

**Дворук В.І.,
Кіндрачук М.В.**

Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна

ФІЗИЧНА ПРИРОДА АБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТЕХНІЧНО ЧИСТИХ МЕТАЛІВ

Завдання дослідження

Абразивна зносостійкість будь-якого металу визначається його здатністю чинити опір зовнішньосилової дії твердих частинок на зношувану поверхню. Якщо твердість абразиву перевищує твердість металу, вказана взаємодія реалізується у два етапи. Перший етап характеризується тиском частинки на поверхню і завершується він її зануренням у метал поверхневого шару. Після чого, на другому етапі, занурена частинка переміщується в горизонтальному напрямі, залишаючи на поверхні слід у вигляді подряпини.

Процеси занурення та дряпання частинки супроводжуються видавлюванням металу з-під частинки, пластичною деформацією зони, що примикає до подряпини, а також руйнуванням металу. Навали видавленого металу розміщуються над поверхнею по краях подряпини. Утворення навалів пояснюється збільшенням об'єму металу при пластичній деформації за рахунок вмісту в ньому несущальностей різного виду, наприклад, тріщин. Виникнення тріщин розпочинається від зародкових мікротріщин, які можуть вже існувати у металі, і їх наявність зумовлюється технологією, тобто попередньою механічною, термічною і хімічною обробкою. Величина, просторова орієнтація і густина таких мікротріщин у металі підлягають випадковим закономірностям. Тріщини зароджуються також у процесі деформаційного плину металу при зануренні та дряпанні частинки за рахунок гальмування дислокацій на різних неоднорідностях структури. Тому навали, як це відмічалось в роботі [1], складаються з металу у майже зруйнованому стані.

До моменту досягнення певної величини навантаження на абразивну частинку акти руйнування сліду у формі відокремлення фрагментів металу спостерігаються лише під час дряпання, а при більш високому навантаженні – як під час занурення так і дряпання [2]. Тому процеси занурення та дряпання пов'язані із одночасним співіснуванням процесів пластичної деформації та руйнування у металі.

Оскільки формування відбитку занурення, подряпини переміщення, а також фрагментів відокремленого металу на поверхні – це типові механізми абразивного пошкодження, то знос металу також слід розглядати як результат одночасної реалізації двох процесів – пластичної деформації та руйнування.

Для науково обгрунтованого розв'язання проблеми абразивного зносу та захисту механічних трибосистем запропоновано [3], нову концепцію підвищення зносостійкості, основу якої складає реолого-кінетичний підхід до фундаментального питання про зв'язок між деформуванням та руйнуванням. Суть цього підходу полягає в уявленні про одночасне співіснування у поверхневому шарі зношуваного металу двох процесів – деформування та руйнування, зв'язок між якими ґрунтується на реології пружно-в'язко-пластичних процесів і уявленні про руйнування, як кінетичному процесі.

Згідно вказаної концепції основний механізм абразивного зношування складається у послідовному відокремленні шарів частинок зносу, що утворились в результаті розвинення первинних бокових горизонтальних тріщин у напрямі від меж пластичних зон біля вершин кожної вихідної вертикальної клиноподібної тріщини до перетину з робочою поверхнею, вторинними боковими тріщинами тощо. Як критерій абразивного зносу розглядається реологічний параметр:

$$R = \frac{K_{IC}}{\sqrt{h_n}}, \quad (1)$$

де K_{IC} – в'язкість руйнування;

h_n – розмір пластичних зон біля вершин тріщин, фізичний сенс якого на макрорівні – це опір виникненню та розвитку бокових горизонтальних тріщин на межі пластичної зони. Спільні закономірності у зміні реологічного параметру та зносостійкості триботехнічних матеріалів різних класів за різних умов зношування, що були виявлені, дозволили констатувати таке: у природі абразивної зносостійкості визначальним є міцнісне підґрунтя у сенсі опору виникненню та розвитку бокових горизонтальних тріщин на межах пластичних зон.

