

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.1(106).19821

В. І. ДВОРУК

*Державний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна,*

## **ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТА РУЙНУВАННЯ СПЛАВІВ ЗМІЦНЕНИХ ДИСПЕРСНИМИ ФАЗАМИ ПРИ АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННІ**

*Представлені результати вивчення закономірностей руйнування та їх впливу на зносостійкість дисперснозміцнених сплавів: сталі 80X20P3T, білого чавуну 350X10B8T2, композиту КС1 з армуючою основою зерен реліту уламкової форми, композиту КС2 з армуючою основою зерен реліту сферичної форми. Отримано ряд зносостійкості сплавів, що відповідає їх розташуванню за величиною реологічного параметра. Це вказує на реологічну природу зносостійкості дисперснозміцнених сплавів при зношуванні по моноліту і гідроабразивному зношуванні. Встановлено контролюючу роль в'язкості руйнування у формуванні реологічного параметра та зносостійкості. Показано, що залежно від рівня деформаційних властивостей реологічний параметр контролює різні стадії руйнування дисперснозміцнених сплавів. Так, для білого чавуну і сталі підконтрольною є стадія розвитку тріщин, на якій рівень їх пластичної деформації виявляється достатнім для уповільнення зростання тріщин за рахунок релаксації напруг в їх вершинах, а композитів - стадія утворення зародків тріщин, коли пластична деформація протікає в масштабах моноатомних шарів. Критеріями зносостійкості, що мають прямий кількісний зв'язок зі зносом дисперснозміцнених сплавів при зношуванні по моноліту та гідроабразивному зношуванні визначені реологічний та реолого-втомний параметри. При цьому якісний характер закономірностей зносу при зношуванні по моноліту адекватніше відображає реологічний, а при гідроабразивному - реолого-втомний параметр. Констатовано, що, крім збільшення в'язкості руйнування, армуюча основа зерен реліту сферичної форми також сприяє зростанню істинної деформації та локалізації її пластичної складової у тонкішому шарі композиту проти уламкової. Це спричиняє підвищення реологічного параметра, а, отже, зносостійкості композиту зі сферичною формою зерен реліту.*

**Ключові слова:** абразивне зношування, зношування ковзанням по моноліту, гідроабразивне зношування, реологічний параметр, реолого-втомний параметр, в'язкість руйнування, циклічна в'язкість деформування, розмір області нелінійних ефектів, істина деформація, сталь, білий чавун, композит

**Вступ.** Для деталей технічних засобів різного призначення одним з найпоширеніших є зношування під дією абразиву. Існує думка [1,2], що при експлуатації об'єктів, виготовлених з металів, абразивному зношуванню може бути приписано близько 50% всіх триботехнічних проблем. Витрати, пов'язані з наслідками абразивного зносу, досить високі і знаходяться в межах від 1 до 4% національного продукту розвинених країн світу [3].

В натурних умовах роботи техніки при абразивному зношуванні можливі різні схеми силової взаємодії абразиву з поверхнею деталі, зокрема, тертя ковзання та зіткнення металу з абразивом. Для зазначених схем характерний високий рівень силового впливу в зоні фрикційного контакту, внаслідок чого

вони є джерелами різних видів абразивного зношування, зокрема, зношування по моноліту абразиву і гідроабразивного зношування.

Особливістю зношування по моноліту абразиву (великі шматки гірської породи або абразивний круг) є те, що відбувається воно за рахунок тертя ковзання пов'язаних між собою частинок абразиву щодо деталі. Ефективність впливу моноліту на металеву поверхню обумовлена тим, що абразив в ньому діє на метал як безліч деформуючих та руйнівних інденторів, в результаті чого відбувається відокремлення металу з поверхні у вигляді частинок зносу, а також руйнування самого абразиву шляхом викришування, роздавлювання, сколів, що пов'язано з оновленням його зношувальної здатності по відношенню до металу [4].

Зношуванню по моноліту абразиву піддаються скребки конвєсєрів, ножі бульдозерів, ковші екскаваторів, гірський інструмент, деталі бурильної колони, метали при обробці абразивним інструментом тощо.

