

НАУКОВІ ЗАДАЧІ ТРИБОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ПРИ АНАЛІЗІ ТРИБОСИСТЕМ

Дослідження присвячено розробленню інтегрованого підходу до аналізу зношування трибосистем в умовах абразивного середовища та обґрунтування напрямів підвищення зносостійкості матеріалів на основі твердих включень дибориду титану. У літературі бракує узгоджених системних підходів, які б об'єднували матеріалознавчі рішення з інженерними методами розрахунку для простого і надійного прогнозу зношування в конкретних умовах експлуатації. Проведено аналіз реальних зразків після експлуатації: досліджено морфологію поверхонь тертя та характер зношування зубців деталі за допомогою оптичної мікроскопії і вимірювання геометричних параметрів спрацювання. Експериментальні дослідження зносостійкості виконано в лабораторних умовах за методикою стандартизованого абразивного випробування ДСТУ 23.208-79. В роботі проаналізовано особливості механізму зношування сталевोї пари тертя при дії абразивних часток та виявлено основні чинники та характер їхнього впливу - основний внесок може давати втомне спрацювання металу. Визначено залежність інтенсивності зношування матеріалу від відносної твердості абразиву і показана можливість прогнозування спрацювання за допомогою спрощених інженерних розрахунків; підтверджено вирішальну роль параметра відносної твердості абразиву в інтенсивності зношування. Обґрунтовано наукові підходи до підвищення зносостійкості трибосполучень – матеріал повинен бути достатньо твердим, щоб протистояти різанню, але водночас достатньо в'язким і міцним, щоб чинити опір втомним тріщинам, зокрема через модифікацію матеріалу робочої поверхні включеннями TiB_2 . Окреслено перспективні напрями подальших досліджень у галузі трибоматеріалознавства - застосування нейронних мереж для прогнозу зносу деталей машин при заданих режимах навантаження і властивостях матеріалів спільно з удосконаленими матеріалами.

Ключові слова: Зношування, абразив, надійність, надтверде включення, співвідношення твердостей.

Постановка проблеми. Проблема зношування деталей у трибосистемах залишається одним з найважливіших викликів машинобудування. Відсутність чіткого алгоритму для аналізу контактної взаємодії та прогнозування ресурсу роботи пари тертя в умовах абразивного середовища ускладнює проєктування вузлів і планування їх обслуговування. Зокрема, робота механізмів у запиленому або ґрунтовому середовищі призводить до потрапляння твердих абразивних частинок у зону контакту деталей, що викликає інтенсивне спрацювання. Наслідком надмірного зношування є погіршення кінематичних характеристик вузла, зниження ККД і ризик передчасного виходу з ладу, що загрожує простим обладнанням та економічними втратами.

Для забезпечення надійності трибосистем, які працюють в абразивних середовищах, необхідний інтегрований підхід. Він має включати врахування механічних чинників (навантаження, швидкість, режим тертя), властивостей матеріалів пари тертя, впливу абразиву та потенційних корозійних ефектів. Сучасні дослідники наголошують, що комплексний аналіз, який поєднує експериментальні дані та моделювання, здатен підвищити точність прогнозування зношування і надійності трибосистем [1]. Важливим напрямом трибоматеріалознавства є також пошук нових зносостійких матеріалів. Зокрема, перспективним є використання надтвердих керамічних включень, таких як диборид титану

Машинобудування і зварювальне виробництво

(TiB₂), у складі матеріалів пар тертя для підвищення їхньої зносостійкості [2]. TiB₂ вирізняється виключно високою твердістю (близько 25...35 ГПа) при відносно низькій густині (~4,5 г/см³) та хімічній стабільності, що робить його привабливим трибоматеріалом для роботи у важких умовах. Диборид титану вже знаходить застосування у різноманітних високонавантажених вузлах (різальний інструмент, броня, електроди для металургії, елементи підшипників тощо) і може слугувати зміцнювальною фазою у композиційних матеріалах.

Таким чином, актуальними науковими задачами трибоматеріалознавства є:

- 1) всебічне дослідження механізмів зношування трибосистем в абразивних середовищах;
- 2) розробка інтегрованих методик прогнозування ресурсу вузлів тертя з урахуванням комплексу чинників;
- 3) створення нових матеріалів та технологій зміцнення поверхонь, зокрема шляхом введення надтвердих включень (TiB₂ тощо) у структуру матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню абразивного зношування матеріалів присвячено багато наукових праць. Класичні результати трибології встановили критичну роль відносної твердості абразиву і матеріалу, що зношується. Зокрема, якщо твердість абразивних частинок перевищує твердість матеріалу деталі ($H_a/H_m > 1$), відбувається інтенсивне мікрорізання поверхні та абразивне спрацювання; у протилежному випадку ($H_a/H_m < 1$) домінує втомне та пластичне спрацювання без вираженого різання [3]. Дослідження також показують наявність порогових значень цього співвідношення: при низьких значеннях H_a/H_m зношування слабке, при збільшенні до певного критичного рівня різко зростає. Наприклад, для металокерамічних покриттів встановлено, що якщо $H_a/H_m > \sim 1,2$, то спостерігається перехід до інтенсивного зношування, тоді як при $H_a/H_m < \sim 0,8$ знос мінімальний [4]. Таким чином, співвідношення твердостей є визначальним фактором механізму руйнування поверхні тертя в абразивному середовищі.