За такого підходу першопричиною отримання необхідного значення реологічного параметру слід вважати хімічний склад та вихідну структуру металу. Результати попереднього аналізу даних зі зносостійкості металевих матеріалів різних класів свідчать про значне її підвищення при переході від чистих металів і сплавів на основі однофазних твердих розчинів до багатофазних сплавів та інтерметалідів.

Відомо [4], що абразивна зносостійкість технічно чистих металів, так саме як інші фізичні властивості, зокрема, теплові (температура і теплота плавлення) та механічні (твердість та модуль пружності) підлягає однотипній періодичній закономірності, природа якої пов'язана з наявністю періодичності у зміні величини міжатомної взаємодії у кристалічній ґратці. У зв'язку з цим для перевірки, поглиблення і подальшого розвитку реолого-кінетичного підходу до природи абразивної зносостійкості необхідно ви-

вчити характер змін реологічних властивостей технічно чистих металів у Періодичній системі елементів і співставити їх з відповідними закономірностями зносостійкості. Розв'язуванню цієї задачі присвячено дану працю.

Експериментальна та аналітична частина дослідження.

Дослідження абразивної зносостійкості технічно чистих металів проводилось у ряді наукових праць [4 - 6 тощо]. Результати цих досліджень показали, що природа зносостійкості складна і зумовлена вона фізичними властивостями, а також атомно-кристалічною будовою вказаних металів.

З урахуванням рекомендацій [4 - 6], як об'єкти дослідження нами обрано метали II - VI періоду Періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва, що можуть бути цікавими для роботи в умовах абразивного зношування. Фізичні характеристики металів приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Фізичні характеристики технічно чистих металів

Метал	Позначення	Тип гратки	Мікротвердість МПа	Модуль пружності, ГПа	Густина, кг/м ³	Температура плавлення, К	Теплопровідність, Вт/м·К	Енергія зв'язку Дж/моль·10 ⁵
Магній	Mg	ГЦУ	31	45	1740	924	151	0,15
Цирконій	Zr	-	90	108,7	6510	2133	16,3	5,23
Гафній	Hf	-	100	120	13310	2495	21,65	5,86
Кобальт	Co	-	145	212,8	8900	1766	67,4	4,39
Технецій	Tc	-	195	343	11500	2473	-	4,85
Реній	Re	-	200	470	21010	3453	69,4	6,9
Рутеній	Ru	-	220	472	12450	2523	-	6,69
Титан	Ti	-	250	140	4540	1990	14,7	4,69
Берилій	Be	-	320	360	1840	1557	142,9	3,2
Осмій	Os	-	400	580	22610	3323	53,1	7,28
Алюміній	Al	ГЦК	245	66,5	2700	933	212,4	3,11
Мідь	Cu	-	71	115,3	8960	1356	384	3,39
Нікель	Ni	-	130	197,6	8900	1726	58	4,22
Родій	Rh	-	139	320	12410	2239	147	5,77
Ірідій	Ir	-	164	520	22500	2683	57,2	6,95
Ніобій	Nb	ОЦК	60	106	8570	2773	51	6,69
Ванадій	V	-	70	135,2	5870	2173	30,2	4,98
Тантал	Ta	-	90	190	16600	3269	53	6,69
Залізо	Fe	-	140	210	7870	1812	72,3	4,04
Хром	Cr	-	221	253	7140	2073	65,4	3,35
Молібден	Mo	-	282	336,3	10300	2895	142,9	6,51
Вольфрам	W	-	425	420	19300	3653	163,4	8,44

Для визначення їх триботехнічних та реологічних характеристик скористались методичним забезпеченням [7].

Дослідне вивчення залежності $\varepsilon = f(R)$ дало результати у вигляді множини точок з координатами (ε, R) (рис.1). Для аналітичного завдання функції $\varepsilon = f(R)$ необхідно вибрати тип емпіричної формули. Цей вибір зроблено на підґрунті математичного методу вирівнювання [8] із залученням комп'ютерної обробки результатів експерименту. Найпридатнішою визначено таку формулу степеневі функції:

$$\varepsilon = 6,27 \cdot 10^{-11} R^{1,32} \quad (2)$$

Графік емпіричної залежності ε від R , що відповідає формулі (1), показано на рис. 1 суцільною лінією.

