деякі з параметрів (факторів) впливу наведені в загальному вигляді і потребують окремого обґрунтування. Проте для задач аналізу, що і складає мету даної роботи, подібна інтерпретація цілком прийнятна. Додаткового пояснення потребують тільки деякі з них. Характер зміни тиску на поверхні контакту відображає властивість його ущільнювати структуру поверхневого шару. З цієї причини в міру зростання тиску змінюється мікроповерхнева твердість (рис. 1), що в свою чергу призводить до суттєво іншого характеру взаємодії поверхонь, котрі контактують. Наприклад, якщо тиск в зоні контакту буде змінюватись поступово, починаючи від малих значень, то пара тертя буде працездатною до достатньо великих значень тиску. При цьому мається на увазі, що кожна нова ступінь тиску супроводжується відносним рухом зразка і контртіла протягом певного часу. Якщо ж зразу ж встановити тиск на рівні максимально досягнутого значення, то в більшості випадків спостерігається заїдання. Аналогічні дані по фрикційному зміцненню поверхні наведені [2, с. 221]. Про глибину ущільненого прошарку говорить наступний експеримент. Встановлено, що, наприклад, для зразків з термічно необробленої сталі 45 при рідинному режимі тертя і тиску в зоні контакту 14-18 МПа після 35 км лінійний знос практично перестає змінюватись. Видалення шару товщиною 12-24 мкм поновлює процес інтенсивного зношування, але він знову призупиняється вже через 3 км шляху, за чим слідує нове видалення шару товщиною 17-30 мкм. Далі процес зношування загальмовується вже через один кілометр шляху, після чого з двох зразків видалюється

прошарок поверхні, на одному його залишали і вимірювали мікротвердість. В кінцевому результаті мікротвердість зростає від початкового значення  $HV_{0,05}$  215 до  $HV_{0,05}$  293 для зразка, з якого в останньому циклі видалено 20 мкм, до  $HV_{0,05}$  303 для зразка, з якого видалено 10 мкм і до  $HV_{0,05}$  615 для зразка, з якого поверхневий шар не видалявся.

Градієнт зміни приведенного параметра шорсткості повинен відображати процес взаємного припрацювання та стабілізації шорсткості обох поверхонь контакту в міру їх зношування. Причому характер зміни шорсткості обох поверхонь в процесі виходу в зону контакту все нових прошарків тіл пари тертя може теж змінюватись, особливо в тих випадках, коли властивості цих прошарків будуть суттєво відрізнятись від початкових.

Відомі методики випробувань на зносостійкість [1-7] класифікуються по групі критеріїв, наведених нижче. Відносний рух зразка та контртіла може бути поступальним або обертальним. Сила тиску стосовно

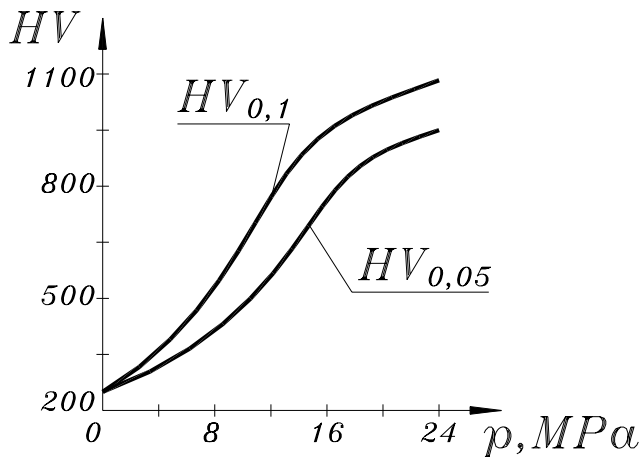


Рис. 1. Ріст поверхневої мікротвердості зразків зі сталі 45 при збільшенні тиску в зоні контакту та заїданні в парі тертя