Іншим важливим напрямом досліджень є розробка зносостійких матеріалів. Відомо, що композиційні матеріали із твердими включеннями у в'язкій матриці демонструють підвищену опірність абразивному зносу [3]. Такі матеріали поєднують надтверді фази (карбіди, бориди, нітриди тощо) з металевою основою, завдяки чому дрібні тверді частинки приймають на себе основний вплив абразиву, запобігаючи глибокому врізанню його в матрицю. Для ерозійно-абразивних умов рекомендується структура типу «тверда фаза + метал», де вміст надтвердих включень перевищує 50 % [3] - це забезпечує домінування механізму мікрорізання твердою фазою і зменшує втомне руйнування матриці. З іншого боку, за ударно-абразивних впливів занадто висока частка крихких твердих фаз може погіршити міцність, тому оптимальний склад залежить від умов експлуатації.

Особливу увагу привертає диборид титану (TiB₂) як перспективний компонент зносостійких композицій. TiB₂ належить до ультрависокотемпературних керамік і має унікальний набір властивостей: надвисоку твердість (25...35 ГПа, близьку до алмазу та B₄C) і міцність, хімічну інертність (стійкий у контакті зі сплавами Fe та Al), термічну стабільність та порівняно невелику густину [2]. Завдяки цьому TiB₂ розглядають як перспективний матеріал для захисних покриттів і армувальних фаз у композитах, здатних працювати в умовах інтенсивного тертя та зношування. Показово, що введення навіть ~14...22 % TiB₂ в металеві наплавлені шари суттєво підвищує їх твердість та знижує коефіцієнт тертя і інтенсивність зносу порівняно з вихідним матеріалом [5]. Таким чином, сучасні публікації підтверджують, що зміцнення поверхонь за допомогою боридів титану є дієвим шляхом підвищення зносостійкості трибоспрямижень.

Попри значний прогрес у вивченні окремих аспектів, комплексне вирішення проблеми зношування трибосистем досі залишається актуальним. Більшість робіт фокусуються або на матеріалознавчих аспектах (розробка нових сплавів, покриттів), або на моделюванні трибопроцесів, або на впливі окремих чинників (мастило, корозія, температура). Однак

реальні умови експлуатації включають супутній вплив кількох факторів одразу, тому поєднання підходів є необхідним. Окремі сучасні дослідження пропонують методики прогнозування зношування, що враховують структуру поверхні, шорсткість, зміну контактної площі тощо, і навіть використовують штучний інтелект для прогнозу ресурсу трибосистем [6]. Вони показують, що залучення даних про стан поверхонь та багатофакторний аналіз підвищує точність передбачення зносу і надійності роботи вузлів. Проте у відкритій літературі бракує узгоджених системних підходів, які б об'єднували матеріалознавчі рішення (наприклад, зміцнення TiB_2) з інженерними методами розрахунку для простого і надійного прогнозу зношування в конкретних умовах експлуатації. Це визначає напрямок даного дослідження.

Мета досліджень. Метою даної роботи є розроблення інтегрованого підходу до аналізу зношування трибосистем в умовах абразивного середовища та обґрунтування напрямів підвищення зносостійкості матеріалів на основі твердих включень дибориду титану. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати особливості механізму зношування сталеві пари тертя при дії абразивних часток, виявити основні чинники та характер їхнього впливу.
- експериментально визначити залежність інтенсивності зношування матеріалу від відносної твердості абразиву (коефіцієнт Ha/Hm) і оцінити можливість прогнозування спрацювання за допомогою спрощених інженерних розрахунків (з допустимою похибкою $\sim 5\%$).
- на основі результатів дослідження та аналізу публікацій обґрунтувати наукові підходи до підвищення зносостійкості трибосполучень, зокрема через модифікацію матеріалу робочої поверхні включеннями TiB_2 , та окреслити перспективні напрями подальших досліджень у галузі трибоматеріалознавства.