Гідроабразивне зношування відбувається в результаті ударної дії зваженого у рідині абразиву, що переміщається щодо деталі. Відрізнявальною особливістю цього виду зношування є залежність механізму руйнування металів від кута атаки абразиву. При малих кутах атаки зношування відбувається переважно за рахунок багаторазового пластичного деформування поверхні та постійного у часі утворення продуктів зносу. При кутах атаки близьких до прямого продукти зношування утворюються періодично в часі. Як правило, знос металів при прямих кутах атаки абразиву виявляється менше зносу при кутах атаки 30 - 60 ° [5].

Гідроабразивному зношуванню піддаються лопаті коліс насосів, трубопроводи земснарядів, деталі шламових та піскових снарядів, деталі бурильної колони тощо.

Незважаючи на відмінність схеми силової взаємодії абразиву з деталлю, між зазначеними різновидами абразивного зношування простежується спільність. Для кожного з них характерне пряме занурення абразиву в поверхню, що зношується, і поступальне ковзання по ній, які проявляються одночасно [6]. Здатність абразиву до такої взаємодії обумовлює ушкодження деталі шляхом розвитку в її поверхневому шарі взаємозалежних кінетичних процесів пластичного деформування і руйнування. Тому критерії зносостійкості для видів зношування, що розглядаються мають враховувати такий зв'язок і на цій основі визначати загальний підхід до пошуку шляхів захисту металів від зносу.

Як при зношуванні по моноліту абразиву, так і гідроабразивному зношуванні відокремленню часток зносу передують руйнування металу, яке передбачає опір цьому процесу. У сучасних зносостійких сплавах необхідний опір руйнуванню часто забезпечується двома видами зміцнення внаслідок утворення в матриці дисперсних фаз: дисперсійним та дисперсним.

При дисперсійному зміцненні опір руйнуванню сплаву підвищується внаслідок утворення дисперсних зміцнювальних фаз при розпаді пересиченого твердого розчину. Прикладами дисперсійнозміцнених сплавів можуть бути високоміцні сталі й білі чавуни.

При дисперсному зміцненні опір руйнуванню сплаву підвищується шляхом штучного введення в сплав на одній з технологічних стадій його отримання дисперсних зміцнювальних фаз. До дисперснозміцнених сплавів відносяться, зокрема, композити.

Проведений аналіз інформаційних джерел показав, що на сьогодні закономірності руйнування дисперснозміцнених сплавів при абразивному зношуванні до кінця не вивчені, що вказує на необхідність продовження роботи в цьому напрямку.

У зв'язку з вище викладеним, метою цієї статті є доповнення та розвиток існуючих уявлень про зносостійкість та руйнування сплавів, зміцнених дисперсними фазами при зношуванні по моноліт та гідроабразивному зношуванні.

**Матеріали та методи дослідження.** Об'єктами дослідження були такі сплави: сталь 80X20P3T, білий чавун 350X10B8T2, макрогетерогенні композити КС1 - з армуючою основою зерен реліту осколкової форми і КС2 - з армуючою основою зерен реліту сферичної форми.

Сталь та білий чавун отримували методом широкошарового наплавлення самозахисних порошкових дротів ПП-АН170 та БН-23 на сталь 40ХН електродуговим способом за допомогою установки УД-209.

Хімічний склад сталі та білого чавуну представлений у таблиці 1

Таблиця 1

Хімічний склад сталі та білого чавуну

Сплав	Склад, %				
	С	Cr	В	Nb	Ti
80X20P3T	0,8	20	3	-	0,6
350X10B8T2	3,5	10	-	8	2

Довтектоїдна структура сталі 80X20P3T складалась з великих голок боридів, розташованих в матриці, яка зміцнена дрібнодисперсними групами боридів хрому і карбоборидів титану.

Структура білого чавуна 350X10B8T2 складалась з твердого розчину та дисперсних карбідів хрому, ніобію і титану.

Твердість сталі HRC 58 – 67, білого чавуну – HRC 50 – 56.

Макрогетерогенні композити отримували методом наплавлення стрічкових релітів АН-ЛЗП та АН-ЛСП, до складу наповнювачів яких входили зерна реліту розміром 0,45-0,63 мм уламкової та сферичної форми, відповідно. Наплавлення на сталь 40ХН проводили плазмовим способом за допомогою установки УД-417.

Структура композита складалась із зерен реліту, розташованих у сталевій матриці, хімічний склад якої представлений у таблиці 2

Таблиця 2

## Хімічний склад матриць композитів

Сплав	Склад, %					
	Si	Mn	Cr	Ti	W	Al
Композити КС1 и КС2	1,6	1,3	3,4	1,1	20	4,5

Однорідна структура матриці складалась з твердого розчину вольфраму в залізі за мінімальної кількості евтектики і вторинних залізвольфрамових карбідів.