поверхні модифікованого шару направлена перпендикулярно або під деяким кутом. Схеми початкового контакту зводяться до наступних: площина – площина, конус – площина, сфера – площина, сфера – сфера, циліндр – площина, циліндр – циліндр, клин – площина. По фактору відносного руху елементів пари тертя використовуються варіанти: рухомий зразок, рухоме контртіло, рухомі обидва елементи пари. Контрольованим параметром може бути лінійний, об'ємний або масовий знос. Азотуватись можуть як окремі взірці, так і групи зразків в головці, державці тощо. За формою використовуються взірці у вигляді стержнів різних форм перетину (пальці), чашки (тарілки). Випробування залежно від реальних умов експлуатації пари тертя проводяться при сухому, граничному або рідинному терті.

При всій простоті реалізації обертального відносного руху проблематично врахувати такий суттєвий фактор як швидкість цього руху, оскільки вона змінюється від деякої мінімальної (гранично – від нуля) до максимальної при найбільшому радіусі обертання. Поступальний рух зразка чи контртіла може виконуватись або по схемі зворотно-поступального, або як швидкість обертального руху контртіла при нерухомому взірці чи зразка, котрий обертається по колу достатньо великого радіуса стосовно нерухомого контртіла. Зворотно-поступальний рух має точки повернення, коли швидкість дорівнює нулю. Крім того, практично при використанні будь-якого відомого шарнірно-важільного механізму в якості приводу, швидкість руху не може бути постійною протягом всього циклу. Єдиним більш-менш суттєвим недоліком схеми, в якій обертається контртіло є певна різниця швидкостей в різних точках зразка, що в деякій мірі нівелюється при відносно малих розмірах зразка в напрямку радіуса обертання контртіла. Як правило, сила тиску в зоні контакту нормальна до поверхні контакту. Похиле прикладання цієї сили має сенс для схеми поступального руху зразка, що дозволяє дещо нейтралізувати дію сили тертя як збудника вібрації в парі тертя, котра в свою чергу провокує заїдання.

В принциповому плані при виборі схеми початкового контакту слід враховувати два найбільш важливих моменти: рівномірність розподілу тиску по поверхні контакту та фактор гомогенності структури поверхневого шару, на базі якого в даний момент формується поверхня тертя. Більш детально для деяких схем це питання висвітлено нижче. Вибір типу відносного руху має більш-менш суттєве значення тільки з точки зору складності конструктивної схеми устаткування для випробування на зносостійкість. При цьому вирішальним може, наприклад, виявитись питання жорсткості системи зразок – пристосування – контртіло. Саме цей фактор має значення для запобігання вібраціям та коливанням силової системи, що при недопустимих значеннях цього параметра може призводити до нерівномірності тиску на площадку контакту в часі, а також викликати заїдання поверхонь. Крім того важливу роль у виборі схеми відносного руху відіграє конструктивна можливість закріплення зразків, забезпечення їх самовстановлювання, жорсткості вузла, симетричності навантаження на контртіло тощо.

Найбільш точніші та об'єктивніші дані зношування фіксуються за параметром лінійного зносу. При його контролі є декілька варіантів фіксації даних, але всі вони (на відміну від методу контролю масового чи навіть об'ємного зносу) мають ту перевагу, що не супроводжуються зняттям зразків та їх повторною установкою. На жаль, в цьому випадку неможливо встановити зразок точно в те ж саме положення, тобто в кожному новому циклі випробувань процес починається з фази припрацювання, а це унеможливує будь-яке об'єктивне співставлення результатів дослідження. Спроба обійти цю проблему приводила до варіанту азотування групи зразків у спеціальній державці. Перед азотуванням взірці в головці точно виставляються і підганяються до поверхні контртіла. Проте, не дивлячись на те, що азотування в тліючому розряді практично не викликає формозміни, певна деформація положення зразків має місце. Крім того, в більшості варіантів конструкції закріплення зразків можливе розслаблення з'єднання, тобто незмінність орієнтації

зразків стосовно певної базової площини не гарантується.

