

В.І. Дворук, М.В. Кіндрачук, О.В. Герасимова

## Визначення поверхневої енергії металів при абразивному зношуванні

Національний авіаційний університет, пр-т Комарова, 1, Київ, 03058, Україна, тел. (044) 406-77-73,  
E-mail: [m\\_kindrachuk@ukr.net](mailto:m_kindrachuk@ukr.net)

Розроблено метод визначення поверхневої енергії металів при абразивному зношуванні на основі енергетичного підходу. Проведена оцінка працездатності запропонованого метода

**Ключові слова:** Абразивне зношування, зносостійкість, поверхнева енергія, міцність, деформація, дефекти кристалічної будови.

Стаття постуила до редакції 07.04.2006; прийнята до друку 15.06.2006.

Дія абразиву на метал при абразивному зношуванні здійснюється через поверхню останнього. В результаті такої дії утворюються частинки зносу, які мають дуже велику поверхню у порівнянні з вихідною поверхнею металу. Тому поверхня відіграє дуже велику роль у вченні про абразивне зношування.

В сучасних концепціях [1] поверхня розглядається не як різка перервність континууму, а як особливий перехідний шар на межі поділу двох фаз (тверде тіло-газ, тверде тіло-рідина тощо). Фізико-хімічні властивості цього шару суттєво відрізняються від властивостей в об'ємі металу, що пояснюється [2] надлишковою потенціальною енергією зовнішніх атомів. Основною характеристикою поверхні є поверхнева енергія – відношення надлишку енергії поверхневого шару до одиниці площі поверхні. Поверхнева енергія металу пропорційна його поверхні. Утворення частинок зносу, яке призводить до збільшення поверхні без зміни об'єму металу, повинно супроводжуватись зростанням поверхневої енергії і на цей процес повинна бути витрачена робота тертя. Робота тертя повністю витрачається на утворення нових поверхонь лише в тому випадку коли процес розкриття нових поверхонь відбувається абсолютно пружно [3]. Вона складає незначну частину від всієї енергії, що витрачена, і тому її вимірювання без ускладнень можливе лише для ідеально крихких тіл, яких в природі не існує. Всі тверді тіла можна умовно поділити на дві групи: крихкі та пластичні. При абразивному зношуванні крихких тіл робота тертя витрачається на пружні деформації на утворення теплоти і на утворення нових поверхонь. При абразивному зношуванні пластичних тіл (до яких належать метали) робота тертя витрачається на

пружні та пластичні деформації, на теплоту і на утворення нових поверхонь.

Більша частина роботи тертя пластичних тіл витрачається на пластичні деформації і роль роботи розкриття нових поверхонь відступає на другий план. При переході від пластичних тіл до крихких значення роботи розкриття нових поверхонь суттєво збільшується. Саме тому питання експериментального вимірювання поверхневої енергії для крихких тіл розроблені набагато краще ніж для пластичних [4].

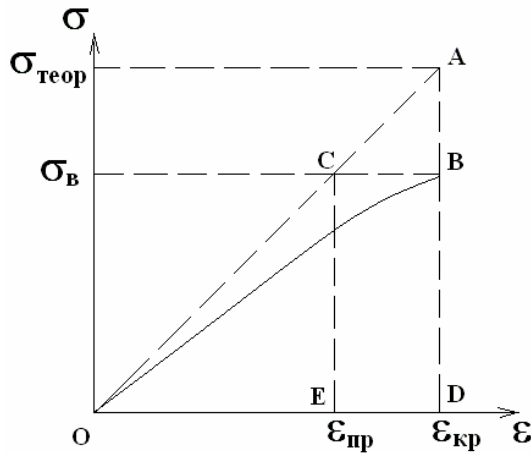
Ряд дослідників намагались пов'язати поверхневу енергію металів з питомою роботою тертя при абразивному зношуванні. Аналіз цього питання [5] показав, що між поверхневою енергією та роботою тертя існує зв'язок

$$\gamma = \frac{U}{const}, \quad (1)$$

де  $\gamma$  – поверхнева енергія;  $U$  – питома робота тертя.

Вираз (1) вказує на можливість використання абразивного зношування в якості методу визначення поверхневої енергії металів. Однак це питання потребує подальшого вивчення і відповідного обґрунтування.

