

**Писаренко В.Г.,\***

**Медведчук Н.К.,\*\***

\*КНВО "Форп" МВС України, м. Вінниця,  
Україна,

\*\*Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна

## АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ ПРИ ВИСОКИХ ШВИДКОСТЯХ КОВЗАННЯ

УДК 621.891

На основі проведеного аналізу критеріїв високошвидкісного тертя запропонований спосіб оцінки ефективності технологій підвищення зносостійкості на основі аналізу функціональних залежностей коефіцієнту тертя від швидкості ковзання. Наведені приклади експериментальної реалізації запропонованого підходу для різних способів зміцнення поверхонь сталевих зразків.

**Ключові слова:** швидкість ковзання, коефіцієнт тертя, машина тертя

### Високошвидкісне тертя, змащування та знос [1]

Результатом контактної взаємодії вузлів, що труться із великими швидкостями ковзання, є сильний нагрів зони тертя. Внаслідок неминучого при нагріві зниження твердості матеріалів зростає площа фактичного контакту, а отже, і тертя. Згідно законів хімії швидкості протікання реакцій різко зростають з нагрівом. Тобто при високошвидкісному (гарячому) терті контактують не вихідні матеріали, а зовсім нові, вторинні структури. Наприклад, при сильному нагріві в повітрі, молібден може покритися твердим оксидом, що діє подібно до наждачного паперу. При сильному нагріві у вакуумі той же молібден значно змінює структуру ґратки, внаслідок чого коефіцієнт тертя стрибком зростає у декілька разів.

Структурні переходи, пов'язані з перебудовою кристалічної ґратки металів та супроводжуються стрибкоподібною зміною коефіцієнта тертя пояснюються тонкою фізичною природою процесів тертя і змащування.

Таким переходом володіє, наприклад, метал кобальт, вживаний у вигляді тонкого змащувального покриття. При нагріві понад 400 °С новий тип кристалічної ґратки кобальту стає несприятливим для легкого прослизання мікрошарів цього металу і його змащувальна дія різко погіршується. Але таке явище зворотне: досить знову охолодити кобальт, як його структура, а разом з нею і мастильне середовище тут же відновлюються. Збільшення тертя при високій температурі зв'язане і з явищем дифузії, що полягає у взаємному проникненні атомів контактуючих тіл. Інтенсивна дифузія, викликана нагрівом і сильною деформацією, може привести до спікання, абсолютно не допустимого при роботі вузлів тертя.

У ряді поширених змащувальних матеріалів працездатність із зростанням температури лише покращується. Наприклад, тертя графіту по металу плавно знижується і при більш високому нагріві до 1000 °С, а для таких металів, як золото, срібло і мідь і при більш високій температурі. Причина цього криється в особливій шаруватій будові графіту. При сильному нагріві і без того ослаблений зв'язок між шарами стає ще менш міцним, що підсилює змащувальну дію.

Гранична дія нагріву полягає в розплавленні поверхневого шару одного з тіл, що труться. Тоді зовнішнє тертя переходить у внутрішнє, що описується гідродинамічною теорією масел.

Основний вплив на змащуючі властивості матеріалів при високих температурах є розм'якшення матеріалів, їх вимушене окислення, структурні зміни в кристалічній ґратці, а також дифузія, сприяюча у ряді випадків адгезії і схоплюванню. Але більшість цих явищ зовсім не впливають на тертя однозначно. Наприклад, окислення в одному випадку покращує змащування, а в іншому - викликає інтенсивне зношування. Деталі, складові пари тертя, при сильному нагріві розширюються неоднаково, що приводить до небезпечного збільшення зазорів або, навпаки, заклинювання деталей. Все це створює для конструкторів додаткові труднощі.

Складність і різноманіття явищ при високошвидкісному гарячому терті настільки великі, що високотемпературні мастила створюються до цих пір в основному дослідним шляхом. Основним шляхом тут є виготовлення різних сумішей, де керамічна або металокерамічна основа поєднуються більш менш вдало з термостійким змащувальним агентом: наприклад, кобальто - нікельова основа заповнюється тим же молібденітом. Цей матеріал зберігає працездатність у вакуумі при нагріві до 900 °С.

