

Дворук В.І.Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна
E-mail: vidvoruk@gmail.com**МЕТОД АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ДЛЯ
ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ
ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ КРИСТАЛІВ**

УДК 621.794'4: 546.48'24

DOI:10.31891/2079-1372-2018-90-4-14-21

Доповнено й розвинуто метод абразивного зношування для визначення ефективної поверхневої енергії крихких і пластичних кристалів на основі енергетичного підходу. Проведено порівняльний аналіз отриманих формул поверхневої енергії кристалів між собою та відомими формулами. Уточнено уявлення та кількісне розуміння питомої поверхневої енергії в теорії руйнування твердих тіл А. Гріффітса. Запропоновано узагальнену формулу для визначення ефективної поверхневої енергії кристалів. Перевірено працездатність й адекватність запропонованого методу.

Ключові слова: абразивне зношування, поверхнева енергія, кристал, зносостійкість, діаграма деформування, енергія зношування.

Вступ

Взаємодія кристалу з абразивом при зношуванні здійснюється через їх поверхні. Зовнішня поверхня є особливим видом двовимірних дефектів будови кристалу. В сучасній фізиці поверхню розглядають як особливий стан кристалу, кристалічна й енергетична структура якого відрізняється від об'ємного. Головною причиною особливої будови поверхні кристалу стосовно об'єму є обрив періодичності кристалічної ґратки, що призводить до зміни координаційної сфери поверхневих атомів і регібридизації їх зв'язків. В результаті порядок розташування вказаних атомів, а також відстані між ними істотно змінюються. При цьому координаційне число в об'ємі кристалу виявляється більшим, ніж на поверхні.

Порушена структура поверхні не має різкої межі з упорядкованою структурою кристалу, тому можна говорити про особливий так званий перехідний шар [1]. Для переміщення внутрішнього атома в перехідний шар кристалу необхідно виконати певну роботу, яка перетворюється на потенціальну енергію поверхневого атома. Звідки випливає, що всі атоми перехідного шару володіють більшим запасом потенціальної енергії, ніж внутрішні атоми і на поверхні кристалу утворюється надлишок енергії порівняно з енергією тих об'ємних атомів, що утворили вказаний шар [2]. Цей надлишок енергії перехідного шару, віднесений до його площини називається питомою поверхневою енергією або просто поверхневою енергією. Таким чином, кристал володіє поверхневою енергією, яка є основною характеристикою його поверхні. Вона грає визначальну роль в усіх явищах, пов'язаних з появою нових поверхонь, зокрема, під час розвитку тріщин у кристалах вона представляє собою міру опору їх руйнуванню.

Поверхнева енергія пропорційна поверхні кристалу. При абразивному зношуванні кристал диспергується, за рахунок чого утворюються частинки зносу з дуже великою загальною поверхнею порівняно із поверхнею тієї частини кристалу, з якої утворились вказані частинки. Збільшення кількості частинок зносу по мірі зношування супроводжується зростанням поверхневої енергії кристалу і потребує відповідних витрат роботи тертя. Повністю робота тертя витрачається на утворення нових поверхонь лише в тому випадку, коли процес їх розкриття відбувається абсолютно пружно [3]. Вона складає надто малу частку від всієї витраченої енергії і тому її вимірювання без ускладнень можливе лише для ідеально крихких кристалів, яких в природі не існує.

Всі відомі кристали можна умовно поділити на дві групи: крихкі та пластичні. При абразивному зношуванні крихких кристалів робота тертя витрачається на пружні деформації й утворення нових поверхонь. У випадку зношування пластичних кристалів – на пружні й пластичні деформації, а також утворення нових поверхонь. При цьому значна частина роботи тертя витрачається на пластичні деформації і роль поверхневої енергії відступає на другий план. Однак при зношуванні крихких кристалів роль поверхневої енергії значно зростає. Саме тому методи визначення поверхневої енергії для крихких кристалів розроблені набагато краще, ніж для пластичних.

Серед існуючих методів визначення поверхневої енергії крихких кристалів найбільш розробленим теоретично і експериментально є метод абразивного шліфування, в якому питома поверхнева енергія зв'язується з питомою роботою шліфування [4]. Цей метод дає найточніші значення поверхневої енергії кристалів. Оскільки шліфування є граничним випадком абразивного зношування, логічним виглядає припущення щодо застосування останнього як методу визначення питомої поверхневої енергії кристалів. Перший крок в цьому напрямку [5] підтвердив слушність такого припущення для пластичних кристалів, зокрема, металів. Однак умови, межі і можливості застосування цього методу залишаються не до кінця з'ясованими, що вказує на необхідність подальшого вивчення даної проблеми.