Основний матеріал дослідження. Об'єкт дослідження - сталева фрикційна пара, що працює в умовах абразивного зношування (типовий приклад - зубчастий елемент механізму, контактуючий з іншим металевим елементом у середовищі, забрудненому піском чи ґрунтом). Матеріал деталей - конструкційна вуглецева сталь 45 (аналог сталі С45 або 1045, твердість $\sim HV\ 220-250$). Попередньо проведено аналіз реальних зразків після експлуатації: досліджено морфологію поверхонь тертя та характер зношування зубців деталі за допомогою оптичної мікроскопії (збільшення до $\times 50$) і вимірювання геометричних параметрів спрацювання. Лінійний знос зубців оцінювали після певних умовних періодів роботи механізму, що дозволило встановити динаміку змін профілю та нерівномірність зношування вздовж поверхні контакту.

Експериментальні дослідження зносостійкості виконано в лабораторних умовах за методикою стандартизованого абразивного випробування (аналог ДСТУ 23.208-79) (рис. 1).

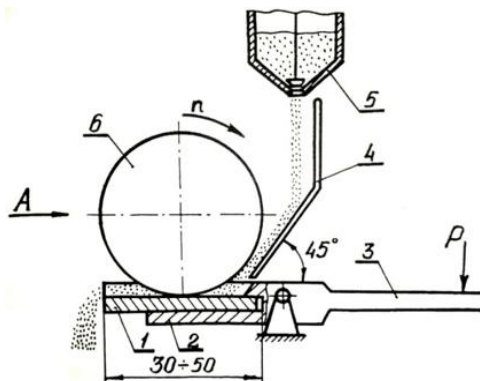


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки для визначення відносної зносостійкості

Випробування за схемою (рис. 1) проводять на випробувальній установці, яка містить привід, що забезпечує обертання навколо горизонтальної осі гумового ролика 6, тримач зразків 2, важіль 3, що притискає зразок 1 до ролика, пристрій 5, який дозує подачу абразивних частинок в зону тертя по направляючому лотку 4, пристрій 8 для контролю сумарної кількості обертів ролика в процесі випробувань. Суть методу полягає у тому, що зразок зі сталі 45 притискається до обертового гумового диска, в зону тертя подаються абразивні частки визначеного розміру, які спричиняють зношування зразка. Розмір часток абразиву становив не більше 2,0 мм (переважно 0,3...1,5 мм). Для оцінки впливу властивостей абразиву було обрано чотири типи абразивного матеріалу [7] з різною твердістю та природою: доломіт, кварцовий пісок, граніт і корунд. Мікротвердість цих абразивів (за Вікерсом) становила приблизно: 4,1 ГПа (доломіт), 13,5 ГПа (пісок кварцовий), 14,5 ГПа (граніт) та 18 ГПа (корунд). Таким чином, коефіцієнт співвідношення твердості абразиву до матеріалу (H_a/H_m) змінювався від $\sim 1,1$ (дуже м'який абразив щодо сталі) до $\sim 4,5$ (абразив значно твердіший за матеріал зразка).

Випробування зразків проводили шляхом порівняння з еталонним матеріалом (сталь 45 без обробки) для розрахунку відносної зносостійкості. Після певного часу тертя при подачі заданого абразиву фіксували втрату маси зразка. Інтенсивність зношування (E) визначалася як втрата маси зразка за одиницю часу (г/хв) при сталій нарузці та швидкості ковзання. Для підвищення достовірності результатів кожне випробування повторювали декілька разів, після чого обчислювали середнє значення E . Отримані дані зведено у таблицю, що дозволяє проаналізувати залежність зношування від твердості абразиву.

Крім того, на основі морфологічного аналізу поверхонь тертя та експериментальних результатів, було проведено багатокритеріальний аналіз трибосистеми. Зокрема, оцінювали внесок різних механізмів руйнування (втомного, абразивного, корозійного тощо) у загальне спрацювання деталі. Такий підхід дозволив кількісно визначити, який з механізмів є домінуючим за заданих умов, і зіставити ці висновки з літературними даними.

В результаті огляду деталей після експлуатації встановлено, що зношування робочих поверхонь має комплексний характер. Зубці сталеві шестірні (ведучого колеса) стираються нерівномірно: максимальний знос спостерігається на бічних поверхнях, що входять у зачеплення під навантаженням, тоді як інші ділянки стираються менше. Вже після відносно нетривалого періоду інтенсивної роботи (еквівалентного кільком місяцям безперервної експлуатації) профіль зубців суттєво змінився. Вимірювання показали, що за 7 місяців роботи величина зносу більшості зубів досягла ~ 6 мм по висоті, що відповідає гранично допустимому значенню для даного вузла. Після досягнення цієї межі деталь потребує негайної заміни чи ремонту, оскільки подальша експлуатація стає небезпечною. Для порівняння, нормативний ресурс роботи таких деталей (за стандартних умов) оцінювався приблизно у 9 місяців. Отже, у реальних забруднених умовах відбувся передчасний вихід із ладу - фактичний ресурс виявився на ~ 22 % меншим за очікуваний. Це підтверджує, що абразивне середовище суттєво прискорює спрацювання навіть міцних сталевих деталей.