Форма зразків в основному залежить від вибраного типу випробувальної схеми. Головний недолік тарілчастої форми полягає в тому, що збільшуються витрати матеріалів на виготовлення зразків. Крім того діаметральні розміри їх відносно невеликі, а товщина стінки (ширина кільця контакту) регламентується з умови усталеності на згин. Тому відношення товщини стінки до зовнішнього діаметра досить значне, що і спричиняє суттєву різницю швидкостей по ширині площадки контакту, а значить – певну складність аналітичної обробки результатів досліджень.

Щодо видів тертя, які покладені в основу випробувальної схеми, слід зазначити певну нечіткість визначення і, відповідно, регламентації реалізації граничного тертя. Недоліки схеми з рідинним тертям зводяться до гарантованості цього режиму тільки в умовах забезпечення його гідростатично або гідродинамічно. Крім того в міру підвищення тиску не виключено для гідродинамічного варіанту миттєве видавлювання шару мастила із зони контакту, самовільного переходу до режиму граничного і навіть сухого тертя, що неминуче і зразу ж викликає заїдання поверхонь.

Ще одну складність з точки зору ідентифікації та систематизації результатів досліджень зносостійкості становлять деякі особливості схем контакту тіл пари тертя, про що зазначалось вище. Очевидно, що найпростіше задачі подібного класу вирішуються для схеми площина-площина. Тоді має місце послідовне зняття прошарків модифікованого поверхневого шару, причому в будь-який поточний момент часу поверхня тертя має гомогенну структуру. Схема взаємодії тіл пари тертя по типу сфера – площина показана на рис. 2.

В початковий момент процесу зношування контакт сфери з площиною має форму круга, діаметр якого  $d_0$  визначається з розв'язання задачі Герца для точкового контакту. Максимальний діаметр круга контакту  $2\delta_M$ , який складається ще тільки з модифікованого шару відповідає перетину 2 на рис. 2. Далі структура площадки контакту ускладнюється, оскільки вона в довільному перетині 3 включає кільце модифікованого шару шириною  $\delta_x = \delta / \sin \varphi$  та круг основи діаметром  $2\rho_0 \sin \varphi$ . Оскільки ширина кільця модифікованого прошарку змінюється від найбільшого  $\delta_M = (2\rho\delta - \delta^2)$  до мінімального, який дорівнює ширині модифікованого шару  $\delta$ , то відповідно змінюється структура системи основа-модифікований шар та співвідношення характеристик її компонентів. При цьому мається на увазі не тільки співвідношення площ (діаметр площадки контакту змінюється від  $d_0$  до зовнішнього діаметра зразка  $d$ ), але, що суттєвіше – співвідношення параметрів, котрі в основному визначають як зносостійкість, так і напружений стан в зоні контакту. Навіть якщо допустити, що механічні характеристики модифікованого шару однакові по всій його глибині, то згідно з основними положеннями теорії пружності [8] напруження стиску при рівності відносних деформацій пропорційні для зони пружних деформацій модулю пружності. Оскільки в модифікованому шарі модуль пружності  $E_M$  за основною метою модифікації більший модуля пружності основи  $E_0$ , то в будь-який момент процесу зношування долі реакції силі тиску в зоні контакту будуть пропорційні площа основи і модифікованого шару в перетині та їх модулям пружності. Відповідно тиск на площадку основи

$$p_0 = p_M E_0 / E_M, \quad (2)$$

де  $p_M$  – тиск на площадку модифікованого шару.

З (2) очевидно, що навіть при гомогенності структури модифікованого шару доля реакції силі тиску, яка відповідає модифікованому шарові, відрізняється від опосередкованого тиску, який визначається шляхом ділення сили тиску на загальну площу площадки контакту.