Постановка проблеми

Проведені дослідження ставили за мету доповнити та розвинути метод абразивного зношування для визначення поверхневої енергії крихких й пластичних кристалів.

Для досягнення поставленої мети розв'язувались такі завдання:

- розробити теоретичні основи абразивного зношування пластичних кристалів з точки зору поверхневої енергії;
- розробити теоретичні основи абразивного зношування крихких кристалів з точки зору поверхневої енергії;
- перевірити працездатність й адекватність визначення поверхневої енергії кристалів методом абразивного зношування.

Матеріали та методика дослідження

Об'єктами дослідження були конструкційні сталі таких марок: 110Г13Л, сталь 20, 40Х, У10, Р18. Хімічний склад сталей приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сталей, %

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P	W	V	Mo	Co
110Г13Л	0,95	0,9	13,0	1,0	1,0	0,3	0,05	0,12	-	-	-	-
Сталь 20	0,2	0,28	0,5	0,25	0,25	0,25	0,04	0,035	-	-	-	-
40Х	0,4	0,25	0,65	0,95	0,3	0,3	0,035	0,035	-	-	-	-
У10	1,0	0,25	0,25	0,2	0,25	0,25	0,028	0,03	-	-	-	-
Р18	0,78	0,5	0,5	4,0	0,4	-	0,03	0,03	17,7	1,2	1,0	0,5

Випробуванням зразків досліджуваних сталей передувала термічна обробка (гартування та відпуск) за відповідними режимами (табл. 2).

Таблиця 2

Режими термічної обробки досліджуваних сталей

Марка сталі	Гартування		Відпуск	
	температура нагрівання, К	охолоджувальне середовище	температура нагрівання, К	тривалість витримання, с
110Г13Л	1318	Вода	393	1800
Сталь 20	1143	Вода	393	1800
40Х	1143	Олива	393	1800
У10	1063	Вода	393	1800
Р18	1573	Олива	393	1800

В результаті термічної обробки отримували кристали двох груп: пластичні – сталь 110Г13Л, сталь 20 та крихкі – сталь 40Х, сталь У10, сталь Р18.

Після термічної обробки зразки сталей піддавали механічним випробуванням на розтяг і тертя ковзання по монолітному абразиву.

Випробування на розтяг проводили на універсальній машині УММ – 50. В результаті таких випробувань отримували діаграму навантаження – видовження, за якою розраховували механічні характеристики (границю міцності та модуль пружності) зразків.

Випробування на тертя ковзання по монолітному абразиву проводили на модернізованому [6] приладі ЛКІ – 3. Абразивом був шліфувальний круг ПП450 × 63 × 303 24А 40С2 ГОСТ 2424 – 83 з електрокорунду білого. Робочим середовищем – водопровідна вода. Режим випробувань: контактний тиск $P = 1,055$ МПа, швидкість ковзання $V = 0,5$ м/с, шлях тертя $L_{mp} = 30$ м. В процесі випробувань вимірювали силу тертя. Знос зразка визначали після випробувань методом зважування на електронних аналітичних терезах «Nagema» (ціна поділки 0,001 г).

Результати теоретичних та експериментальних досліджень

Відомо [7], що зносостійкість – це характеристика руйнування кристалів. Руйнуванню кристалів передують процеси деформування (пружного – для крихких кристалів і пружно – пластичного – для пластичних кристалів). Тому вихідною характеристикою їх зносостійкості, як і будь-якої іншої характеристики механічних властивостей, є діаграма деформування, що пов'язує між собою напруги σ та деформації ϵ , які виникають під їх дією.

Розглянемо пластичний кристал, схему істинної діаграми деформування якого при абразивному зношуванні представлено на рис. 1.