Виявлено також специфічні особливості поверхневого руйнування. На зношених поверхнях зубців спостерігаються сліди мікрорізання (борозни, подряпини від твердих часток) впереміш зі згладженими площадками пластичного вирівнювання металу. Місцями фіксуються дрібні втомні тріщини та лускоподібне відшарування матеріалу. Це свідчить про одночасну дію двох основних механізмів зношування: абразивного різання і втомного спрацювання металу. Абразивні частки, потрапляючи у контакт, можуть закріплюватися між поверхнями або врзатися в метал і здійснювати різання (мультиконтактне тривале деформування), тоді як періодичне навантаження зубців призводить до накопичення втомних пошкоджень у приповерхневому шарі. Отже, реальна картина зношування має комплексний, багатоцикловий характер.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Лабораторні тести з різними абразивами кількісно підтвердили критичний вплив твердості сторонніх часток на інтенсивність зносу сталі 45 (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність інтенсивності абразивного зношування

Абразивний матеріал	Твердість H_a , ГПа	Відношення H_a/H_m	Інтенсивність зношування E , г/хв
Доломіт	$\approx 4,1$	$\approx 1,1$	7,414
Кварцовий пісок	$\approx 13,5$	$\approx 3,3$	18,231
Гранітний відсів	$\approx 14,5$	$\approx 3,9$	22,324
Корунд	≈ 18	$\approx 4,5$	24,113

Як видно, перехід від м'якого абразиву (доломіту) до середньо-твердого (кварцового піску) спричинив різке збільшення швидкості зносу сталі приблизно в 2,5 рази. Подальше підвищення твердості абразиву (граніт, корунд) вже не давало такого драматичного ефекту: при збільшенні H_a з ~ 13 до ~ 18 ГПа інтенсивність зношування зростає відносно помірно (на ~ 32 %). Графічно залежність $E = f(H_a/H_m)$ має вигляд кривої (рис. 2).

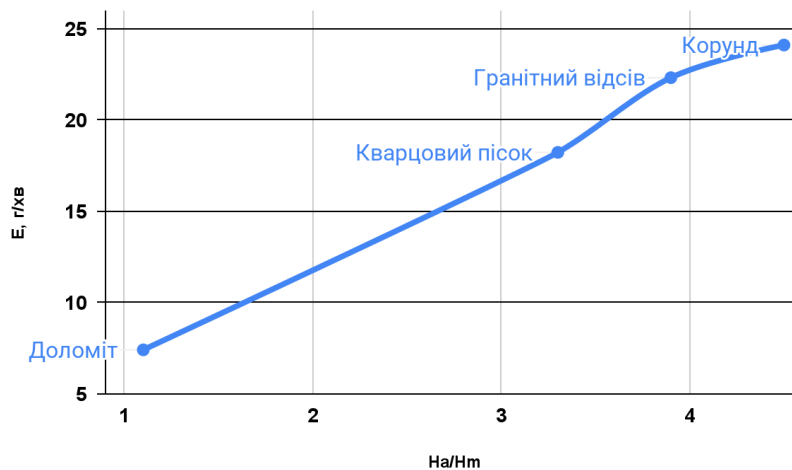


Рисунок 2 – Залежність інтенсивності зношування E від відношення твердості H_a/H_m

Таким чином, експериментально підтверджено існування певного критичного діапазону співвідношення твердостей. У нашому випадку максимальний стрибок зносу відбувається десь між $\lambda = 1 \dots 3$ (від доломіту до піску); за $\lambda > 3$ подальше зростання зносу уповільнюється. Ці результати узгоджуються з літературними даними [8] щодо ефекту насичення: коли твердість абразиву значно перевищує твердість матеріалу деталі, величина зносу досягає гранично високих рівнів і надалі змінюється незначно [9]. З практичного погляду це означає, що кварцовий пісок ($H_a \approx 13$ ГПа) можна вважати тим «агресивним» абразивом, орієнтуючись на який слід проектувати зносостійкість трибосистем, адже ще твердіші частки (корунд) збільшують знос лише незначно.