Поряд з теплостійкими матеріалами, що самозмащуються, розрахованими на тривалий ресурс, широко використовуються високотемпературні змащувальні покриття, завдання яких - забезпечити одноразове спрацювання або короткочасну дію механізму. Найбільш прості з таких покриттів – плівки з м'яких металів, що мають, відносно високу температуру плавлення. При цьому високою змащувальною

дією володіє срібло, яке широко використовується за кордоном, наприклад, для змащування опор бурових доліт. Товщина таких покриттів складає зазвичай всього декілька мікрометрів. Металеві плівки застосовуються, як правило, для порівняно невеликих навантажень.

Останніми роками все більшого поширення набуває іонне легування поверхонь ковзання, засноване на бомбардуванні їх прискореними до великих енергій іонами азоту, свинцю, олова, бору і інших елементів, що у ряді випадків приводить не лише до підвищення термостійкості поверхні контакту, але і до десятиразового зростання їх зносостійкості при роботі у відкритому космосі. Однією з причин такого явища служить "лікування" поверхневих мікротріщин, що пов'язане, у свою чергу з дією поглинутих часток.

Отже розглядаючи проблему тертя при швидкостях в сотні метрів в секунду, що майже неминуче супроводжується сильним нагрівом поверхонь, слід зазначити, що ця проблема обумовлена, в першу чергу, загальним прогресом сучасної техніки із застосуванням високих швидкостей ковзання.

### Аналіз впливу високих швидкостей тертя на процеси зношування

Тертя твердих тіл при високих швидкостях ковзання є граничним випадком зовнішнього тертя. Для оцінювання умов роботи тіл, що труться у високошвидкісних установках і вузлах тертя використовується декілька узагальнених критеріїв – число Пекле, число Фур'є та коефіцієнт взаємного перекриття [2].

Число Пекле у випадку повністю насиченого контакту дорівнює:

$$Pe = \frac{vl}{a}, \quad (1)$$

де  $v$  – швидкість ковзання;

$l$  – довжина контактної зони двох тіл в напрямку ковзання;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності.

Збільшення числа Пекле відбувається з ростом швидкості ковзання і довжини контактної площадки, або з насиченням фрикційного контакту, пов'язаним із збільшенням питомого навантаження або розігрівом поверхонь, які труться.

Число Фур'є представляє безрозмірний час:

$$Fo = \frac{at}{b^2}, \quad (2)$$

де  $t$  – час;

$b$  – товщина елемента пари тертя.

Числа Фур'є для окремих елементів пар тертя однієї установки в даний момент високошвидкісного тертя – різні.

Автори [3] стверджують, що у зв'язку з тим, що механічні властивості і температура плавлення матеріалу елемента, що ковзає суттєво менші механічних властивостей і температури плавлення контртіла, то процес зношування відбувається шляхом перенесення (намащування) тонких поверхневих шарів елемента, що ковзає на контртіло.

В умовах високих швидкостей ковзання температура поверхні тертя може бути близькою до температури плавлення тіл тертя або досягати її. В результаті цього в шарах, які прилягають до меж контакту відбуваються інтенсивні пластичні деформації, а в окремих точках фактичної площі контакту виникають локальні осередки оплавлення елементів, що ковзають [4, 5].

Таким чином, знос поверхні тертя зумовлено втратою механічних властивостей, великою адгезією і переносом сильно нагрітих і оплавлених тонких поверхневих шарів.

Суттєву роль в процесах виникнення та накопичення трибопошкоджень відіграють динамічні процеси, які виникають в області контакту тіл тертя при високих швидкостях ковзання. На межах фрикційного контакту виникають динамічні ефекти, обумовлені технологічними особливостями виготовлення, характером прикладення навантажень, температурними коливаннями навколишнього середовища, деформуванням та зносом поверхонь. Наслідком динамічних ефектів є суттєва зміна величини питомих навантажень в зоні контактування.

Однією з характеристик, що безпосередньо впливає на протікання процесів зношування є коефіцієнт тертя.