Мікротвердість зерен реліту в матриці  $H_{\mu} = 1780-2120$ , а матриці  $H_{\mu} = 790-840$ .

Триботехнічні дослідження при зношуванні по моноліту проводили за методикою [7] на установці схема якої представлена на рис.1.

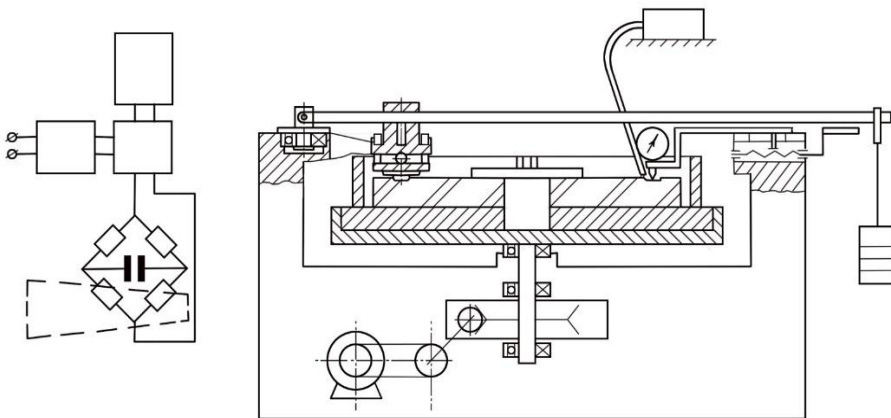


Рис. 1. Схема установки для досліджень при зношуванні по моноліту абразиву

Режим досліджень: швидкість ковзання зразка –  $V = 0,5$  m/s, шлях тертя –  $S = 30$  m, контактний тиск –  $P = 1,055$  МПа. Зразок для дослідження являв собою куб розмірами  $16 \times 16 \times 16$  mm одна з граней якого, що містить нанесений на неї дисперснозміцнений сплав була поверхнею тертя. Як абразив застосовували шліфувальний круг ПП 450 63 203, 24А 40НС2 ГОСТ 2424-83 на основі електрокорунду білого. Сутність випробувань полягала в ковзанні торця шліфувального кола поверхнею притисненого до нього зразка. У процесі випробувань вимірювали та записували силу тертя.

Триботехнічні дослідження при гідроабразивному зношуванні проводили за методикою [8] на установці, схема якої представлена на рис.2.

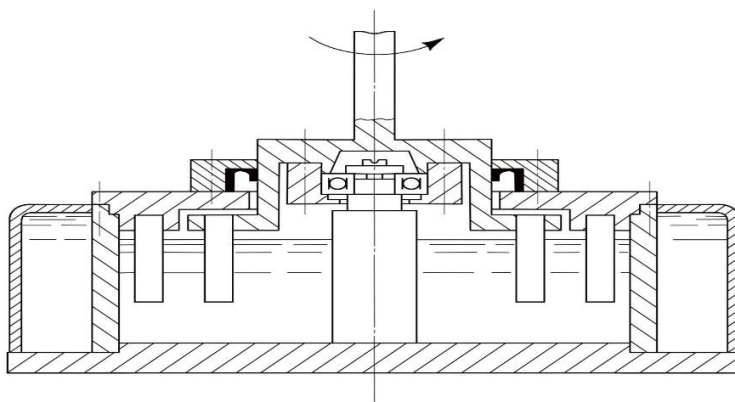


Рис. 2. Схема установки для досліджень при гідроабразивному зношуванні

Режим досліджень: швидкість обертання зразків -  $V = 18 \text{ m / s}$ , час випробувань -  $t = 7200 \text{ s}$ , робоче середовище – вода, що містить у собі абразив. Співвідношення об'ємів води й абразиву в робочому середовищі становило 1:1,5. Зразок для випробувань являв собою пластину розміром  $60 \times 10 \times 13 \text{ мм}$ , поверхня тертя якої містила нанесений на неї дисперснозміцнений сплав. Як абразив використовували подрібнену гранітну породу розміром фракції  $0,63 - 1,00 \text{ мм}$ . Сутність випробувань полягала в динамічній дії двофазного робочого середовища на поверхню тертя при обертанні в ньому чотирьох зразків.