Ситуація ускладнюється з врахуванням того, що, як це слідує з рис. 2, твердість модифікованого шару змінюється по певному закону, котрий залежить в основному від марки матеріалу основи та технології азотування. В загальному варіанті твердість модифікованого шару від поверхні може дещо зростати, досягаючи на глибині  $\delta_m$  певного максимального значення  $H_m$ . Подібний характер зміни твердості

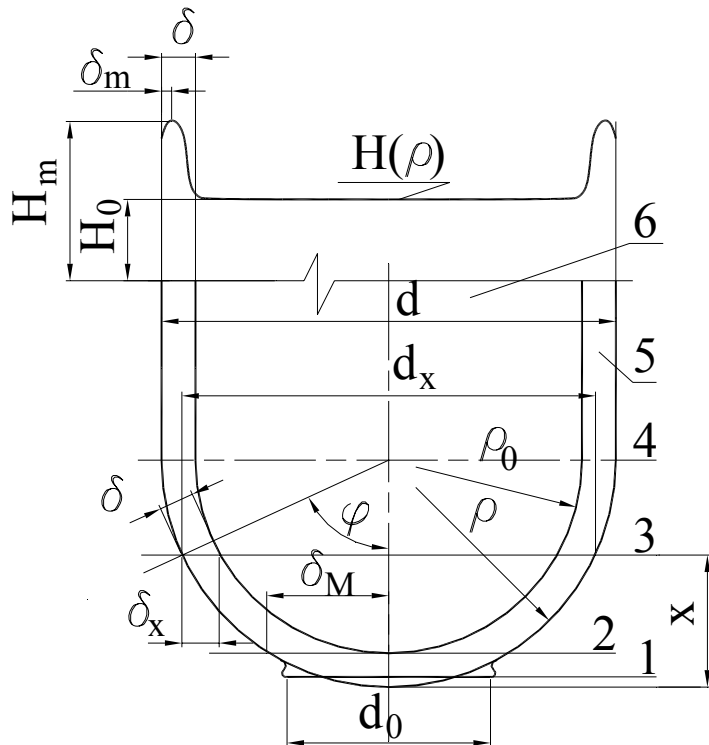


Рис. 2. Схема зношування пари сфера – площина:  
1 – прошарок початку зношування, 2 – прошарок максимальної ширини модифікованого шару, 3 – поточний прошарок з координатою лінійного зносу  $x$ , 4 – прошарок стабілізації ширини модифікованого шару, 5 – модифікований поверхневий прошарок, 6 – основа

пояснюється як зневуглицюванням поверхневого шару під впливом високої температури азотування, так і самим характером процесу модифікації, коли ударна дія падаючого потоку спричиняє переміщення нітридів, азоту і самого вуглецю в глибину модифікованого шару. В подальшому твердість його плавно з тим чи іншим градієнтом знижується до значення твердості основи  $H_0$ . Залежно від характеру зміни закон розподілу твердості може описуватись різними аналітичними залежностями, наприклад функцією виду

$$H(x) = H_0 + a e^{-b(x-\delta_m)^m}, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (3)$$

де  $a, b$  – масштабні коефіцієнти, які формують амплітуду виплесків твердості,  
 $m$  – парна степінь (2, 4...), яка визначає формозміну закону розподілу твердості по глибині модифікованого шару (координата  $x$ ).

В певних випадках можливе моделювання розподілу твердості по одному із законів тригонометричних функцій, наприклад

$$H(x) = H_0 + 0,5 a \left( \cos\left(\frac{x-\delta_m}{\delta}\right) + 1 \right), \quad 0 \leq x \leq \delta. \quad (4)$$

По порядку величин орієнтовні співвідношення значень залежно від конкретних умов азотування деталей пар тертя можна приймати:  $\delta=50 - 350$  мкм,  $H_m/H_0=1,5 - 5,8$ ,  $\delta_m/\delta=0 - 0,23$  (глибина шару максимальної твердості, якщо є зміщення його від поверхні – 16 – 25 мкм) [9].