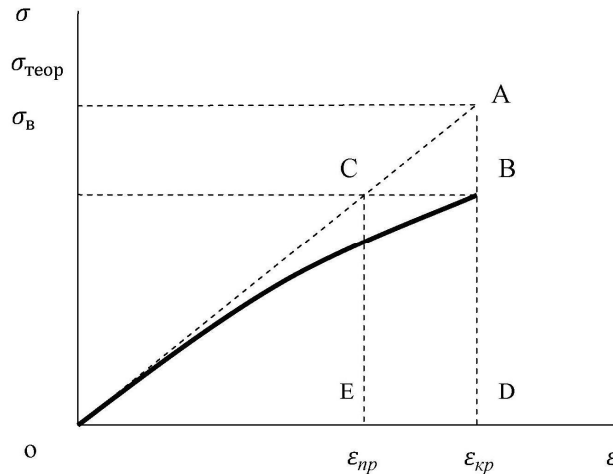


Рис. 1 – Істинна діаграма деформування пластичного кристалу при абразивному зношуванні:

$\sigma_{теор}$ – границя теоретичної міцності;
 σ_B – границя реальної міцності;
 $\epsilon_{пр}$ – пружна деформація;
 $\epsilon_{кр}$ – критична деформація

При абразивному зношуванні такий кристал руйнується в'язко. Процесу в'язкого руйнування передують пластична деформація в умовах трансляційно – ротаційного масопереносу, яка супроводжується релаксацією внутрішніх напруг у кристалі, а також необоротною зміною його форми. Внаслідок релаксаційних явищ деформування кристалу відбувається за кривою OB, а максимальне навантаження, що він витримує знижується від теоретичної $\sigma_{теор}$ до технічної σ_B (границі міцності) міцності.

Відповідно до діаграми деформування (рис 1) фактична енергія, що витрачається на абразивне зношування дорівнює площині ОСВД, яка містить у собі площини OCE та CBDE тобто:

$$U_{\epsilon} = U_{пр} + U_{нд}, \quad (1)$$

де $U_{пр}$ – енергія пружної деформації, що визначається площиною трикутника OCE, тобто:

$$U_{пр} = \frac{\sigma_B^2}{2E} V_{пр}, \quad (2)$$

де E – модуль пружності;

$V_{пр}$ – пружно деформований об'єм,

$U_{нд}$ – енергія непружної деформації, яка визначається площиною прямокутника CBDE, тобто:

$$U_{нд} = \sigma_B (\epsilon_{кр} - \epsilon_{пр}) V_{нд}, \quad (3)$$

де $V_{нд}$ – непружно деформований об'єм.

Підставивши (2) і (3) в (1), отримаємо:

$$U_{\epsilon} = \frac{\sigma_B^2}{2E} V_{пр} + (\epsilon_{кр} - \epsilon_{пр}) V_{пр} + \sigma_B \left(\frac{\sigma_{теор}}{E} - \frac{\sigma_B}{E} \right) V_{нд}. \quad (4)$$

Теоретична $\sigma_{теор}$ і технічна σ_B (границя міцності) міцність кристалу знаходяться у певному співвідношенні одна до одної, що залежить від природи кристалу і називається коефіцієнтом концентрації напруг кристалічної ґратки [8]:

$$\beta = \frac{\sigma_{теор}}{\sigma_B}. \quad (5)$$

Звідки σ_B дорівнює

$$\sigma_B = \frac{\sigma_{теор}}{\beta}. \quad (6)$$

В табл. 3 представлено значення β для ряду пластичних кристалів [8]

Таблиця 3

Коефіцієнт концентрації напружень кристалічної ґратки кристалів

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

Після підстановки (6) в (4) отримаємо:

$$U_\epsilon = \frac{\sigma_\epsilon^2}{2E} V_{ПР} + \sigma_\epsilon \left(\frac{\sigma_\epsilon}{E} \beta - \frac{\sigma_\epsilon}{e} \right) V_{нд} = \frac{\sigma_\epsilon^2}{2E} [V_{ПР} + 2(\beta - 1)V_{нд}]. \quad (7)$$

Непружно деформований об'єм $V_{нд}$ в загальному випадку складається з двох частин: пластично деформованого об'єму $V_{пл}$ і зруйнованого об'єму V_p .