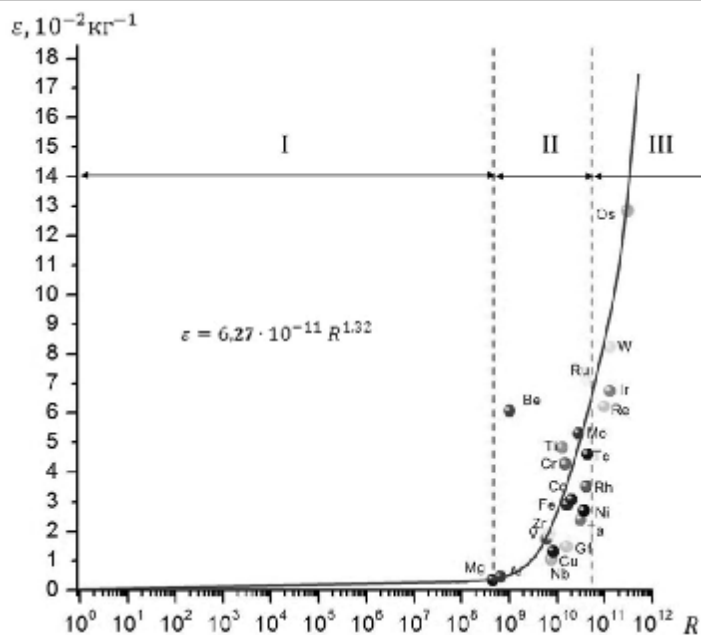


Рис. 1 – Емпірична залежність абразивної зносостійкості ε від параметра R (суцільна лінія). Темні точки – експериментальні дані

На особливу увагу заслуговує факт збігу його форми з формою графіку залежності абразивної зносостійкості від енергії зв'язку металів, що дає підстави розглядати реологічний параметр, як одну з характеристик міжатомного зв'язку у кристалічній ґратці. Разом з тим, така форма графіку вказує на випереджаюче зростання зносостійкості металів, порівняно зі зростанням їх реологічного параметру R . Встановлено, що за величини реологічного параметру, яка перевищує значення $R \approx 2 \cdot 10^9$ МПа спостерігається стрімке зростання зносостійкості. Так якщо при зміні реологічного параметру у діапазоні величин $R = 0 \dots 2 \cdot 10^9$ МПа зносостійкість підвищується у 8 разів, то збільшення його величини у діапазоні $R = (2 \cdot 10^9 \div 3 \cdot 10^{11})$ МПа супроводжується підвищенням зносостійкості майже у 1300 разів.

Відповідно до подвійної молекулярно-механічної природи взаємодії поверхонь при терті, нелінійність ε як функції R , мірою якої є показник степені у формулі (1) ймовірніше за все, пов'язана з поступовим переходом від переважно адгезійного характеру контактної взаємодії до абразивного. Діапазон величин реологічного параметру, який відповідає вказаному переходу, можна умовно поділити на три області (рис.1): область I (охоплює діапазон величин, реологічного параметру $R < 5 \cdot 10^8$ МПа) - у якій переважає вплив фактору адгезійної взаємодії, область II (охоплює діапазон величин реологічного параметру $5 \cdot 10^8 \leq R \leq 7 \cdot 10^{10}$ МПа) - у якій впливи адгезійного і абразивного факторів поступово вирівнюються; область III (охоплює діапазон величин реологічного параметру $R > 7 \cdot 10^{10}$ МПа) - у якій превалюючим буде вплив фактору абразивної взаємодії.

На макроскопічному рівні встановлена закономірність допускає таку фізичну інтерпретацію: чим більше опір виникненню та розвитку бокових тріщин на межах пластичних зон біля вершин вертикальних тріщин, тим вище зносостійкість металу.