Перед випробуваннями на зношування по моноліту абразиву і гідроабразивне зношування поверхні тертя зразків піддавали шліфуванню до  $Rz 32$ .

Знос  $G$  сплаву вимірювали методом зважування зразків на електронних аналітичних вагах CP 34001S (фірма «Sartorius» (Німеччина)). Мірою зносостійкості служила величина, зворотна зносу зразка  $\epsilon = 1/G$ .

Вивчення процесу руйнування при зазначених видах абразивного зношування проводили із залученням таких енергетичних та деформаційних характеристик дисперснозміцнених сплавів: в'язкості руйнування  $K_{1c}$ , розміру області нелінійних ефектів в околах вершин тріщин  $h$ , реологічного параметра  $R = K_{1c}/h^{1/2}$  істинної деформації  $\epsilon_{true}$ , реолого-втомного параметра  $R_f = R (\epsilon_{true}/2\Delta\epsilon)^2$ . Для визначення зазначених характеристик використовували відповідні методи [9 – 11]. Отримані результати експериментальних досліджень обробляли методами математичної статистики.

**Результати дослідження та їх аналіз.** На рис. 3 представлені результати проведених триботехнічних та реологічних досліджень, з яких випливає, що в напрямку підвищення зносостійкості при зношуванні по моноліту і гідроабразивному зношуванні досліджувані дисперснозміцнені сплави розташовуються в такий ряд:

350X10B8T2 → 80X20P3T → Композит KC1 → Композит KC2.

Отриманий ряд сплавів відповідає їх розташуванню за величиною реологічного параметра цьому ж рисунку

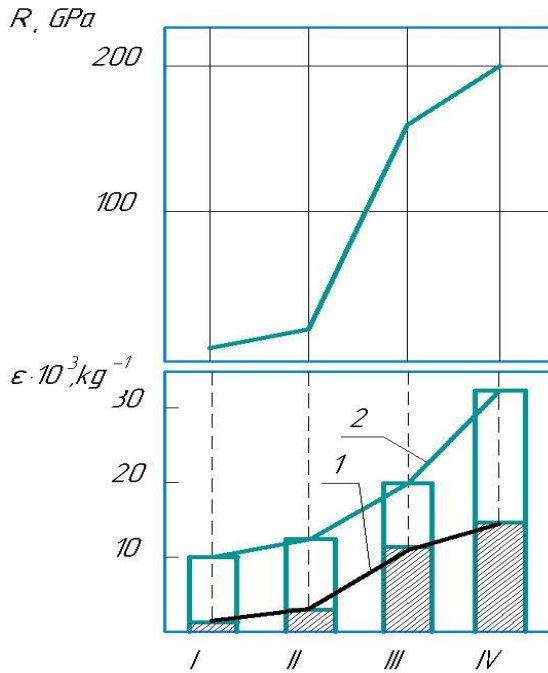


Рис. 3. Зіставлення зносостійкості ( $\epsilon$ ) при зношуванні по моноліту абразиву (1) та гідроабразивному зношуванні (2) з реологічним параметром ( $R$ ) сплавів: I – 350X10B8T2; II - 80X20P3T; III - Композит КМ 1; IV – Композит КМ 2

Проведене зіставлення зносостійкості та величини реологічного параметра досліджених сплавів (рис. 3) показало наявність такого корелятивного зв'язку між ними: чим вищий реологічний параметр, тим більша зносостійкість сплаву. Це свідчить про реологічну природу абразивного зношування. Отже, фактором, який контролює зносостійкість є реологічний параметр, що дає підставу вважати його загальним критерієм зносостійкості. У спільності цього критерію виявляється єдиний підхід до пошуку шляхів підвищення зносостійкості при зношуванні по моноліту абразиву та гідроабразивне зношування, сутність якого полягає в доцільності його збільшення.

З урахуванням вище викладеного, можна констатувати, що в міцнісній основі механізму зазначених видів абразивного зношування провідну роль грає опір поширенню осьових, радіальних і бічних тріщин на межі деструкційного шару сплаву з пластично-деструкційним, а механічний компонент контактної взаємодії є визначальним [12].

Таким чином, зносостійкість дисперснозміцнених сплавів при зношуванні по моноліту абразиву і гідроабразивному зношуванні доцільно ранжувати за реологічним параметром.