Відомо [9], що при зношуванні тертям ковзання по монолітному абразиву пластично деформований об'єм кристалу практично повністю руйнується. У зв'язку з чим будемо вважати, що:

$$V_{нд} = V_{пл} + V_p = 2V_p. \quad (8)$$

Позначимо через K :

$$\frac{V_{пР}}{V_{нд}} = K. \quad (9)$$

Звідки, ураховуючи (8):

$$V_{ПР} = KV_{нд} = 2KV_p. \quad (10)$$

Тоді (7) можна записати так:

$$U_\epsilon = \frac{\sigma_\epsilon^2}{2E} [2KV_p + 4(\beta - 1)V_p] = \frac{\sigma_\epsilon^2}{2E} V_p [K + 2(\beta - 1)]. \quad (11)$$

Коефіцієнт K , в першому наближенні, приймаємо рівним одиниці, тобто вважаємо, що об'єм $V_{ПР}$ кристалу під зношеним об'ємом, що охоплений пружною деформацією дорівнює непружно деформованому об'єму $V_{нд}$. Тоді (11) набуде такого вигляду:

$$U_\epsilon = \frac{\sigma_\epsilon^2}{E} V_p (2\beta - 1) = \frac{\sigma_\epsilon^2}{E} \frac{\Delta G}{\rho} (2\beta - 1) = \frac{\sigma_{теор}^2}{E\beta^2} \frac{\Delta G}{\rho} (2\beta - 1), \quad (12)$$

де ΔG – маса зношеного кристалу;

ρ – густина кристалу.

Для оцінки теоретичної міцності кристалу скористаємось формулою Поляні [10]:

$$\sigma_{теор} = \left(\frac{2\gamma E}{a} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

де γ – питома поверхнева енергія кристалу;

a – міжатомна відстань

Після підстановки (13) у (12) отримаємо:

$$U_e = \frac{2\gamma}{a\beta^2} \frac{\Delta G}{\rho} (2\beta - 1). \quad (14)$$

З іншого боку фактичну енергію абразивного зношування кристалу можна визначити так:

$$U_e = F_{mp} L_{mp}, \quad (15)$$

де F_{mp} – сила тертя;

L_{mp} – шлях тертя.

Прирівнюючи праві частини (14) і (15):

$$\frac{2\gamma}{a\beta^2} \frac{\Delta G}{\rho} (2\beta - 1) = F_{mp} L_{mp}, \quad (16)$$

отримаємо формулу для визначення питомої поверхневої енергії пластичних кристалів:

$$\gamma = \frac{F_{mp} L_{mp} \rho a}{2\Delta G} \frac{\beta^2}{(2\beta - 1)}. \quad (17)$$

Перейдемо до розгляду крихкого кристалу. При абразивному зношуванні такий кристал руйнується крихко. Його руйнуванню передують лише пружна деформація. Жодних необоротних змін в ньому не відбувається. Схему типової діаграми деформування крихкого кристалу представлено на рис. 2.

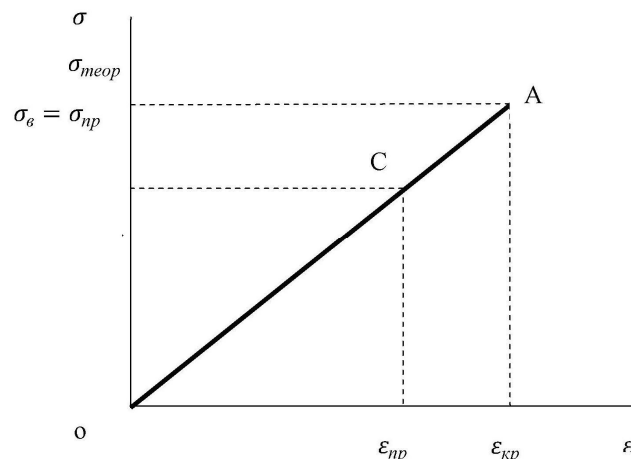


Рис. 2– Діаграма деформування крихкого кристалу при абразивному зношуванні:

$\sigma_{теор}$ – границя теоретичної міцності;

σ_e – границя реальної міцності;

$\epsilon_{пр}$ – пружна деформація;

$\epsilon_{кр}$ – критична деформація

При розрахунку його теоретичної міцності виходять з передумови, що кристалічна ґратка має ідеальну будову, між тим як структура реального кристалу не є ідеальною, оскільки містить в собі дефекти у вигляді мікроскопічних поверхневих та внутрішніх тріщин [11]. Наслідком наявності вказаних де-

фективні є велике розходження між теоретичною $\sigma_{теор}$ та технічною σ_e міцністю, яке пояснюється значною концентрацією пружних напружень на кінцях мікротріщин, де і починається розрив міжатомних зв'язків за порівняно малої величини докладеного навантаження. Тому будемо вважати, що максимальне навантаження σ_e , яке витримує крихкий кристал відповідає його границі пружності σ_{np} , а криву деформування буде лінія ОС.