Звертає на себе увагу, що експериментальні точки не завжди добре укладаються на графік емпіричної залежності $\varepsilon = f(R)$. І хоча з позиції математичної статистики цей факт слід визнати незначущим, однак з позиції фізики він заслуговує на увагу для глибшого розуміння природи абразивної зносостійкості.

Розв'язання завдання, що було поставлено у даній роботі, проводили шляхом кореляційного аналізу закономірностей змін зносостійкості ε , реологічного параметру R , в'язкості руйнування K_{IC} і розміру пластичної зони h_n по мірі зростання атомного номеру (періоду) хімічного елемента. Отримані результати (рис.2) підтвердили періодичний характер зміни зносостійкості ε зі зростанням атомного номеру метала. Поряд з цим, встановлено, що реологічні властивості – реологічний параметр R , в'язкість руйнування K_{IC} , розмір пластичної зони h_n також підлягають різним періодичним закономірностям. Серед них зі зносостійкістю ε краще за інші корелює реологічний параметр R , що дає підстави констатувати таке: закономірності зміни зносостійкості та реологічного параметру мають однакову природу, яка

пов'язана з наявністю періодичності у зміні величини міжатомної взаємодії у кристалічній ґратці. Найтісніше співставність між вказаними властивостями простежується у металах, що розташовані уздовж великих періодів Періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва.

Встановлено збіг закономірностей зносостійкості та реологічного параметру: приблизно до середини періоду обидва показники немонотонно зростають, після чого так саме знижуються. При цьому між ними спостерігається задовільна кількісна відповідність. Для переважної більшості хімічних елементів II-IV періоду відмічені закономірності зберігаються, однак у ряді випадків, зокрема, берилію, титану, нікелю, міді тощо кількісна відповідність між величинами ε та R помітно порушується. Відхилення зносостійкості цих металів від загальної закономірності відмічалось також в роботі [4], де воно пояснювалось впливом високого вмісту домішок у зразках. Однак, на наш погляд, таке пояснення є недостатнім, оскільки домішки неминуче містяться у всіх елементах II-IV періоду без виключення. Окрім того, воно не розкриває причин змін залежності між ε та R , які спостерігались в даній роботі. Тому отримані розходження потребують іншого пояснення і, ймовірно за все, вони пов'язані з впливом фізико-хімічної взаємодії між металом та абразивом. Відомо [9,10], що при обробці шліфуванням титанових та нікелевих сплавів спостерігаються істотні труднощі. Пояснюються вони тим, що унаслідок явища схоплення, відбувається прилипання частинок оброблюваного матеріалу до абразивних зерен круга. Завдяки цьому, на останніх утворюються нарости, які заповнюють поглиблення між зернами. Поряд з утворенням наростів на абразивних зернах, відбувається також заповнення поглиблень між зернами продуктами руйнування оброблюваного матеріалу, причому у одних випадках продукти руйнування прилипають до абразивного круга, а у інших не прилипають. У такий спосіб пари контактної взаємодії абразив – титан та абразив – нікель перетворюються на пари тертя однойменних металів титан-титан та нікель-нікель, у яких провідну роль відіграє не абразивна, а адгезійна взаємодія, що негативно відбивається на продуктивності і якості обробки металів шліфуванням. Судячи з усього, саме за таким механізмом реалізується зношування берилію, титану, нікелю та міді у нашому випадку. Якщо керуватись реологічним параметром R , як критерієм зносостійкості, то, виходячи з емпіричної залежності $\varepsilon = f(R)$ (рис.1), зміна зносостійкості зі зростанням атомного номеру хімічного елемента, ймовірно за все буде такою, як це показано пунктирною лінією на рис. 2.