Особливістю процесів зношування, що відбуваються в умовах високошвидкісного тертя є ефект

значного зменшення коефіцієнта тертя з ростом швидкості взаємного переміщення тіл тертя.

В зв'язку з цим, вивчення явищ пов'язаних з визначенням залежності коефіцієнта тертя від швидкості ковзання для стрілецького та артилерійського озброєння приділялось достатньо уваги [3].

В роботах Г Грече та Е. Плаке пропонувалась емпірична залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання в каналі ствола:

$$f = f_0 \frac{1 + \alpha_1 v}{1 + \beta_1 v}, \quad (3)$$

де  $f_0$  – значення коефіцієнта тертя при  $v = 0$ ;

$\alpha_1 = 0,0217$  – емпіричний коефіцієнт;

$\beta_1 = 0,132$  – емпіричний коефіцієнт.

Слід зазначити, що дана залежність не може бути використана для всіх видів стрілецької зброї, так як коефіцієнти будуть залежати від великої кількості факторів, які треба враховувати в кожному конкретному випадку.

Зменшення коефіцієнта тертя при високих швидкостях пояснюється розмягшенням і розплавленням матеріалу в зоні фрикційного контакту. Навіть у зразків такого крихкого матеріалу, як скло, поверхня тертя має сліди термічного розмягшення і течії. Чим нижча температура плавлення матеріалу в поєднанні з низькою теплопровідністю, тим швидше проходить оплавлення і тим нижче коефіцієнт тертя. Досліди Ф. Боудена, Е. Фрейтага, П. Персона показали, що у зразків з таких матеріалів, як вісмут, сурма, свинець і олово, оплавлення починалось на протязі дуже короткого проміжку часу з моменту початку тертя. Слід відмітити, що для даних матеріалів при швидкості ковзання більше 450 м/с, спостерігали ріст коефіцієнта тертя. Збільшення коефіцієнта тертя з ростом швидкості пояснюється швидким збільшенням площадки фактичного контакту при оплавленні відносно великих об'ємів матеріалу на поверхневих шарах.

Результати дослідження високошвидкісного тертя полімерних матеріалів свідчать, що як і для металічних матеріалів, відбувається зменшення коефіцієнту тертя з ростом швидкості ковзання, однак абсолютні значення коефіцієнтів тертя у них вищі.

Для металічних матеріалів в поверхневих шарах спостерігалися структурні зміни і фазові перетворення. Зменшення коефіцієнта тертя з ростом швидкості пов'язується з інтенсивним нагрівом і знеміцненням поверхневих шарів. При цьому відбувається руйнування адсорбованих плавок, зближення поверхонь, виникнення та розвиток пластичної деформації.

У легкоплавких матеріалів, таких як вісмут, олово, свинець при швидкостях до 100 м/с зношена поверхня мала гладкий блискучий вигляд, що вказує на пружнопластичний характер деформацій в зоні тертя. При швидкостях до 200 м/с спостерігається поява частинок зносу менше 1 мкм. При швидкостях більше 200 м/с спостерігається поява пластичних деформацій в повернених шарах.

Металографічні дослідження [1] поверхневих шарів частин, що труться показали значні зміни структури в поверхневих шарах. Поверхні тертя мають сліди великих пластичних деформацій. Метал поверхневих шарів веде себе як матеріал з високою пластичністю та в'язкістю.

Аналіз впливу навантаженого стану фрикційного контакту на зміну коефіцієнта тертя при високих швидкостях ковзання показує, що з ростом питомих навантажень [61] коефіцієнт тертя падає.

Із збільшенням абсолютної величини зближення контактуючих поверхонь збільшується степінь передеформування поверхневих шарів ковзаючого елемента, а відповідно, і інтенсивність теплоутворення.

Якщо максимум температури спостерігається в шарі, розміщеному на деякій глибині від поверхні тертя ковзаючого елемента, то сили адгезії на границі контакту можуть перевищити міцність основного матеріалу в цьому шарі і нагріті частинки будуть переноситися на контртіло. Таке явище спостерігається в експериментах по дослідженню тертя та зношування твердих тіл при високих швидкостях ковзання. Процес масопереносу нагрітих частинок, на жаль, не враховується існуючими теоретичними залежностями.

