

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ЗМІНИ ГЕОМЕТРІЇ ПІСЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА УДАРНО-АБРАЗИВНЕ ЗНОШУВАННЯ

***Анотація.** Сучасний етап розвитку матеріалознавства характеризується високим рівнем досліджень структури та механічних властивостей матеріалів. Подальший прогрес у цій галузі пов'язаний не лише з розробленням принципово нових методів випробувань, але й із вдосконаленням існуючих підходів шляхом інтеграції сучасних цифрових технологій реєстрації та аналізу даних. Це дозволяє не тільки підвищити точність вимірювань та збільшити кількість проміжних значень, але й визначити додаткові характеристики поведінки матеріалу, що раніше були недоступними для прямого вимірювання. Метою цієї роботи є розширення інформативності методу випробувань на ударно-абразивне зношування шляхом цифровізації його результатів для отримання комплексної оцінки опору матеріалу динамічному абразивному впливу. У роботі представлено огляд методів проведення випробувань на абразивне та ударно-абразивне зношування та розглянуто аспекти вдосконалення методики визначення показників для аналізу результатів ударно-абразивного зношування. На відміну від класичних підходів, які обмежуються лише визначенням втрати ваги зразка, запропонована методика включає додаткове 3D-сканування для кількісної оцінки зміни геометрії поверхні після випробувань. Наукова новизна полягає у можливості не лише фіксувати загальний показник зношування (втрату ваги), але й безпосередньо вимірювати розподіл та величину пластичної деформації, що накопичується в металі під дією ударного впливу абразивних частинок. Запропонований підхід дозволяє перейти від одомірної оцінки зносостійкості до двовимірної (втрати ваги + деформаційний рельєф). За результатами 3D-сканування та подальшої обробки отриманої інформації формується графічне зображення (карта глибин або профілограма), яке кількісно характеризує опір матеріалу пластичному деформуванню в умовах ударно-абразивної дії. Це відкриває нові можливості для порівняльного аналізу матеріалів, прогнозування їх*

поведінки в умовах експлуатації та верифікації математичних моделей процесів зношування.

Ключові слова: ударно-абразивний знос, зважування, топографія поверхні, параметри зношування, оптична профілометрія, 3D-сканування, пластична деформація, експлуатаційні властивості.

Сучасний етап розвитку матеріалознавства характеризується поглибленими дослідженнями структури та механічних властивостей матеріалів. Подальший розвиток галузі пов'язаний не лише з впровадженням нових методів випробувань, а й із удосконаленням наявних підходів шляхом інтеграції сучасних цифрових технологій для збору та обробки даних. У машинобудуванні та для транспорту поширеною є проблема зношування деталей у процесі експлуатації, що зумовлює необхідність встановлення причин, пошуку способів підвищення опору зношуванню, надійного прогнозування відмови та часу ремонту деталей. Для цього недостатньо оперувати єдиним показником зношування – втратою ваги, тому зміни в процесі тертя можуть бути ідентифіковані за характерними ознаками мікроструктури та морфологічними змінами поверхні. Аналіз цих ознак дозволяє не лише визначити механізми руйнування, але й оцінити умови експлуатаційного навантаження. На основі отриманих даних стає можливим обґрунтований вибір матеріалів із підвищеною зносостійкістю та оптимізація конструкційних рішень. Крім того, контроль і вимірювання зношування відіграють важливу роль для успішного відновлення, ремонту та повторного використання деталей. Використання відновлених компонентів дозволяє знизити ресурсні та енергетичні витрати, а також зменшити негативний вплив на довкілля.

Метою цієї роботи є підвищення інформативності та точності методу випробувань на ударно-абразивне зношування.

Спочатку було проведено систематичний аналіз особливостей проведення таких випробувань, включаючи фактори, що впливають на процес зношування та достовірність отриманих результатів. На основі цього аналізу вдосконалено методіку дослідження, що дозволяє більш точно визначати параметри зносу та оцінювати розподіл зміни геометрії на різних ділянках випробовуваних зразків.