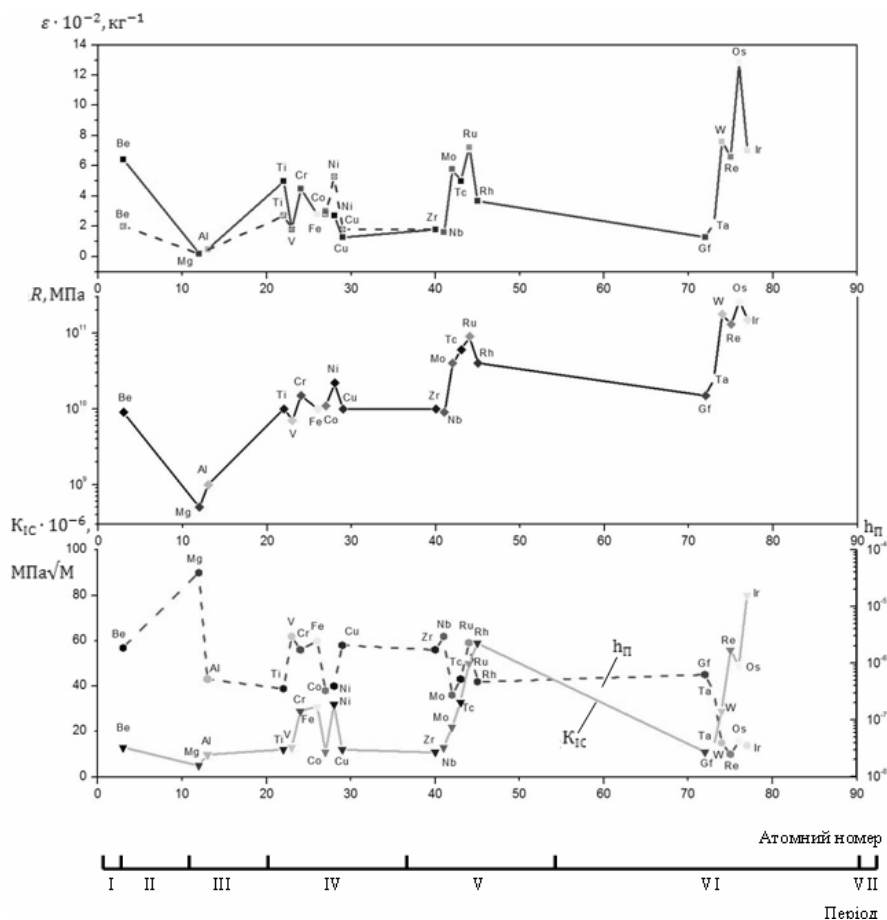


Рис. 2 – Залежності абразивної зносостійкості ε , реологічного параметра R , в'язкості районування K_{IC} і товщини деформованого шару h_n , для елементів періодичної системи II - VI періодів

Звідки випливає, що при переході від абразивної взаємодії до адгезійної і навпаки пошкоджуваність металів може як збільшуватись (нікель, мідь) так і зменшуватись (берилій, титан). Напрямок зміни зносостійкості визначається тим, який процес реалізується на робочій поверхні металу при розвитку явища схоплення: виривання частинок металу з маси зразка або прилипання цих частинок до його поверхні [11]. Вид процесу істотно залежить від типу кристалічної ґратки, механічних властивостей і схильності до схоплення металу. Так, пари тертя з однойменних металів, що мають гексоганальну щільно укладену (ГЩУ) кристалічну ґратку і відносно високий рівень механічних властивостей, до числа яких належать пари берилій-берилій і титан-титан, проявляють високу схильність до схоплення. При терті таких пар на ділянках фактичної площини контакту відбувається адгезійна взаємодія, у результаті якої утворюються вузли схоплення. Вони витримують великі пластичні деформації і хімічну взаємодію з активними елементами повітря (кисень, азот, водень), що сприяє їх інтенсивному зміцненню і при переміщенні шліфувального круга поверхнею зразка відбувається виривання частинок металу як з маси зразка так і маси металу, який прилипнув до круга. Пошкодження на поверхнях тертя носять глибинний характер зі значним налипанням металу на поверхні зразка і виривами металу з шару на поверхні круга. Отже, підвищення зносостійкості берилію та титану відповідно у 1,85 та 1,53 рази порівняно з умовами абразивного зношування можна пояснити прилипанням металу на поверхні зразка за рахунок розвитку явища схоплення при терті.