Фактична енергія U_{np} абразивного зношування на діаграмі деформування кристалу відповідає площині трикутника ОСЕ тобто:

$$U_{np} = \frac{\sigma_{np}^2}{2E} V, \quad (18)$$

де V – деформований об'єм кристалу.

З урахуванням (6) формулу (18) можна записати так:

$$U_{np} = \frac{\sigma_{теор}^2}{2E\beta^2} V. \quad (19)$$

Після підстановки (13) в (19) отримаємо

$$U_{np} = \frac{\gamma}{a\beta^2} V. \quad (20)$$

В процесі абразивного зношування деформації зазнають не лише частинки зносу, але також поверхневий шар кристалу, з якого вони утворились. Тому фактичну енергію, що витрачається на абразивне зношування можна розділити на дві частини. Одна частина витрачається на пружне деформування аж до руйнування частинок зносу кристалу, а інша частина витрачається на деформування поверхневого шару кристалу, з якого вони утворились. В момент відокремлення частинок напруження по обидва боки площин відокремлення однакові. На підставі цього можна вважати, що фактична енергія абразивного зношування розділяється на дві приблизно рівні частини:

$$U_{np} = U_\delta + U_p, \quad (21)$$

де U_δ – енергія деформування;

U_p – енергія руйнування.

З урахуванням формули (20) маємо:

$$U_\delta = \frac{\gamma}{a\beta^2} V_\delta, \quad U_p = \frac{\gamma}{a\beta^2} V_p, \quad (22)$$

де V_δ – об'єм деформованого шару;

V_p – об'єм зруйнованого шару.

Позначимо через K_1 відношення енергій:

$$\frac{U_\delta}{U_p} = K_1. \quad (23)$$

Або відповідно до формули (20):

$$\frac{V_\delta}{V_p} = K_1. \quad (24)$$

Замінивши V_δ на $K_1 V_p$ на підставі формул (21) і (22) можна записати:

$$U_{np} = \frac{\gamma}{a\beta^2} V_\delta + \frac{\gamma}{a\beta^2} V_p = \frac{\gamma}{a\beta^2} (V_\delta + V_p) = \frac{\gamma}{a\beta^2} (K_1 V_p + V_p) = \frac{\gamma}{a\beta^2} V_p (K_1 + 1). \quad (25)$$

Коефіцієнт K_1 в першому наближенні можна прийняти рівним одиниці, тобто вважати, що при абразивному зношуванні об'єм V_δ крихкого кристалу під зруйнованим об'ємом, що охоплений пружною деформацією, дорівнює об'єму V_p зруйнованого шару. Тоді:

$$U_{np} = \frac{2\gamma}{a\beta^2} V_n = \frac{2\gamma}{a\beta^2} \frac{\Delta G}{\rho}, \quad (26)$$

де ΔG – маса зношеного кристалу;

ρ – густина кристалу.

З іншого боку фактична енергія зношування крихких кристалів дорівнює:

$$U_{np} = F_{mp} L_{mp}, \quad (27)$$

де F_{mp} – сила тертя ;

L_{mp} – шлях тертя.

Тому праві частини формул (26) та (27) можна прирівняти одна до одної:

$$\frac{2\gamma}{a\beta^2} \frac{\Delta G}{\rho} = F_{mp} L_{mp}. \quad (28)$$

Звідки питома поверхнева енергія крихких кристалів дорівнюватиме:

$$\gamma = \frac{F_{mp} L_{mp} \rho a}{2\Delta G} \beta^2. \quad (29)$$

Раніше в роботі [4] з використанням методу абразивного шліфування та теоретичного підходу, що принципово відрізняється від використаного в даній статті отримано таку формулу для питомої поверхневої енергії крихких кристалів:

$$\gamma = \frac{F_{mp} L_{mp} \rho a}{2\Delta G}. \quad (30)$$

Порівняння показує, що формула (29) відрізняється від формули (30) наявністю множника β^2 , який ураховує структуру реального кристалу. У випадку $\beta = 1$, тобто в умовах, коли $\sigma_\epsilon = \sigma_{теор}$, формула (29) перетворюється на формулу (30). Це вказує на більш загальний характер формули (29), оскільки вона дозволяє визначити питому поверхневу енергію в діапазоні напружень, що реально діють при абразивному зношуванні.