Для з'ясування закономірностей формування реологічного параметра та ролі його складових у цьому процесі було досліджено в'язкість руйнування  $K_{1c}$ , розмір області нелінійних ефектів на околах вершин тріщин  $h$  та істину деформацію  $\epsilon_{true}$  сплавів (рис. 4).

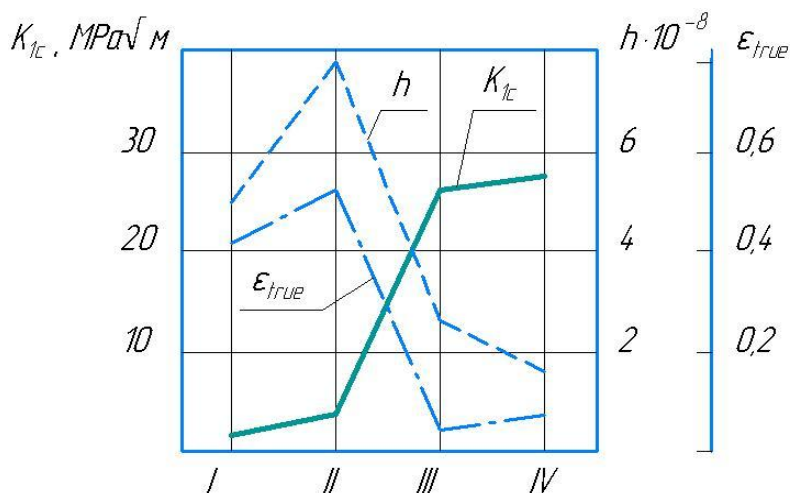


Рис. 4. – Зміна в'язкості руйнування ( $K_{1c}$ ), розміру області нелінійних ефектів на околах вершин тріщин ( $h$ ) та істинної деформації ( $\epsilon_{true}$ ) сплавів при зношуванні моноліту абразиву: I – 350X10B8T2; II - 80X20P3T; III – Композит КС1; IV – Композит КС 2

Проведене зіставлення (рис. 3 і 4) показало, що серед зазначених характеристик з реологічним параметром тісно корелює лише в'язкість руйнування  $K_{1c}$ .

Отже, при формуванні реологічного параметра та зносостійкості в умовах зношування по моноліту абразиву та гідроабразивного зношування визначальною характеристикою дисперснозміцнених сплавів є в'язкість руйнування.

Звертає на себе увагу, що рівень деформаційних характеристик білого чавуну і сталі значно вище, ніж композитів, тоді як для в'язкості руйнування спостерігається зворотне співвідношення (рис. 4). Цей факт дає підставу зробити висновок, що реологічний параметр характеризує різні стадії руйнування зазначених сплавів. Так, для білого чавуну і сталі, зважаючи на все, йдеться про стадію розвитку тріщин, на якій високий рівень пластичної деформації сприяє уповільненню їх зростання за рахунок релаксації напруг у вершинах тріщин та їх притупленню. Для композитів найбільш ймовірною є стадія утворення зародків тріщин, коли пластично деформовані в масштабах моноатомних шарів сплави ефективно розсіюють роботу тертя і тим самим перешкоджають зародженню тріщин.

Видно, що перехід від армуючої основи зерен реліту уламкової форми в композиті КС1 до сферичної в композиті КС2, крім підвищення в'язкості руйнування, також сприяє зростанню істинної деформації останнього та локалізації її пластичної складової у більш тонкому шарі. Цим пояснюється підвищення реологічного параметра композиту КС2 порівняно з КС1.

Повертаючись до рис.3, слід звернути увагу на те, що зносостійкість сплавів при гідроабразивному зношуванні, яка виражається залежністю 2, крім кількісних, також має якісні відмінності порівняно із залежністю 1 при зношуванні по моноліту абразиву. Що стосується кількісних відмінностей, то їх можна пояснити різними за своєю інтенсивністю видами руйнування –

статичного при зношуванні по моноліту абразиву і втомного при гідроабразивному зношуванні.

На ділянці композиційних сплавів якісні відмінності залежностей зносостійкості, найімовірніше, обумовлені зміною механізму втомної складової руйнування. Для перевірки цієї гіпотези було досліджено реолого-втомний параметр та циклічну в'язкість деформування досліджуваних сплавів (рис. 5).