На основі аналізу теплофізичних процесів в області контакту при високошвидкісному терті авторами [1] запропоновано комплекс безрозмірних параметрів, які дозволяють оцінити відносну зносостійкість матеріалів і пояснити ряд експериментальних даних отриманих в умовах високих швидкостей ковзання.

Автори [1] пов'язують зносостійкість з опором матеріалів до оплавлення в конкретному вузлі тертя з заданим режимом роботи: питомим навантаженням, швидкістю ковзання та питомим тепловиділенням. Прийнято, що контртіло є абсолютно жорстке, а поверхневі шари ковзаючого елемента деформуєми і оплавляєми.

В результаті аналізу факторів, які впливають на пружно - деформований стан трибосистем, процесів накопичення пошкоджень та їх впливу на процеси зношування встановлено, що в якості критерію оцінки ефективності використання матеріалів, технологічних процесів нанесення покриттів, термообробки та інших способів підвищення зносостійкості можна використати швидкість зміни коефіцієнта тертя.

### Методика та результати випробувань при високошвидкісному терті

Випробування проводились за схемою "диск - палець" (рис. 4.3) на машині тертя УМТ-1.

Диск діаметром 400 мм виготовлявся зі сталі 40Х і шліфувався до параметру шорсткості  $R_a = 0,63 \mu\text{м}$ . Диск використовувався як контрзразок. До диска із заданим зусиллям 10 Н притискалися циліндричні зразки розмірами  $12 \times 6 \text{ мм}$ . Диск разово змащувався тонким шаром гліцеринового масла. Диск встановлювався на шпинделі установки, центрувався і приводився у обертання з максимальною частотою 3000 об/хв.

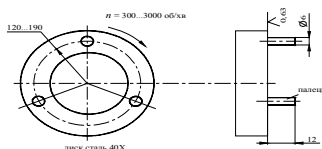


Рис. 1 – Схема випробувань "диск - палець"

Максимальна лінійна швидкість ковзання при випробуваннях визначалась за залежністю:

$$V = \pi nR/30 = \pi \cdot 3000 \cdot 0,19/30 \approx 60 \text{ м/с}.$$

Нижчі значення швидкості ковзання встановлювались зменшенням радіусу встановлення зразків або зменшенням частоти обертання диску. Коефіцієнт тертя визначався для швидкостей ковзання відповідно 5; 10; 20; 40; 60 м/с.

Коефіцієнт тертя вимірювався за моментом тертя, який фіксувався потенціометром на пульті керування від датчика моменту. Коефіцієнт тертя визначався за формулою:

$$f = MR/N,$$

де  $M$  – момент тертя, Нм;

$R$  – радіус встановлення зразків, м;

$N$  – сила притискання зразків до диску.

Результати випробувань фрикційних властивостей досліджуваних зразків, модифікованих різними методами хіміко - термічної обробки, наведені нижче.

Таблиця 1

### Результати трибологічних випробувань

Швидкість ковзання, м/с	5	10	20	40	60
Сталь Ст 3 (азотування)	0,2	0,1	0,065	0,04	0,03
Сталь 40Х (азотування)	0,2	0,088	0,058	0,035	0,026
Сталь Ст 3 (комбінована хіміко - термічна обробка)	0,22	0,083	0,053	0,03	0,022
Матеріал Сталь 20 Х (нітроцементация)	0,22	0,07	0,04	0,028	0,024
Матеріал Сталь 40Х (комбінована хіміко - термічна)	0,2	0,1	0,065	0,04	0,03

обробка)

Графічна інтерпретація результатів випробувань наведена на рис. 2.