На основі експериментальних даних та морфологічних спостережень здійснено оцінку внеску різних механізмів у загальне зношування. Було встановлено, що в умовах випробуваної сталеві трибопари основну частку руйнування поверхні (~ 75 %) забезпечує багатоциклове втомне зношування металу. Це зумовлено безпосереднім контактом метал-метал (зубець пари тертя під навантаженням), який призводить до накопичення пошкоджень у матеріалі навіть без абразиву. Другий за значущістю механізм - одноциклове абразивне зношування (близько 20 % внеску). Він відповідає ситуаціям, коли поодинокі тверді частки, потрапляючи між

Машинобудування і зварювальне виробництво

поверхнями, викликають мікрорізання чи видалення фрагментів поверхневого шару за один акт контакту. В нашому випадку саме взаємодія "метал - абразив" через механізми мікрорізання і викидання частинок матеріалу дала цей внесок. Третім фактором, що виявився помітним, є корозійно-механічне зношування (оцінено $\sim 4\%$). Його появу пов'язують з впливом навколишнього середовища (волога, реактивні речовини) на поверхню тертя: мікроскопічна корозія або окиснення металу спільно з тертям прискорює утрату матеріалу. Випробування проводились у відносно сприятливих умовах (без агресивних середовищ), тому частка корозійного компонента невелика. Решту ($\sim 1\%$) складають інші незначні механізми та випадкові фактори.

Отриманий розподіл підтверджує комплексний характер зношування. Основний обсяг утрати матеріалу відбувається внаслідок повторних механічних навантажень (втома), підсилені дією абразиву, що час від часу спричиняє гострі пошкодження поверхні. Така комбінація є характерною для трибосистем, що працюють у запиленних середовищах: навіть коли абразив не постійно присутній у контакті, періодичне його потрапляння спричинює локальні дефекти, які далі розвиваються як втомні тріщини при продовженні роботи. Відтак, для ефективного підвищення довговічності вузла необхідно знизити як втомне спрацювання (через підвищення міцності і опору втомі матеріалу), так і абразивне (через унеможливлення врізання твердих часток або зменшення їх абразивної дії).

Результати дослідження дозволяють сформулювати низку важливих положень щодо аналізу та підвищення зносостійкості трибосистем. По-перше, підтверджено вирішальну роль параметра Ha/Hm (відносної твердості абразиву) у інтенсивності зношування. Виявлений нелінійний характер залежності (із зоною різкого росту зносу при $Ha/Hm > \sim 1 \dots 2$ і подальшим насиченням) узгоджується з відомими моделями абразивного зношування. Це означає, що при проектуванні та аналізі трибосистем слід особливу увагу приділяти саме цьому співвідношенню. Практичний висновок полягає в тому, що матеріал деталей пари тертя бажано робити якомога твердішим відносно тих абразивів, з якими він ймовірно контактуватиме. Якщо забезпечити $Hm \gg Ha$ (наприклад, шляхом зміцнення поверхні), то механізм мікрорізання майже припиняється і зношування перейде в м'який режим, визначений втомними чи легкими абразивними процесами. В ідеалі, твердість поверхневого шару деталі повинна перевищувати твердість типових абразивів середовища. Звичайно, повністю виключити знос це не зможе (бо залишиться тертя і потенційно втома), але інтенсивність спрацювання буде на порядок нижчою.

По-друге, результати підтвердили, що кварцовий пісок є одним з найнебезпечніших природних абразивів для сталевих вузлів. Це зумовлено поєднанням високої твердості кварцу ($\sim 1100 \dots 1200$ HV, або ~ 13 ГПа) та його широкою розповсюдженістю (грунт, будівельний пил тощо). Саме піщані частки найчастіше спричиняють абразивний знос у підшипниках, зубчастих передачах, гусеничних та інших вузлах машин, що працюють у відкритому середовищі. В наших випробуваннях кварцовий абразив продемонстрував різке підвищення зносу порівняно з доломітовим, тому при розробці захисних заходів варто орієнтуватися на нейтралізацію впливу саме кварцу як репрезентативного абразиву. Менш тверді частки (типу вапняку, гіпсу тощо) є менш небезпечними, а твердіші (корунд) трапляються рідше. Отже, технології захисту повинні бути ефективними в першу чергу проти піску/грунту.

По-третє, аналіз механізмів зношування показав, що навіть за наявності абразиву основний внесок може давати втомне спрацювання металу. Це означає, що конструктивні та технологічні заходи підвищення довговічності мають націлюватися не лише на абразивостійкість, але і на втомну міцність поверхневого шару. Традиційні методи зміцнення (термічна обробка, наклеп, поверхневе легування) спрямовані на підвищення твердості та зниження пластичності, що справді зменшує врізання абразиву. Однак надмірно крихкий поверхневий шар може швидше руйнуватися від багатоциклових навантажень. Тому потрібен

Машинобудування і зварювальне виробництво

збалансований підхід: матеріал повинен бути достатньо твердим, щоб протистояти різанню, але водночас достатньо в'язким і міцним, щоб чинити опір втомним тріщинам. Композиційні покриття або матеріали з градієнтною структурою можуть дати таку комбінацію властивостей. Наприклад, металокерамічний шар з твердими включеннями у відносно в'язкій матриці здатен одночасно протидіяти і абразиву, і гасити втомні напруження.