Відомо [6], що абразивна зносостійкість – це характеристика руйнування металу. Руйнуванню металу, зазвичай, передують пружно-пластична деформація. Тому вихідною характеристикою абразивної зносостійкості, як і будь-якої іншої механічної характеристики, є діаграма деформування (рис.), яка пов'язує напруги ( $\sigma$ ) та деформації ( $\epsilon$ ), що досягаються під дією цих напруг.



**Рисунок.** Діаграма деформування металу при абразивному зношуванні:  $\sigma_{теор}$  – теоретична міцність;  $\sigma_в$  – границя міцності;  $\epsilon_{пр}$  – пружна деформація;  $\epsilon_{кр}$  – критична деформація.

Реакція металу на навантаження тертям при абразивному зношуванні, як це зазначалося вище, відбувається у формі пружної деформації, пластичної деформації та руйнування. Причому реакція у формі пружної деформації є оборотною, а у формі пластичної деформації та руйнування необоротною.

Для ідеального металу реакція на тертя відбувається у формі пружної деформації та руйнування. Кривою деформування в цьому випадку є лінія ОА (рис.). За даними [4] лише 10-7 енергії, що підводиться ззовні витрачається на руйнування. В межах припустимої похибки можна вважати, що максимальне навантаження, яке витримує метал відповідає його теоретичній міцності  $\sigma_{теор}$ .

Теоретична енергія  $U_{теор}$ , що витрачається на абразивне зношування дорівнює площині ОАД тобто

$$U_{теор} = \frac{\sigma_{теор}^2}{2E} \cdot V, \quad (2)$$

де  $E$  – нерелаксований модуль пружності;  $V$  – об'єм зруйнованого та деформованого шару.

Для оцінки теоретичної міцності, яка є фундаментальною механічною характеристикою металу, відомо [7,8 тощо] багато формул. Однак найбільш точною і вільною від будь-яких припущень про характер міжатомною взаємодії є формула, що

$$U_{теор} = 0,125 \frac{\gamma}{a} V_{\delta} + 0,125 \frac{\gamma}{a} V_p = 0,125 \frac{\gamma}{a} (V_{\delta} + V_p) = 0,125 \frac{\gamma}{a} (kV_p + V_p) = 0,125 V_p (k + 1) \quad (8)$$

Коефіцієнт  $k$  у першому наближенні можна прийняти таким, що дорівнює одиниці, тобто вважати, що об'єм  $V_{\delta}$  металу під зношеною поверхнею, який охоплений пружною деформацією при абразивному зношуванні дорівнює об'єму  $V_p$  зношеного шару. Тоді

$$U_{теор} = 0,25 \frac{\gamma}{a} V_p = 0,25 \frac{\gamma \Delta G}{a \rho}, \quad (9)$$

де  $\Delta G$  – маса зношеного металу;  $\rho$  – густина металу.

отримана в роботі [8]:

$$\sigma_{теор} = \left( \frac{2\gamma E}{a} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

де  $\gamma$  – поверхнева енергія;  $a$  – міжатомна відстань.

Якщо формулу (3) підставити у формулу (2), то після відповідних перетворень отримаємо наступний вираз для теоретичної енергії

$$U_{теор} = 0,125 \frac{\gamma}{a} V, \quad (4)$$

За абразивного зношування деформації зазнають не лише частинки зносу, але також приповерхневий шар металу, до якого вони були закріплені до руйнування. Роботу, що витрачається на абразивне зношування, можна розділити на дві частини. Одна частина витрачається на те щоб пружно деформувати до руйнування частинки металу, а інша частина витрачається на деформацію приповерхневого шару металу. В момент руйнування частинки напруги по обидва боки площини руйнування однакові. На підставі цього можна припустити, що робота абразивного зношування  $U$  розділяється на дві приблизно рівні частини:

$$U_{теор} = U_{\delta} + U_p, \quad (5)$$

де  $U_{\delta}$  – робота деформування;  $U_p$  – робота руйнування.

На підставі формули (4) маємо:

$$U_{\delta} = 0,125 \frac{\gamma}{a} V_{\delta}; \quad U_p = 0,125 \frac{\gamma}{a} V_p, \quad (6)$$

де  $V_{\delta}$  – об'єм деформованого шару;  $V_p$  – об'єм зношеного шару.