Пари тертя з металів, що мають гранецентровану (ГЦК) кристалічну ґратку і невисокий рівень механічних властивостей, до числа яких належать пари нікель-нікель та мідь-мідь менш схильні до схоплення, ніж пари тертя берилій-берилій і титан-титан. Тому характер пошкодження на поверхнях тертя у результаті розвитку явища схоплення також буде іншим. Тепер прилипання металу спостерігається на поверхні металу круга, а глибинні вириви металу – на поверхні зразка. У результаті зносостійкості нікелю та міді знижується відповідно у 3,2 та 2,45 рази порівняно з умовами абразивного зношування.

Аналіз змін реологічних властивостей – в'язкості руйнування K_{IC} та розміру пластичної зони h_n біля вершин тріщин зі зростанням атомного номеру (рис. 2) показав, що найбільший вплив фізико-хімічної взаємодії між абразивом і металом на зносостійкість останнього, як правило, спостерігається у хімічних елементах з невеликою в'язкістю руйнування K_{IC} і достатньо розвинутою пластичною зоною біля вершин тріщин. Величина реологічного параметру таких металів знаходиться у діапазоні $0 \leq R \leq 7 \cdot 10^{10}$ МПа. На графіку емпіричної залежності $\varepsilon = f(R)$ (рис. 1) вони розміщуються у областях I і II, де визначальний вплив на зношування чинить адегезійна взаємодія, а руйнування поверхні відбувається за квазістатичним механізмом. І це не випадково, оскільки за такого навантаження у металі утворюється і розвивається дуже велика кількість мікро і –макроефектів будови - активних центрів, на яких з високою інтенсивністю протікають різноманітні фізико-хімічні процеси [12].

У періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва такі метали знаходяться, головним чином, у II - V періодах (рис. 2). Співставлення зносостійкості ε з реологічним параметром R показало, що характер зв'язку між ними для металів різних періодів не однаковий. Так, наприклад, якщо для металів VI періоду спостерігається тісний корелятивний зв'язок між вказаними величинами, то для металів V періоду зв'язок є нестійким, а для металів IV періоду він взагалі відсутній. Цей факт повністю узгоджується з прийнятою у даній роботі гіпотезою щодо поступового переходу від переважно адгезійного характеру контактної взаємодії до абразивного при терті по мірі зростання номера періоду у Періодичній системі елементів.

Для кількісної оцінки впливу адгезійної взаємодії необхідний показовий критерій, який би урахував здатність металів до схоплення, оскільки реологічний параметр R у силу своєї природи придатний лише для якісної оцінки рівня зносостійкості групи металів IV періоду в цілому, однак, адекватна оцінка зносостійкості кожного окремого металу з його допомогою можлива не завжди. Відомо [13], що у процесі схоплення важливе значення має відношення між механічними властивостями поверхневої оксидної плівки і основного металу. Тому здатність останнього до схоплення дуже часто оцінюють за величиною відношення твердості оксиду до твердості металу: чим воно більше, тим метал легше схоплюється в умовах тертя. Істотним недоліком цього критерію є те, що він не урахує спосіб руйнування вузлів схоплення, яке відбувається головним чином, не на поверхні, а у масі тонкого при поверхневого шару металу [13]. Тому, як характеристика механічних властивостей основи у критерій схоплення замість твердості – властивості поверхні, повинна входити така об'ємна властивість, яка одночасно характеризує опір руйнуванню і здатність металу до адгезії.