Для пластичного кристалу при $\beta = 1$ формула (17) питомої поверхневої енергії також перетворюється на формулу (30), що свідчить про перехід від в'язкого типу руйнування до крихкого.

На окрему увагу заслуговує факт урахування в формулі (17) роботи непружної деформації, яка складається з роботи пластичного деформування та роботи руйнування. Через свою значну величину вказана робота відсуває на другий план роль питомої поверхневої енергії кристалу при абразивному зношуванні. Тому у цій формулі мова ведеться про ефективну питому поверхневу енергію γ_{ef} , як це запропоновано в роботі [12].

Відмінність між формулами питомої поверхневої енергії пластичних (17) й крихких (29) кристалів складається у множнику, що містить у собі параметр β . Оскільки при однаковому β множник

$$\frac{\beta^2}{(2\beta - 1)} \langle \beta^2 \rangle,$$

можна зробити висновок, що коефіцієнт концентрації напруг кристалічної ґратки β , зумовлений носіями руйнування – мікротріщинами в крихкому кристалі сприяє ефективнішому підвищенню його поверхневої енергії, ніж коефіцієнт концентрації напруг, зумовлений носіями пластичної деформації – дислокаціями та дисклинаціями в пластичному кристалі.

З аналізу формул (17) та (29) випливає, що питома поверхнева енергія ідеального пластичного й крихкого кристалу ($\beta = 1$) має мінімально можливу величину. У зв'язку з чим, точніше її назвати теоретичною питомою поверхневою енергією $\gamma_{теор}$. Судячи з усього, саме в такому уявленні та кількісному розумінні слід сприймати питому поверхневу енергію як “константу матеріалу” в теорії руйнування твердих тіл А. Гріффітса [13], стосовно якої різні дослідники дають різну фізичну інтерпретацію.

В табл. 4 приведені значення теоретичної та ефективної питомої поверхневої енергії для деяких крихких і пластичних кристалів.

Таблиця 4

Теоретична та ефективна питома поверхнева енергія для різних кристалів

Група кристалу	Вид кристалу	$\gamma_{теор}$, Дж/м ²	$\gamma_{еф}$, Дж/м ²
Пластичний	Сталь 110Г13Л	0,95	18,7
	Сталь 20	0,95	6,96
Крихкий	Сталь 40Х	0,95	150,4
	Сталь У10	0,95	2910
	Сталь Р18	0,95	1156

Звідки видно, що величина теоретичної питомої поверхневої енергії $\gamma_{теор}$ сталей в пластичному та крихкому стані однакова й несуттєво відрізняється від її теоретичного оціночного значення, яке складає $\gamma_{теор} = 1,5$ Дж/м² [14]. В той час, як величина ефективної питомої поверхневої енергії $\gamma_{еф}$ крихких й пластичних кристалів значно перевищує величину теоретичної питомої поверхневої енергії $\gamma_{теор}$ ідеальних кристалів. Причому для крихких кристалів вказане перевищення складає три порядки, а для пластичних – один. Цей факт експериментально підтверджує ефективнішу дію концентрації напруг кристалічної ґратки, зумовленої носіями руйнування у крихкому кристалі, ніж носіями деформування та руйнування у пластичному кристалі. Пояснюється він зниженням концентрації напружень у вершинах тріщин через їх релаксацію за рахунок пластичної деформації. При цьому слід зауважити, що на відміну від пластичного кристалу (див. вище), у ефективній поверхневій енергії крихкого кристалу ураховано лише роботу руйнування.

Узагальнюючи формули (17) та (29), отримуємо остаточну формулу для визначення ефективної питомої поверхневої енергії кристалів:

$$\gamma_{еф} = K \frac{F_{mp} L_{mp} \rho a}{2\Delta G} = 0,5 K \omega_3 a, \quad (31)$$

де K – чинник концентрації напружень кристалічної ґратки, що для крихких кристалів дорівнює $K = \beta^2$, а для пластичних – $K = \frac{\beta^2}{(2\beta - 1)}$;

$$\omega_3 = \frac{F_{mp} L_{mp} \rho}{2\Delta G} \text{ – густина енергії зношування кристалу.}$$

Отже, ефективна поверхнева енергія кристалу прямо пропорційна добутку чинника концентрації напружень кристалічної ґратки, густини енергії зношування та міжатомної відстані.