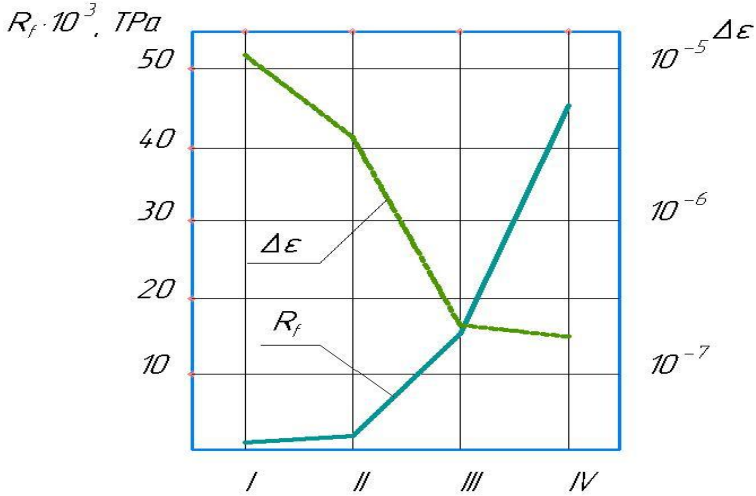


Рис. 5. Зіставлення циклічної в'язкості деформування ( $\Delta \epsilon$ ) з реолого-втомним параметром ( $R_f$ ) при гідроабразивному зношуванні сплавів: I – 350X10Б8Т2; II - 80X20Р3Т; III – Композит КС1; IV – Композит КС 2

Проведене зіставлення показало, що зазначені характеристики корелюють між собою у зворотно-пропорційній залежності: чим менша циклічна в'язкість деформування, тим вищий реолого-втомний параметр. Це підтверджує важливу роль внеску втомної складової у руйнування сплавів при гідроабразивному зношуванні.

Таблиця 3

Число циклів до руйнування при гідроабразивному зношуванні сплавів

Сплав	250X10Б8Т2	80X20Р3Т	Композит КС1	Композит КС2
Число циклів до руйнування	$3,65 \cdot 10^4$	$4,85 \cdot 10^4$	$1,32 \cdot 10^5$	$2,17 \cdot 10^5$

Аналіз даних, представлених у таблиці 3 показує, що кількість циклів до руйнування досліджуваних сплавів знаходиться близько до граничного значення області малоциклової втоми, яке приймається рівним  $5 \cdot 10^4$  [13]. Причому для білого чавуну 250X10Б8Т2 і сталі 80X20Р3Т кількість циклів до руйнування знаходиться в області малоциклової втоми, а для композитів КС1 і КС2 - багатоциклової. Отже, втомна складова руйнування при гідроабразивному зношуванні білого чавуну 250X10Б8Т2 та сталі 80X20Р3Т реалізується за механізмами малоциклової втоми, а композитів КС1 та КС2 – багатоциклової. Зважаючи на все, саме переходом від інтенсивних механізмів малоциклового



руйнування до менш інтенсивних багатоциклових механізмів і пояснюються якісні відмінності залежностей зносостійкості сплавів при гідроабразивному зношуванні від зношування по моноліту абразиву.

Зіставлення реолого-утомного параметра (рис. 5) з реологічним (рис. 3) показує наявність між ними такого корелятивного зв'язку: чим вище реологічний параметр, тим більше реолого-втомний параметр. Цей факт дає підставу зробити висновок, що в кількісному плані реолого-втомний параметр контролюється, головним чином, реологічним параметром.

### **Висновки**

1. Ряд зносостійкості дисперснозміцнених сплавів відповідає їх розташування за величиною реологічного параметра, що вказує на реологічну природу їх зносостійкості при зношуванні по моноліту абразиву і гідроабразивному зношуванні.

2. У міцнісній основі механізму зношування визначальним фактором є опір поширенню осевих, радіальних і бічних тріщин на межі деструкційного шару сплаву з пластично-деструкційним за провідної ролі механічного компоненту контактної взаємодії.

3. Формування реологічного параметра та зносостійкості при зношуванні по моноліту абразиву і гідроабразивному зношуванні контролюється в'язкістю руйнування дисперснозміцнених сплавів.

4. Залежно від рівня деформаційних властивостей реологічний параметр контролює різні стадії руйнування дисперснозміцнених сплавів. Так, для білого чавуну і сталі контрольованою є стадія розвитку тріщин, на якій рівень їх пластичної деформації виявляється достатнім для уповільнення зростання тріщин за рахунок релаксації напруги в їх вершинах, а для композитів - стадія утворення зародків тріщин, коли пластична деформація знаходиться в масштабах моноатомних шарів і ефективно розсіює роботу тертя.