Позначимо через  $k$  відношення енергій

$$\frac{U_{\delta}}{U_p} = k, \quad (7)$$

або за формулою (6):  $\frac{V_{\delta}}{V_p} = k$

Замінивши  $V_{\delta}$  через  $V_{\delta} k$ , на підставі формул (5) та (6) можна записати:

Інше положення для реального металу, який має різні дефекти кристалічної будови. Присутність дефектів проявляється в тому, що реакція металу при навантаженні тертям в умовах абразивного зношування відбувається у формі пружної деформації, пластичної деформації та руйнування. На відміну від руйнування, на процес пластичної деформації витрачається значна частина зовнішньої енергії [4]. Тому пластична деформація призводить до релаксації внутрішніх напруг. Внаслідок

релаксації деформування металу відбувається за кривою ОВ (рис.), а максимальне навантаження, яке витримує метал знижується до технічної міцності (границі міцності).

Фактична енергія  $U_{\sigma}$ , що витрачається на абразивне зношування дорівнює площині ОСВД, яка в свою чергу є різницею площин ОАД – АСВ тобто

$$U_{\sigma} = U_{теор} - U_{рел}, \quad (10)$$

де  $U_{рел}$  – енергія релаксації.

З рисунка маємо:

$$U_{рел} = \frac{(\sigma_{теор} - \sigma_{\sigma})^2}{2E} V, \quad (11)$$

Враховуючи (2) та (11) формулу (10) можна записати так

$$U_{\sigma} = \frac{\sigma_{теор}^2}{2E} V - \frac{(\sigma_{теор} - \sigma_{\sigma})^2}{2E} V = \frac{V}{2E} [\sigma_{теор}^2 - (\sigma_{теор} - \sigma_{\sigma})^2] \quad (12)$$

Теоретична та технічна міцність металів знаходяться у певному співвідношенні одна до одної, яке залежить від природи металу. В таблиці 1 представлені відношення  $\beta$  теоретичної міцності до технічної ряду металів.

**Таблиця 1**

Відношення теоретичної до технічної міцності металів [7]

Метал	Модуль пружності, $E, 10^7$ Па	Теоретична міцність, $\sigma_{теор} 10^7$ Па	Технічна міцність $\sigma_{\sigma} 10^7$ Па	Відношення $\beta = \frac{\sigma_{теор}}{\sigma_{\sigma}}$
Алюміній	6000	600	9,0	65
Срібло	8000	800	18,0	45
Мідь	12000	1200	23	50
Залізо	21000	2100	30	70

Тому для технічної міцності можна записати:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{\sigma_{теор}}{\beta}, \quad (13)$$

Після підстановки (13) в (12) маємо:

$$U_{\sigma} = \frac{V}{2E} \left[ \sigma_{теор}^2 - \left( \sigma_{теор} - \frac{\sigma_{теор}}{\beta} \right)^2 \right] = \frac{\sigma_{теор}^2}{2E} V \left[ 1 - \left( \frac{\beta-1}{\beta} \right)^2 \right], \quad (14)$$

Враховуючи (2) і (9) остаточно отримаємо

$$U_{\sigma} = U_{теор} \left[ 1 - \left( \frac{\beta-1}{\beta} \right)^2 \right] = 0,25 \frac{\gamma}{a} \frac{\Delta G}{\rho} \left[ 1 - \left( \frac{\beta-1}{\beta} \right)^2 \right], \quad (15)$$

З іншого боку відомо, що фактична енергія абразивного зношування дорівнює

$$U_{\sigma} = F_{тр} \cdot L_{тр}, \quad (16)$$

де  $F_{тр}$  – сила тертя;  $L_{тр}$  – шлях тертя.

Тому праві частини формул (15) і (16) можна прирівняти одне до одного

$$0,25 \frac{\gamma}{a} \frac{\Delta G}{\rho} \left[ 1 - \left( \frac{\beta-1}{\beta} \right)^2 \right] = F_{тр} \cdot L_{тр}, \quad (17)$$

Звідки для поверхневої енергії пластичних металів отримаємо:

$$\gamma = \frac{F_{тр} \cdot L_{тр} \rho \cdot a}{0,25 \Delta G \left[ 1 - \left( \frac{\beta-1}{\beta} \right)^2 \right]}, \quad (18)$$

Раніше, із застосуванням методу абразивного

шліфування, В.Д. Кузнєцовим [4] отримана наступна формула для поверхневої енергії крихких кристалів

$$\gamma = \frac{F_{тр} \cdot L_{тр} \rho \cdot a}{2 \Delta G}, \quad (19)$$

Порівняння формул (18) і (19) показує, що вони дуже близькі одна до одної і відрізняються лише числовим коефіцієнтом в знаменнику. Отже, саме цей коефіцієнт і враховує енергію, що витрачається на пластичну деформацію. Розрахунок відношення поверхневих енергій заліза, розрахованих за формулами (18) і (19), показує, що воно дорівнює 2,6·10<sup>2</sup>, тобто робота пластичної деформації більш ніж на два порядки перевищує поверхневу енергію. Таке числове значення, знаходиться у повній відповідності з критерієм Гриффітса-Орована [9] для руйнування пластичних металів.