Зносостійкість в значній мірі визначається твердістю поверхні, проте залежність між ними нелінійна. Це, насамперед, впливає з відомих даних стосовно структури модифікованого поверхневого шару, яку в загальному виді складають  $\epsilon$ -,  $\gamma$ - фази та  $\alpha$  – твердий розчин [9]. Абсолютні значення розмірів названих фаз можуть змінюватись в широких межах, рівно як і те, що деякі з них при певних технологічних умовах взагалі можуть бути відсутніми. Найбільшу твердість та, відповідно, модуль пружності має  $\epsilon$ - фаза, проте при цьому вона надзвичайно крихка. Тому при великих значеннях поверхневої мікротвердості, досягнутої якраз за рахунок цієї фази, спостерігається певне зниження зносостійкості. Причиною цього явища є те, що крихка фаза інтенсивно руйнується, а продукти її руйнування починають виконувати роль абразивів, що і призводить до інтенсифікації зношування. В загальному вигляді характеристика зносостійкості

$$j(H) = F(H(x)), \quad H_0 \leq H \leq H_m. \quad (5)$$

При цьому з врахуванням вищезазначеного стосовно впливу на зносостійкість фазового складу модифікованого шару залежність (5) по типу може бути аналогом (3) або (4).

Очевидно, що здатність поверхневого модифікованого шару зі змінним розподілом мікротвердості до опору зношуванню може характеризуватись деяким інтегральним показником

$$J = \int_{H_0}^{H_m} j(H) dH = \int_0^{\delta} F(H(x)) dx \quad (6)$$

Таким чином, оскільки в системі модифікований шар – основа в процесі зношування змінюються не тільки співвідношення площ цих двох компонентів, але і інтегральні показники опору зношуванню, то аналіз та порівняння даних представляє собою надзвичайно складну задачу. Якщо ж допустити, що з метою спрощення устаткування для випробувань сила тиску задається незмінною, то порівнювати між собою можна тільки дані, котрі відповідають одним і тим же параметрам лінійного зносу, тобто має сенс тільки співставлення залежностей зносостійкості від лінійного зносу. Це пов'язано, насамперед, з тим, що при сталій силі тиску на площадку контакту та безперервному збільшенню її площі тиск буде зменшуватись. Крім того, як зазначалось вище, зі зміною відношення геометричних характеристик відбуватиметься перерозподіл тиску в зоні контакту.

Характер взаємодії зразка та контртіла в разі, коли зразок має форму конуса або клина показано на рис. 3. В принциповому плані ця схема простіша рис. 2 тільки в тому, що на ділянці конічної частини ширина модифікованого шару не змінюється, оскільки залежить від кута загострення конуса (клина). Всі ж інші недоліки, встановлені вище для сфери, притаманні і цій схемі.

Принципово відрізняються умови зношування для схеми площина – площина, продемонстрованої рис. 4. В цьому випадку в будь-який момент процесу зношування будуть стабільними площа поверхні тертя, показник твердості, а, відповідно, інтегральний показник опору зношуванню. Основа вступає в процес зношування тільки після видалення модифікованого шару на торці зразка. Крім цих переваг є ще одна, яка

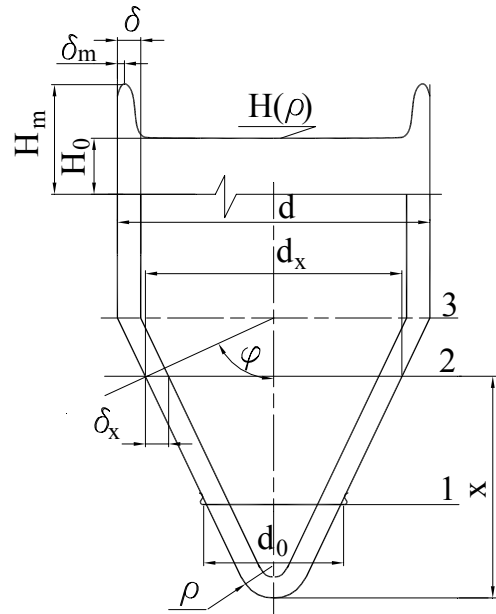


Рис. 3 Схема зношування пари конус (клин) – площина: 1 – прошарок початку зношування, 2 – поточний прошарок з координатою лінійного зносу  $x$ , 3 – прошарок стабілізації співвідношень розмірів схеми