5. Критеріями зносостійкості, що мають прямий кількісний зв'язок зі зносом дисперснозміцнених сплавів при зношуванні по моноліту абразиву і гідроабразивному зношуванні можуть бути як реологічний так і реолого-утомний параметр. При цьому якісний характер закономірностей зносу при зношуванні по моноліту абразиву адекватніше відображає реологічний, а при гідроабразивному - реолого-втомний параметр. У спільності критеріїв зносостійкості виявляється необхідність єдиного підходу до пошуку шляхів захисту від зносу сплавів у умовах, що розглядаються.

6. Армуюча основа зерен реліту сферичної форми, крім збільшення в'язкості руйнування, також сприяє зростанню істинної деформації та локалізації її пластичної складової у більш тонкому шарі композиту. Це спричиняє підвищення реологічного параметра, а, отже, зносостійкості композиту зі сферичною формою зерен реліту порівняно з уламковою.

---

---

**Список літератури**

1. Hawk J.A., Wilson R.D., Danks D.R., Cfrpillar M.T. (2002) Abrasive wear failures // ASM Handbook. Materials Park, ASM International, P. 906-921
2. Nutchings I.M. (2002) Abrasion in wear and manufacturing processes. Metal. Ital, № 2, P. 17-21
3. Canale L. C. F. (2000) Abrasive wear resistance of a Fe based hard coating containing Cr and Nb // 20<sup>th</sup> ASM Heat Treating Society Conf. St. Louis, MO USA, P. 9-12
4. Дворук В.І., Белих С.С. Абразивна зносостійкість легованих сталей // Проблеми трибології. – 2012. - № 1. - С. 14-19
5. Добровольский А.Г., Кошеленко П.И. (1989) Абразивная износостойкость материалов: [Справ. пособие] – Киев: «Наукова думка», С. 128
6. Дворук В.І. (2014) Вплив легування хромом конструкційної сталі на її абразивну зносостійкість після високотемпературної термрмеханічної обробки (ВТМО), Проблеми трибології, № 3, С. 59-64
7. Шевеля В.В., Дворук В.І., Довжок В.Е., Радченко А.В. (2000) Обеспечение триботехнических свойств композиционных материалов при абразивном изнашивании, Проблеми трибології, № 1, С. 61-72
8. Шевеля В.В., Дворук В.І., Посташ А.С., Радченко А.В. (2000) Моделирование гидроабразивного изнашивания материалов лабораторным методом, Вісник Київського міжнародного університету цивільної авіації, № 3 – 4, С. 39 -43
9. Дворук В.І. (1997) Научные основы повышения абразивной износостойкости деталей машин, Киев: «КМУГА», С. 101
10. Дворук В.І., Войтов В.А. (2014) Трібофізика, Харків: [б.в.], С. 374
11. Дворук В.І. (2018) Метод абразивного зношування для визначення ефективної поверхневої енергії кристалів, Проблеми трибології, № 4, С. 22— 31
12. Дворук В.І. (2024) Вплив геометричного розміру абразивних часток ґрунту на закономірності руйнування низьколегованої сталі при зношуванні, Проблеми тертя та зношування, № 3 (104), С. 65- 77
13. Трошенко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.А. (1992) Сопротивление материалов деформированию и разрушению: [Справ.пособие]: Часть 2 - Киев: «Наукова думка», С. 702с

Стаття надійшла до редакції 25.02.2025.

**Дворук Володимир Іванович** – докт. техн. наук, професор, професор кафедри загальної та прикладної фізики, Київський авіаційний інститут, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +3804067166, E-mail: volodymyr.dvoruk@npp.nau.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-5881-7441>