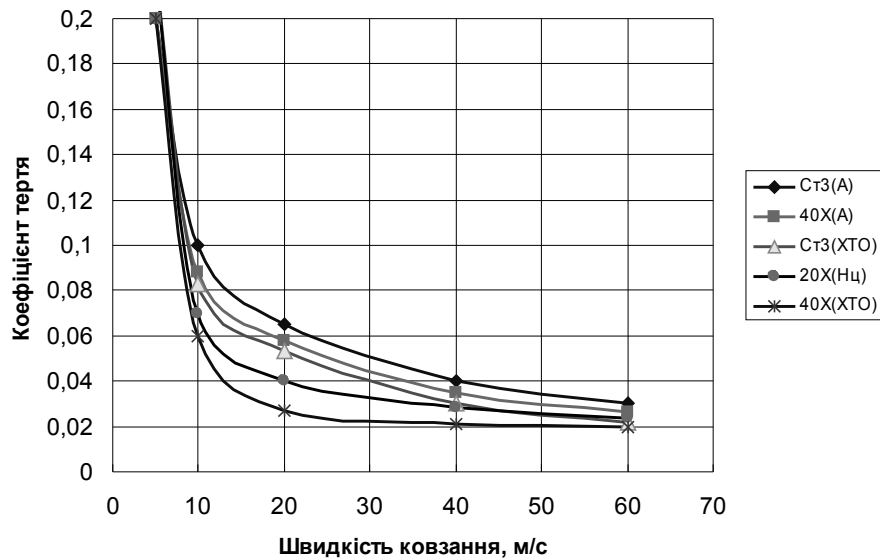


Рис. 2 – Результати випробувань зразків матеріалів при високошвидкісному терті

Аналіз отриманих результатів показав наступне.

У всьому діапазоні досліджуваних швидкостей ковзання спостерігалось стійке зменшення коефіцієнту тертя від швидкості від значень 0,2 (граничне, напівсухе тертя) до 0,02 (тертя через рідинну плівку), тобто майже на порядок.

Для деяких матеріалів (40X(ХТО); 20X(Нц)) мала місце стабілізація низьких значень коефіцієнту тертя, починаючи з 40 ... 50 м/с.

### Висновок

Експериментальні дослідження залежності коефіцієнту тертя від швидкості ковзання, підтвердили факт зменшення значень коефіцієнту тертя від швидкості ковзання та можливість оцінювання ефективності різних технологій поверхневої обробки шляхом оцінювання функціональних залежностей коефіцієнту тертя.

### Література

1. <http://treniye.ru/goryachee-trenie>
2. Балакин, В. А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения [Текст] / В. А. Балакин. – М. : Машиностроение, 1980. – 136 с.
3. Montgomery, R. S. Muzzle wear of cannon [Text] / R. S. Montgomery // Wear. – 1975. – V. 33. – N 2. – P. 359-368.
4. Боуден, Ф. П. Трение и смазка твердых тел [Текст] / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – М. : Машиностроение, 1968. – 543 с.
5. Сидоренко, Г. С. Исследование микроструктуры поверхностных слоев образцов, испытанных при кратковременном трении на скоростях скольжения 200-350 м/с. [Текст] / Г. С. Сидоренко, З. В. Игнатьева, В. А. Балакин // Тепловая динамика трения. – М. : Наука, 1970. – С. 146-150.

Надійшла в редакцію 01.12.2014

Pisarenko V.G., Medvedchuk N. K. **Analysis of processes of friction at high-rate of sliding.**

On the basis of the conducted analysis of criteria of high-speed friction the offered method of estimation of efficiency of technologies of increase of wearproofness is on the basis of analysis of functional dependences the coefficient of friction from speed of sliding. The examples of experimental realization offered approach are resulted for the different methods of strengthening of surfaces of steel standards.

**Key words:** sliding speed, coefficient of friction, machine of friction

### References

1. <http://treniye.ru/goryachee-trenie>
2. Balakin V. A. Trenie i iznos pri vysokih skorostyah skol'zheniya. M. Mashinostroenie, 1980. 136 p.
3. Montgomery, R. S. Muzzle wear of cannon. Wear. 1975. V. 33. No 2. pp. 359-368.
4. Bouden F. P., Tejbor D. Trenie i smazka tverdyh tel. M. Mashinostroenie, 1968. 543 p.
5. Sidorenko G. S., Ignat'eva Z. V., Balakin V. A. Issledovanie mikrostruktury poverhnostnyh sloev obrazcov, ispytannyh pri kratkovremennom trenii na skorostyah skol'zheniya 200-350 m/s. Teplovaya dinamika treniya. M. Nauka, 1970. pp. 146-150.