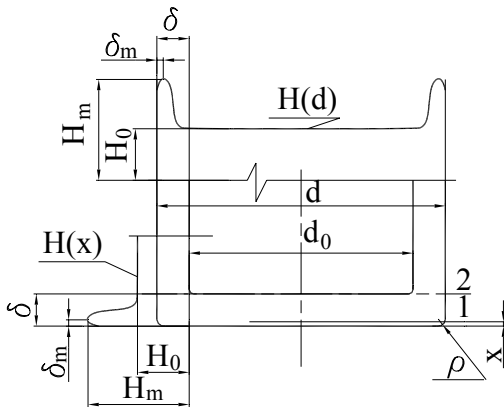


Рис. 4 Схема зношування пари площина – площина: 1 – прошарок початку зношування, 2 – прошарок виходу на основу

має принципове значення для реалізації концепції керованого формування трибосистем азотуванням в тліючому розряді – з'являється можливість співставлення показників зносостійкості з фазовим складом поверхні тертя, оскільки вона в будь-якому прошарку є практично гомогенною структурою.

З проведеного в роботі аналізу слідує висновок, що з усіх розглянутих схем дослідження зносостійкості зразків найбільш прийнятною як з точки зору порівнювання результатів, так і з огляду на розробку перспективної керованої технології формування трибосистем азотуванням в тліючому розряді слід признати схему площина-площина. В принципі форма поперечного перетину зразка може призначатись тільки з умови технологічності забезпечення необхідної точності розмірів. Деяку похибку на початку процесу зношування вносить неминуче закруглення ребра, проте його розмір незначний в порівнянні до діаметра зразка.

### Література

1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе в 3 т. Т. 1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с..
3. 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..
4. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 320 с.
5. Гаркунов Д. Н. Триботехника: Учебник для студентов вузов. – 2-е изд.. – М.: Машиностроение. – 1989. – 328 с..
6. Долговечность трущихся деталей / Под ред. Д. Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1986. – Вып. 1 264 с.; 1987. – Вып. 2. – 203 с.; 1988. – Вып. 3. – 245 с.
7. Кузьменко А. Г. Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Хмельницький: ТУП, 2002. – 151 с.
8. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах / Под ред. Н. А. Биргера. – М.: Машиностроение. – Т.1. 831 с.
9. Каплун В. Г. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах: Дис.... д.т.н.: 05.02.01. – Хмельницкий, 1992. – 450 с.

Надійшла 9.9.2009 р.

УДК 621.78/ (66.088+537.52+66.046)

І.М. ПАСТУХ, Н.С. МАШОВЕЦЬ  
Хмельницький національний університет

## ЕНЕРГЕТИЧНІ СПЕКТРИ ПРИ АЗОТУВАННІ ТИТАНУ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

*Розглянуті принципи формування енергетичних спектрів при азотуванні титанових сплавів в тліючому розряді.*

*Principles of shaping of energy distributions surveyed at a nitrogen hardening of titanium alloys in a glow discharge.*

Ключові слова: азотування титанових сплавів, енергетичні спектри.

В загальному вигляді при азотуванні в тліючому розряді падаючий потік, енергетична дія якого саме й формує модифікований поверхневий шар, складається з нейтральних та заряджених часток [1, 2]. Розроблена на базі цієї концепції енергетична модель покладена в основу теоретичного обґрунтування принципу керованого формування структури поверхні залежно від вимог експлуатації об'єктів модифікації. Запропонована система аналітичних критеріїв цілком адекватно відображає реальні процеси та результати модифікації [3 – 5], що дозволяє стверджувати про можливість не тільки проектувати технологічні процеси азотування в тліючому розряді, але і оптимізувати типові з метою пристосування їх до конкретних вимог, які висуваються до певних об'єктів азотування.

Енергетична модель реалізується на принципі сепарації енергетичних спектрів падаючого потоку