Наведені факти узгоджуються з уявленнями сучасної механіки руйнування, щодо ролі поверхневої енергії в руйнуванні кристалів і свідчать на користь адекватності й працездатності запропонованого

методу абразивного зношування для визначення ефективної питомої поверхневої енергії кристалів, що в свою чергу дає підстави рекомендувати його до практичного застосування.

Висновки

1. Проведеними дослідженнями з використанням методу абразивного зношування отримано адекватні формули для визначення ефективної питомої поверхневої енергії, які ураховують структуру крихких й пластичних кристалів.

2. Встановлено, що коефіцієнт концентрації напруг кристалічної ґратки, зумовлений носіями руйнування – мікротріщинами в крихкому кристалі сприяє ефективнішому підвищенню його поверхневої енергії, ніж коефіцієнт концентрації напруг кристалічної ґратки, зумовлений носіями пластичної деформації – дислокаціями та дисклинаціями в пластичному кристалі.

3. Показано, що теоретична питома поверхнева енергія має мінімальну величину і є константою лише для ідеального кристалу, в той час як для реального кристалу її роль при абразивному зношуванні відсутається на другий план через вплив роботи непружного деформування для пластичного кристалу і роботи руйнування для крихкого кристалу. В результаті чого, величина ефективної питомої поверхневої енергії перевищує величину теоретичної питомої поверхневої енергії кристалів на 1 – 3 порядки.

4. Встановлено, що ефективна поверхнева енергія кристалів прямо пропорційна добутку коефіцієнту концентрації напружень кристалічної ґратки, густини енергії тертя та міжатомної відстані.

Література

1. Панасюк, В.В. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.З. Паргон. – К.: Наукова думка, 1988. – 488 с.
2. Кунин, Л.Л. Поверхностные явления в металлах / Л.Л. Кунин. – М.: ГНИТЛ, 1955. – 304 с.
3. Кашеев, В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов / В.Н. Кашеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 213 с.
4. Кузнецов, В.Д. Поверхностная энергия твердых тел / В.Д. Кузнецов. – М.: Гос. изд-во техн.-теоретич. л-ры, 1954. – 220 с.
5. Дворук, В.І. Визначення поверхневої енергії металів при абразивному зношуванні / В.І. Дворук, М.В. Кіндрачук, О.В. Герасимова // Фізика і хімія твердого тіла. – 2006. – Т.7, № 3. – С. 560 – 563.
6. Шевеля, В.В. Обеспечение триботехнических свойств композиционных материалов при абразивном изнашивании / В.В. Шевеля, В.И. Дворук, А.В. Радченко // Проблемы трибологии. – 2000. – № 1. – С. 67 – 72.
7. Хрущов, М.М. Исследование изнашивания металлов / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 350 с.
8. Трошенко, В.Т. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справ. пособие: Ч.2 / В.Т. Трошенко, А.Я. Красовский, В.В. Покровский, Л.А. Сосновский, В.А. Стрижало. – К.: Наукова думка, 1994. – 702 с.
9. Дворук, В.И. Научные основы повышения абразивной износостойкости деталей машин / В.И. Дворук. – К.: КМУГА, 1997. – 101 с.
10. Polanyi, M. Über die Natur des Zerreibvorganges / M. Polanyi // Zeits. f. Phys. 1921 – N.7. – P. 323 – 327.
11. Френкель, Я.И. Введение в теорию металлов / Я.И. Френкель. – Ленинград: Наука, 1972. – 424 с.
12. Orowan, E. Energy criteria of fracture / E. Orowan // Welding J. 1955. – V. 34. – № 2. – P. 157 – 160.
13. Griffith, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Phil. Trans. Roy. Soc. A. – 1921. – V. 221. – № 2. – P. 163 – 198.
14. Пестриков, В.М. Механика разрушения твердых тел / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. – Санкт – Петербург: Из – дво Профессия, 2002. – 320 с.