Для більш широкої оцінки працездатності запропонованого метода представляє інтерес співставити результати визначення поверхневої енергії, що отримані за його допомогою, з результатами, що відомі з літературних джерел [10].

Для цього проводили випробування на абразивне зношування ряду технічних матеріалів за методикою [11]. Результати співставлення представлені в таблиці 2.

**Таблиця 2**

Співставлення поверхневої енергії технічних металів.

Метал	Поверхнева енергія, Дж/м <sup>2</sup> , [10]	Поверхнева енергія, Дж/м <sup>2</sup> , Експеримент
Мідь	1,7	5,3
Срібло	1,14	2,78
Залізо	2	28,17

Звідки видно, що експериментальні значення поверхневої енергії у 2,4-14 разів перевищують літературні данні. Нажаль у джерелі, що використовувалось [10], відсутня інформація про метод визначення поверхневої енергії. Тому

пояснити розбіжність результатів неможливо. Однак слід відмітити, що значна розбіжність експериментальних значень притаманне для різних методів визначення поверхневої енергії [12]. Враховуючи, що поверхнева енергія не є фізичною константою металу, можна вважати, що розбіжність літературних та експериментальних значень, яка впливає з таблиці 2 не має принципового значення. Важливим є той факт, що порядок розташування металів за зростанням поверхневої енергії в обох випадках збігається. Це слід розглядати, як доказ працездатності запропонованого метода. Таким чином, в даній роботі запропонований працездатний метод визначення поверхневої енергії металів, який відноситься до групи фрактометричних.

*Дворук В.І.* – к.т.н., доцент кафедри теоретичної фізики;  
*Кіндрачук М.В.* – д.т.н., проф., завідувач кафедри машинознавства;  
*Герасимова О.В.* – інженер кафедри машинознавства.

- [1] В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.З. Партон. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие. Наукова думка, К. 488 с. (1988).
- [2] Л.Л. Кунин. Поверхностные явления в металлах. ГННТЛ по черной и цветной металлургии, М. 304 с. (1955).
- [3] В.Н. Кашеев. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. Машиностроение, М. 213 с. (1978).
- [4] В.Д. Кузнецов. Поверхностная энергия твердых тел. Гос. Изд-во техн.-теоретич. л-ры, М. 220 с. (1954).
- [5] М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. Абразивная износостойкость и физические характеристики межатомной связи материалов//Абразивный износ и повышение износостойкости деталей машин путем наплавки и напыления. Изд. об-ва “Знание”, К. С.29-31. (1970).
- [6] М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. Исследование изнашивания металлов. Изд. АН СССР, М. 350 с. (1960).
- [7] Г.И. Епифанов. Физика твердого тела. Высшая школа, М. 288 с. (1977).
- [8] М.М. Хрущов (мл.). О связи межатомного взаимодействия атомных свойств и износостойкости металлов //Трение и износ, 11 (3), С.409-415. (1990).
- [9] Н.С. Когут. Трещиностойкость конструкционных материалов. Изд-во при Львовском у-те изд. об. “Вища школа”, Львов, 160 с. (1986).
- [10] Б.Л. Авербах. Некоторые физические аспекты разрушения // Разрушение / Под ред. Г. Либовица. Мир, М. 1, С.471-504. (1973).
- [11] В.В. Шевеля, В.И. Дворук, В.Е. Довжок, А.В. Радченко. Обеспечение триботехнических свойств композиционных материалов при абразивном изнашивании //Проблемы трибологии. 1.- С.67-72. (2000).
- [12] Энциклопедия неорганических материалов. - В 2 т.-Т.2. Гл. ред. Укр. сов. энциклоп, К. 813 с. (1977).

V.I. Dvoruk, M.V. Kindrachuk, O.V. Gerasimova

## Definition of Superficial Energy of Metals at Abrasive Wear Process

National aviation university, 1, Cosmonaut Komarova av., Kiev, 03058, Ukraine

The method of definition of superficial energy of metals is developed at abrasive wear process on the basis of on the basis of the power approach. The estimation of working capacity of the offered method is lead.