Одним з найбільш перспективних рішень, що обговорюється в контексті нашої роботи, є використання дибориду титану (TiB_2) як зміцнювальної фази в поверхневих шарах. За рахунок своєї виняткової твердості TiB_2 може ефективно протидіяти врізанню кварцових та інших абразивних часток - практично, абразив буде швидше спрацьовуватися сам або дробитися, ніж руйнувати метал навколо частинок TiB_2 . До того ж, TiB_2 хімічно стабільний і зберігає твердість при високих температурах, що важливо при інтенсивному терті. Є декілька можливих шляхів реалізації цієї ідеї: дифузійне насичення бором і титаном (отримання боридних шарів), наплавлення композиційних стрічкових електродів з порошком TiB_2 , лазерне легування сумішшю $\text{Ti} + \text{B}$ для утворення дрібнодисперсних включень TiB_2 в матриці тощо. Вже проведені дослідження боридування титанових сплавів та сталей свідчать про формування подвійних шарів $\text{TiB}_2 + \text{TiB}$ з надвисокою мікротвердістю ($\sim 1800 \text{ HV}$ і більше) та суттєвим підвищенням зносостійкості порівняно з незміцненим матеріалом (зниження коефіцієнта тертя, уповільнення зносу). Таким чином, впровадження TiB_2 як елемента трибосистеми є реальним шляхом продовження їх ресурсу.

З точки зору трибоматеріалознавства, важливо продовжити дослідження оптимального вмісту та форми твердих фаз у зміцнених шарах. Надмірна концентрація керамічних включень може призвести до крихкості, тому слід шукати компромісний склад. Дослідження композиційних матеріалів показують, що структура і мікророзмір мають велике значення: дрібні рівномірно розподілені частки (розміром порядку кількох мікрон) ефективніші в гасінні тріщин і зупинці зносу, ніж великі включення. Також перспективним є поєднання твердих фаз з само-змащувальними компонентами (наприклад, графіт + TiB_2), що одночасно зменшить тертя. Комплексний підхід до матеріалознавчого вдосконалення трибосистем одне з ключових завдань подальших робіт.

Нарешті, варто зазначити, що інтегрований підхід у трибології означає не лише матеріалознавче вирішення, але й розвиток методів моделювання та прогнозування. Отримані нами кількісні залежності (наприклад, між Ha/Hm і зносом) можуть бути використані для побудови емпіричних і напіваналітичних моделей зношування. Сучасні інструменти комп'ютерного інжинірингу та штучного інтелекту відкривають можливості для створення моделей, які, навчаючись на експериментальних даних, зможуть досить точно передбачати ресурс трибоспрямижень. Вже є успішні приклади застосування нейронних мереж для прогнозу зносу підшипників, зубчастих передач тощо при заданих режимах навантаження і властивостях матеріалів. Розвиток таких моделей спільно з удосконаленими матеріалами (наприклад, сталями, зміцненими TiB_2) дає синергійний ефект - більш надійні та довговічні трибосистеми, що піддаються інженерному розрахунку і оптимізації на етапі проєктування.

ВИСНОВКИ

Розглянуто наукові задачі трибоматеріалознавства при аналізі трибосистем. Розроблено комплексний підхід до оцінювання зносостійкості, який враховує одночасно механічні, абразивні та середовищні чинники. Показано, що застосування багатофакторного аналізу дозволяє кількісно прогнозувати ресурс вузлів тертя з похибкою, прийнятною для інженерної практики (близько 5 %). Це створює основу для побудови спрощених методик розрахунку довговічності деталей, що працюють в абразивних умовах.

Експериментально підтверджено ключову роль відносної твердості абразиву. При $Ha/Hm > 1$ спостерігається різке зростання інтенсивності зношування сталі за рахунок переходу до режиму мікрорізання абразивом. Встановлено нелінійну залежність: у діапазоні $Ha/Hm \approx 1...3$ знос зростає стрімко, тоді як при перевищенні певного порогу ($\approx 3...4$) досягається насичення подальше підвищення твердості абразиву дає лише незначне збільшення зносу. Таким чином, для оцінки трибосистеми критично враховувати значення Ha/Hm і прагнути знизити його (через збільшення твердості матеріалу деталей або зменшення твердості/кількості абразиву в контакті).