V. DVORUK

## WEAR RESISTANCE AND FAILURE OF ALLOYS STRENGTHENED BY DISPERSED PHASES UNDER ABRASIVE WEAR

The article presents the results of the study of the fracture patterns and their effect on the wear resistance of dispersion-hardened alloys: steel 80X20R3T, white cast iron 350X10B8T2, composite KS1 with a reinforcing base of fragmentary relite grains, composite KS2 with a reinforcing base of spherical relite grains. A series of wear resistance of dispersion-hardened alloys corresponding to their location by the value of the rheological parameter was obtained, which indicates the rheological nature of their wear resistance during wear against a monolith and hydroabrasive wear. The controlling role of fracture toughness in the formation of the rheological parameter and wear resistance was established. It is shown that depending on the level of deformation properties, the rheological parameter controls different stages of destruction of dispersion-hardened alloys. Thus, for white cast iron and steel, the stage of crack growth is controlled, at which the level of their plastic deformation is sufficient to slow down the growth of cracks due to the relaxation of stresses at their tips, and for composites - the stage of crack nucleation, when plastic deformation occurs on the scale of monoatomic layers and effectively dissipates the friction work. The rheological and rheological-fatigue parameters are determined as wear resistance criteria that have a direct quantitative relationship with the wear of dispersion-hardened alloys during wear against a monolith and hydroabrasive wear. At the same time, the qualitative nature of wear patterns during wear against a monolith is more adequately reflected by the rheological parameter, and during hydroabrasive wear - by the rheological-fatigue parameter. It has been established that, in addition to increasing the fracture toughness, the reinforcing base of spherical relite grains also promotes the growth of true deformation and localization of its plastic component in a thinner layer of the composite. This entails an increase in the rheological parameter, and, consequently, the wear resistance of the composite with a spherical relite grain shape compared to a fragmentary one.

**Key words:** abrasive wear, sliding wear on a monolith, hydroabrasive wear, rheological parameter, rheological-fatigue parameter, fracture toughness, cyclic deformation toughness, size of the nonlinear effects region, true deformation, steel, white cast iron, composite

### References

1. Hawk J.A., Wilson R.D., Danks D.R., Cfrpillar M.T. (2002) Abrasive wear failures // ASM Handbook. Materials Park, ASM International, pp. 906-921
2. Nutchings I.M. (2002) Abrasion in wear and manufacturing processes. *Metal. Ital*, no. 2, pp. 17-21
3. Canale L. C. F. (2000) Abrasive wear resistance of a Fe based hard coating containing Cr and Nb // 20th ASM Heat Treating Society Conf. St. Louis, MO USA, pp. 9-12
4. Dvoruk V.I., Belikh S.S. Abrasive wear resistance of alloy steels // *Problems of tribology*. – 2012. - No. 1. - P. 14-19
5. Dobrovolsky A.G., Koshelenko P.I. (1989) Abrasive wear resistance of materials: [Ref. manual] – Kyiv: “Naukova Dumka”, P. 128
6. Dvoruk V.I. (2014) Infusion of chromium-alloyed structural steel on its abrasive wear resistance after high-temperature thermal mechanical treatment (HTMT), *Problems of Tribology*, No. 3, pp. 59-64

---

7. Shevelya V.V., Dvoruk V.I., Dovzhok V.E., Radchenko A.V. (2000) Providing tribological properties of composite materials under abrasive wear, *Problems of tribology*, No. 1, pp. 61-72

8. Shevelya V.V., Dvoruk V.I., Postash A.S., Radchenko A.V. (2000) Modeling hydroabrasive wear of materials by laboratory method, *News of Kyiv International University of Civil Aviation*, No. 3-4, pp. 39-43

9. Dvoruk V.I. (1997) Scientific bases for increasing abrasive wear resistance of machine parts, Kyiv: «KMUGA», p. 101

10. Dvoruk V.I., Voitov V.A. (2014) *Tribophysics*, Kharkiv: [b.v.], P. 374

11. Dvoruk V.I. (2018) Abrasive wear method for determining the effective surface energy of crystals, *Problems of Tribology*, No. 4, P. 22— 31

12. Dvoruk V.I. (2024) Injection of geometrically sized abrasive particles into the soil on the pattern of degradation of low-alloy steel during wear, *Problems of rubbing and wear*, No. 3 (104), pp. 65-77

13. Troshchenko V.T., Krasovsky A.Ya., Pokrovsky V.V., Sosnovsky L.A., Strizhalo V.A. (1992) Resistance of materials to deformation and destruction: [Reference manual]: Part 2 - Kyiv: "Naukova Dumka", P. 702c

**Volodymyr Dvoruk** – Doctor. Sc., Professor, Professor in General and Applied Physics Department, Kyiv Aviation Institute, Ukraine, 03058, Kyiv, Lubomir Husar ave., 1, tel.number: +3804067166, E-mail: volodymyr.dvoruk@npp.nau.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-5881-7441>