Руйнування вузлів схоплення відбувається у спосіб зрізування [14], а, отже, воно неможливе без розвитку горизонтальних тріщин, що зароджуються на межах вузлів схоплення у основному металі. Для того, щоб розвиватись тріщини повинні долати теоретичну міцність $\sigma_{теор.}$ металу на своїх краях. У той самий час $\sigma_{теор.}$ відповідає максимуму сили адгезійної взаємодії $F_{адг}$ між новими поверхнями, що неперервно утворюються на краях тріщин у процесі їх розвитку і, у зв'язку з цим, є характеристикою адгезійної взаємодії металів [4]. Виходячи з викладених міркувань, здійснено перевірку можливості застосуван-

ня $\sigma_{теор}$ у вищезазначеному критерії схильності до скоплення металів, замість показника твердості. Тоді критерій матиме такий вигляд:

$$A = \frac{HV_0}{\sigma_{теор}}. \quad (3)$$

де A – адгезійний параметр;

HV_0 – твердість оксиду метала;

$\sigma_{теор}$ – теоретична міцність металу.

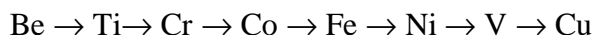
Результати визначення адгезійного параметру A для металів IV періоду Періодичної системи приведені в табл. 2.

Таблиця 2

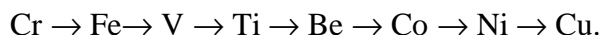
Адгезійний параметр металів

Метал	Твердість оксиду, HV_0 , ГПА	Теоретична міцність металу, $\sigma_{теор}$, ГПА	Адгезійний параметр $A \cdot 10^{-3}$	Твердість металу, HV , ГПА	Відношення твердості оксиду до твердості металу, HV_0 / HV
Be	15	2490	6,02	2,4	6,25
Ti	12	2930	4,13	1,88	6,38
V	3,52	4690	0,75	0,53	6,64
Cr	27	7420	3,63	1,66	16,26
Fe	10,98	7840	1,4	1,05	10,45
Co	6,7	3350	2	1,09	6,14
Ni	4,6	5640	0,82	0,98	4,69
Cu	2	4010	0,49	0,53	3,77

Звідки видно, що за зменшенням адгезійного параметру A метали розташовуються у такий послідовності:



а за зменшенням відношення твердості оксиду до твердості металу послідовність розташування така:



Якщо ці послідовності співставити з послідовністю зменшення зносостійкості (рис. 2, а), то побачимо добрий збіг з послідовністю адгезійного параметру і його відсутність з послідовністю відношення твердості оксиду до твердості металу. Наявність кореляції між рядами зносостійкості та адгезійного параметру дає підстави вважати останній адекватним критерієм схильності металів до скоплення: чим вище адгезійний параметр, тим легше скоплюється метал в умовах тертя. За величиною адгезійного параметру можна прогнозувати напрямок, у якому розвиватиметься явище скоплення при терті: виривання частинок металу з маси зразка або їх прилипання до його поверхні. Так, з даних табл. 2 випливає, що у випадку, коли $A > 1$ ймовірнішим буде прилипання частинок зносу до поверхні зразка. Інтенсивність цього процесу підвищується по мірі збільшення A . Якщо $A < 1$, то істотно зростає ймовірність реалізації процесу виривання частинок зносу з поверхні зразка. Інтенсивність цього процесу підвищується по мірі зменшення A .

З іншого боку корелятивний зв'язок зносостійкості з адгезійним параметром підтверджує доцільність висловленого припущення щодо впливу адгезійної взаємодії на зносостійкість металів, який у ряді випадків, як, наприклад, для металів IV періоду є визначальним. Якщо урахувати чинник адгезійної взаємодії, то ряди зносостійкості відповідають перехідним металам II - VI періодів (II - VIII групи) у такий послідовності зростання (рис. 2): перший ряд – берилій, рутеній, осмій; другий ряд – титан, молибден, вольфрам; третій ряд – хром (нікель), технецій, іридій; четвертий ряд – кобальт (залізо), родій, реній. Послідовність розташування металів V та VI періоду за підвищенням зносостійкості знаходиться у відповідності з послідовністю підвищення реологічного параметру (табл. 2). У зв'язку з цим, з'являються підстави розглядати абразивну і адгезійну взаємодію при терті незалежно одна від одної.