В умовах сталеві трибопари зі стороннім абразивом основними механізмами руйнування поверхні є втомне ($\approx 75\%$ внеску) та абразивне одноциклове ($\approx 20\%$). Корозійний компонент вносять близько 4% зносу у випробуваних умовах. Це означає, що навіть за наявності твердих часток більша частина матеріалу втрачається через накопичення втомних пошкоджень від повторних навантажень. Абразив прискорює руйнування, створюючи локальні дефекти, які далі ростуть під дією циклічних навантажень. Для підвищення ресурсу вузла треба одночасно зменшувати вплив обох цих механізмів - і абразивного різання, і втомного спрацювання.

Виявлено, що кварцовий пісок спричиняє найбільше прискорення зносу серед поширених абразивів, будучи своєрідним «гіршим випадком» для сталевих деталей. Це пов'язано з його високою твердістю та розповсюдженістю. Подальше збільшення твердості абразиву (до рівня корунду) не приводить до пропорційного росту зносу. Тому при проєктуванні трибосистем для роботи в запиленому середовищі доцільно приймати кварцовий абразив за еталон при виборі захисних матеріалів і технологій - матеріал, що витримує дію кварцу, забезпечить і захист від м'якших або трохи твердіших часток.

Обґрунтовано перспективність застосування TiB_2 як ефективного трибоматеріалу для підвищення зносостійкості. Висока твердість TiB_2 ($25...35$ ГПа) дозволяє суттєво зменшити інтенсивність абразивного різання - для включень TiB_2 відношення Ha/Hm для кварцу та корунду становить менше одиниці, що суттєво знижує абразивну дію. Додавання навіть $10...20\%$ TiB_2 у склад металокерамічних покриттів збільшує їх твердість та суттєво знижує знос і тертя. Рекомендується розробка композиційних зміцнювальних шарів (наприклад, боридних), де дрібні частки TiB_2 рівномірно розподілені у матриці сталі або сплаву. Такий підхід дозволить одночасно протидіяти абразиву і підвищити витривалість поверхневого шару до втомних навантажень.

Список використаних джерел

1. Al-Quraan, T. M. A., Alfaqs, F., Alrefo, I. F. S., Vojtov, V., Voitov, A., Kravtsov, A., Miroshnyk, O., Kondratiev, A., Kučera, P., & Pištěk, V. (2023). Methodological approach in the simulation of the robustness boundaries of tribosystems under the conditions of boundary lubrication. *Lubricants*, 11(1), 17. <https://doi.org/10.3390/lubricants11010017>
2. Lv, X., Yin, Z., Yang, Z., Chen, J., Zhang, S., Song, S., & Yu, G. (2024). Review on the development of titanium diboride ceramics. *Recent Progress in Materials*, 6(2), 009. <https://doi.org/10.21926/rpm.2402009>
3. Kulu, P., Tarbe, R., & Vallikivi, A. (2005). Abrasive wear of powder materials and coatings. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 11(3), 266-271.
4. Wang, Q., Zhang, Y., Ding, X., & Seshadri, R. C. (2020). Effect of WC grain size and abrasive type on the wear performance of HVOF-sprayed WC-20Cr₃C₂-7Ni coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29(7), 1387-1400.
5. Liu, S., & Pang, M. (2021). Effect of TiB_2 content on properties of nickel-coated graphite

self-lubricating coating prepared by laser cladding. *Coatings*, 11(12), 1501. <https://doi.org/10.3390/coatings11121501>

6. *Argatov, I.* (2019). Artificial neural networks (ANNs) as a novel modeling technique in tribology. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 5, 30. <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00030>

7. *Popov S.M., Hrebieshkov M.O., Kapustian O.Ye.* Problem analysis and optimization of material parameters for the creation of wear-resistant coatings // Університетська наука - 2025 : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. (Дніпро, 15-16 травня 2025 р) : в 3 т. Т. 1: факультети: Навчально-науковий інститут сучасних технологій, машинобудування та зварювання, транспортний, інформаційних технологій / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2025. – С. 135-136

8. *Попов С. М.* Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні / *С. М. Попов, Д. А. Антонюк, В. В. Непребко* - Запоріжжя, 2010. - 280 с.

9. *Zhang, Z., Liu, Y., & Wang, L.* (2013). Effect of particle hardness on mild-severe wear transition of hard second phase materials. *Wear*, 303(1-2), 1-6.

10. *Rosenkranz, A., Marian, M., Profito, F. J., Aragon, N., & Shah, R.* (2021). The use of artificial intelligence in tribology—A perspective. *Lubricants*, 9(1), 2. <https://doi.org/10.3390/lubricants9010002>

11. *Miroshnuk, O. O., & Tymchuk, S. O.* (2013). Uniform distribution of loads in the electric system 0.38/0.22 kV using genetic algorithms. *Technical Electrodynamics*, 2013(4), 67-73.