Надійшла в редакцію 19.12.2018

Dvoruk V.I. A method of abrasive wear is for determination of superficial energy of crystals.

As a result of the energy analysis, the theoretical foundations for the process of abrasive wear of ductile and brittle crystals from the point of view of surface energy have been developed on which a method for its determination has been

constructed. Using the method of abrasive wear, a generalized formula for determining the surface energy is obtained, which takes into account the structure of plastic and brittle crystals. It is established that the coefficient of stress concentration of the crystal lattice, caused by the carriers of destruction - microcracks in a brittle crystal, contributes to an effective increase of its surface energy than the coefficient of stress concentration of the crystal lattice caused by the carriers of plastic deformation - dislocations and disclinations in a plastic crystal. It is shown that the specific surface energy has a minimum value and is constant only for an ideal crystal, while for a real crystal this is a structurally sensitive characteristic that depends on structural, technological and operational factors. An experimental verification of the abrasive wear method for determining the surface energy of plastic and brittle crystals was carried out, the results of which confirmed its adequacy.

Thus, there is reason to argue that the application of the abrasive wear method to determine the surface energy of plastic and brittle can be made possible. This method is sufficiently developed theoretically and experimentally. It gives the values of the surface energy of crystals of acceptable accuracy.

Key words: abrasive wear, surface energy, crystal, wear resistance, deformation diagram, wear energy.

References

1. Panasjuk, V.V. *Mehanika razrushenija i prochnost' materialov: Sprav. posobie*. V.V. Panasjuk, A.E. Andrejkiv, V.Z. Parton. K. Naukova dumka, 1988. 488 s.
2. Kunin, L.L. *Poverhnostnye javlenija v metalah*. L.L. Kunin. M. GNITL, 1955. 304 s.
3. Kashheev, V.N. *Processy v zone frikcionnogo kontakta metal lov*. V.N. Kashheev. M. Mashinostroenie, 1978. 213 s.
4. Kuznecov, V.D. *Poverhnostnaja jenergiya tverdyh tel*. V.D. Kuznecov. M. Gos. izd-vo tehn.-teoretich. l-ry, 1954. 220 s.
5. Dvoruk, V.I. *Viznachennja poverhnevoi energii metaliv pri abrazivnomu znoshuvanni*. V.I. Dvoruk, M.V. Kindrachuk, O.V. Gerasimova. *Fizika i himija tverdogo tila*. 2006. T.7, № 3. S. 560 – 563.
6. Shevelja, V.V. *Obespechenie tribotekhnicheskikh svojstv kompozicionnykh materialov pri abrazivnom iznashivanii*. V.V. Shevelja, V.I. Dvoruk, A.V. Radchenko. *Problemi tribologii*. 2000. № 1. S. 67 – 72.
7. Hrushhov, M.M. *Issledovanie iznashivaniya metal lov*. M.M. Hrushhov, M.A. Babichev. M. Izd - vo AN SSSR, 1960. 350 s.
8. Troshhenko, V.T. *Soprotivlenie materialov deformirovaniju i razrusheniju: Sprav. posobie: Ch.2* / V.T. Troshhenko, A.Ja. Krasovsij, V.V. Pokrovskij, L.A. Sosnovskij, V.A. Strizhalo. K. Naukova dumka, 1994. 702 s.
9. Dvoruk, V.I. *Nauchnye osnovy povyshenija abrazivnoj iznosostojkosti detalej mashin*. V.I. Dvoruk. K. KMUGA, 1997. 101 s.
10. Polanyi, M. *Über die Natur des Zerreiβvorganges*. M. Polanyi. *Zeits. f. Phys.* 1921. N.7. P. 323 - 327.
11. Frenkel', Ja.I. *Vvedenie v teoriju metallov* / Ja.I. Frenkel'. – Leningrad: Nauka, 1972. – 424 s.
12. Orowan, E. *Energy criteria of fracture* / E. Orowan // *Welding J.* 1955. – V. 34. - № 2. – P. 157 – 160.
13. Griffith, A.A. *The phenomena of rupture and flow in solids*. A.A. Griffith. *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 1921. V. 221. № 2. P. 163 – 198.
14. Pestrikov, V.M. *Mehanika razrushenija tverdyh tel*. V.M. Pestrikov, E.M. Morozov. Sankt Peterburg: Iz – dvo Professija, 2002. 320 s.