Висновки

На підставі результатів досліджень, що представлені в даній роботі можна констатувати таке:

1. Встановлено прямий корелятивний зв'язок між абразивною зносостійкістю та реологічним параметром технічно чистих металів різної будови, який описується емпіричною формулою степеневого типу.

2. Нелінійність функції $\varepsilon = f(R)$ пов'язана з поступовим переходом від переважно адгезійного характеру взаємодії при терті до абразивного по мірі зростання номеру періода елементів у Періодичній системі.

3. Встановлено, що періодичним закономірностям зі зростанням атомного номеру підлягають як зносостійкість, так і реологічні властивості металів. Серед них зі зносостійкістю краще за інші корелює реологічний параметр, що дає підстави констатувати таке: закономірності зміни зносостійкості і реологічного параметра мають однакову природу, яка пов'язана з періодичністю у зміні величини міжатомної взаємодії у кристалічній ґратці.

4. Для ряду металів II-IV періоду, зокрема, берилію, титану, нікелю, міді, тощо спостерігається порушення кількісної відповідності між зносостійкістю та реологічним параметром, яке пояснюється зростаючим впливом адгезійної взаємодії між металом та абразивом на пошкоджуваність металу.

5. Запропоновано новий показовий критерій для оцінки здатності до схоплення металу – адгезійний параметр, який ураховує спосіб руйнування вузлів схоплення.

6. Визначенні ряди максимальної зносостійкості, які відповідають багатовалентним перехідним металам IV-VI періодів (VI-VIII груп). Порядок розташування металів V та VI періодів за зростанням зносостійкості у всіх рядах відповідає порядку за зростанням величини реологічного параметра. Порядок розташування металів IV періоду за зростанням зносостійкості якісно також відповідає порядку за зростанням реологічного параметра, а кількісно – за зростанням адгезійного параметра.

Література

1. Львов В.Н. Основы абразивной износостойкости деталей строительных машин – М.: Стройиздат, 1970. – 178 с. – Библиогр.: с. 166-167.
2. Механика контактного разрушения: (Монография) / Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. – М.: Наука; 1989. – 224 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 183-219.
3. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатністю механічних трибосистем: Автореф. дис. доктора техн. наук / НАУ. – К.: 2007 – 40 с.
4. Хрущов М.М. (мл.) О связи межатомного взаимодействия атомных свойств и износостойкости металлов// Трение и износ – 1990. – Т.1. – №3. – С.409-415.
5. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание бурильного инструмента / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, В.А. Доценко: М.: Наука, 1980 – 206 с.: ил. табл. – Библиогр.: с. 198-203.
6. Исследование изнашивания металлов: (Монография) / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. – М.: АН СССР, 1960. – 351 с. – Библиогр.: с. 337-342.
7. Дворук В.І., Герасимова О.В. Вплив структурного стану на абразивне руйнування сталі // Проблеми тертя та зношування: Зб. наук праць. – К., 2007. – Вип. 47. – С. 82-94.
8. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / М.: Наука, 1971. – 192 с.
9. Титановые сплавы в машиностроении / Чечулин В.В., Ушков С.С., Разуваева И.Н. и др.. – М.: Машиностроение, 1977. – 248 с.: ил., табл. – Библиограф.: с.241-247.
10. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с. – Библиогр.: с. 268-270.
11. Носовский И.Г. Влияние газовой среды на знос металлов – К.: Техника, 1968. – 181 с. – Библиогр.: с. 171-178.
12. Микросварка давлением: (Монография) // Ю.Л. Красулин, Г.В. Назаров. – М.: Металлургия, 1976. – 160 с.: ил., табл. Библиогр.: с. 153-159.
13. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и функциональном взаимодействии / Пер с англ.. А.В. Белый, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.
14. Кузнецов В.Д. Наросты при резании и трении – М.: ГИТТЛ, 1956. – 284с. – Библиогр.: с. 276-280.: с. 276-280.

Надійшла 24.03.2011