12. *Попов С. М.* Дослідження руйнування поверхні в умовах напруги зносостійким сплавом / *С. М. Попов, М. О. Гребешков* // *Future of science: innovations and perspectives. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference.* SSPG Publish. Stockholm, Sweden. 2025. pp. 122-126. - ISBN 978-91-87224-03-4

Popov S.M., Laptieva H.M., Hrebieshkov M.O., Kapustian O.Ye.

SCIENTIFIC PROBLEMS OF TRIBOMATERIALS SCIENCE IN THE ANALYSIS OF TRIBOSYSTEMS

The research is devoted to the development of an integrated approach to the analysis of wear of tribosystems in an abrasive environment and the justification of directions for increasing the wear resistance of materials based on hard inclusions of titanium diboride. The literature lacks coordinated systemic approaches that would combine materials science solutions with engineering calculation methods for a simple and reliable prediction of wear in specific operating conditions. An analysis of real samples after operation was carried out: the morphology of friction surfaces and the nature of wear of the teeth of the part were investigated using optical microscopy and measurement of geometric wear parameters. Experimental studies of wear resistance were carried out in laboratory conditions using the method of standardized abrasive testing DSTU 23.208-79. The work analyzed the features of the mechanism of wear of a steel friction pair under the action of abrasive particles and identified the main factors and the nature of their influence - the main contribution can be made by fatigue wear of the metal. The dependence of the material wear intensity on the relative hardness of the abrasive has been determined and the possibility of predicting wear using simplified engineering calculations has been shown - the decisive role of the parameter of the relative hardness of the abrasive in the wear intensity has been confirmed. Scientific approaches to increasing the wear resistance of tribocompounds have been substantiated - the material must be hard enough to resist cutting, but at the same time sufficiently viscous and strong to resist fatigue cracks, in particular

through modification of the working surface material with TiB_2 inclusions. Promising directions for further research in the field of tribomaterials science have been outlined - the use of neural networks to predict the wear of machine parts under given loading conditions and material properties in conjunction with improved materials.

Keywords: *Wear, abrasive, reliability, superhard inclusion, hardness ratio.*

Стаття надійшла 10.12.2025р.

УДК 620.17:539.4

doi.org/10.31498/2522-9990302025347058

Беженев С.О., Капустян О.Є.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛИШКОВИХ ПОВЕРХНЕВИХ МАКРОНАПРУЖЕНЬ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВУ НІКЕЛЮ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Стан поверхневого шару матеріалу, який визначається різними параметрами, в тому числі і залишковими поверхневими макронапруженнями є найважливішим фактором, що впливає на властивості міцності. Проте врахування дії просторових внутрішніх сил пружності є досі дуже проблематичним. Робота присвячена дослідженню зв'язку між різними параметрами залишкових поверхневих макронапружень та механічними характеристиками зразків сплаву нікелю з різною технологічною спадковістю із застосуванням неруйнівного методу акустичної емісії. Досліджували циліндричні зразки сплаву нікелю ХН77ТЮР-ВД з різною технологічною спадковістю: після точіння, шліфування, електрохімічного полірування, а також після поверхневого пластичного зміцнення сталевими кульками, які коливалися з ультразвуковою частотою. Величину осевих залишкових поверхневих макронапружень визначали за кривою деформації спеціальних зразків при пошировому травленні матеріалу. Особливості випромінювання акустичної емісії в зразках досліджували при ступінчастому навантаженні зразків за схемою триточкового вигину до рівня напружень $\sigma_{0.2}$. Механічні характеристики статичної міцності визначалися в результаті випробувань на одновісне розтягування зразків. Втомні випробування проводилися в умовах дії циклічних згинальних напружень, що виникають в результаті введення зразка в резонансні поперечні коливання на електродинамічному вібростенді. Визначалася обмежена границя витривалості зразків на базі 10^7 циклів. Наведено результати аналізу впливу різних параметрів залишкових поверхневих макронапружень на механічні характеристики сплаву нікелю з використанням методу акустичної емісії. Встановлено визначальні параметри залишкових поверхневих макронапружень, що контролюють процес багатоциклової втоми. Запропоновано спосіб їх визначення неруйнівним експрес методом акустичної емісії.

Ключові слова: Акустична емісія, багатоциклова втома, залишкові напруження, статистичний аналіз, технологічна спадковість.

Постановка проблеми. Найважливішим фактором, що впливає на властивості міцності матеріалу, є стан його поверхневого шару, який визначається різними параметрами, в тому числі і залишковими поверхневими макронапруженнями (ЗПМ). Проте досі дуже проблематичним залишається врахування дії просторових внутрішніх сил пружності, що є наслідком попередніх термічних і механічних ефектів. З'ясування природи зміцнення