Зношування має складну багатофакторну природу і визначається не лише властивостями матеріалу, а й умовами його роботи, тобто характеристиками трибологічної системи в цілому. Це включає тип контакту, умови навантаження, швидкість відносного руху, середовище, наявність абразивних частинок або змащування тощо. Інтенсивність зношування залежить від ряду експлуатаційних факторів. Втрата матеріалу може корелювати з характеристиками абразивного матеріалу та часом взаємодії, причому для пластичних матеріалів характерна наявність інкубаційного періоду, після якого починається інтенсивне руйнування. Для крихких матеріалів така стадійність, як правило, відсутня [1].

Існує декілька підходів до класифікації зношування. За механізмами руйнування виділяють чотири основні типи: поверхнева втома, абразивне зношування (стирання), адгезійне зношування та трибохімічні процеси [2]. Окремо розглядають такі види, як фретинг і корозійне зношування.

Абразивне зношування відбувається внаслідок механічного видалення матеріалу більш твердими частинками або поверхнями. При цьому розрізняють двочастинкове (двотільне) зношування, коли абразив жорстко закріплений і рух відбувається в одній площині, та тричастинкове (тритільне), що реалізується за умов довільного руху вільних абразивних частинок. Ударне зношування виникає при багаторазових зіткненнях частинок або тіл із поверхнею матеріалу і може реалізовуватися під різними кутами атаки. Залежно від умов взаємодії розрізняють ерозійне та власне ударне зношування. Ерозія проявляється як поступова втрата матеріалу внаслідок дії потоку твердих частинок, які хаотично взаємодіють із поверхнею.

У реальних умовах експлуатації, зокрема в гірничій промисловості (під час роботи конвеєрів, дробарок, навантаження та розвантаження матеріалів), ударна дія абразивних частинок поєднується з процесами абразивного зношування. Такий комбінований механізм отримав назву ударно-абразивного зношування і характеризується втратою матеріалу внаслідок багаторазових ударів абразивних частинок [3]. Враховуючи складність процесів при ударно-абразивному зношуванні, утворювані пошкодження мають свої особливості. Якщо за умови суто абразивного зношування втрата матеріалу реалізується переважно за рахунок мікромеханізмів дряпання, різання, та клиноутворення,

що визначаються навантаженням і властивостями абразивних частинок [4], то за умови ударно-абразивної дії абразивні частинки взаємодіють із поверхнею під різними кутами (від 0° до 90°) та з різними швидкостями. За малих кутів дії переважають механізми, характерні для абразивного зношування [5]. Із збільшенням кута та енергії удару реалізується локальне витіснення або видалення матеріалу з утворенням ударних кратерів. При майже нормальному ударі в зоні контакту формується валик шляхом витиснення матеріалу зразку. Це зумовлює суттєві відмінності у структурі і властивостях підповерхневого шару: для ударно-абразивної дії характерні інтенсивна пластична деформація, перемішування матеріалу та вбудовування абразивних частинок, тоді як при чисто абразивному зношуванні такі ефекти виражені значно слабше [6].

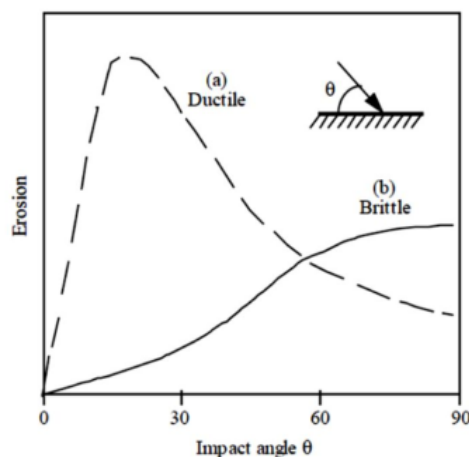


Рисунок 1 - Вплив кута удару на втрату матеріалу: а – пластичні матеріали з піком зносу при малих кутах дії, б – крихкі матеріали [1, 6]

Важливою особливістю є різний вплив механічних властивостей матеріалу на зносостійкість. Для абразивного зношування характерна чітка залежність: зі зростанням твердості інтенсивність зношування зменшується [7]. Натомість при ударно-абразивному зношуванні ця залежність має значний розкид, і в окремих випадках підвищення твердості може навіть призводити до збільшення зносу [8]. Це пояснюється тим, що в умовах ударного навантаження визначальними стають також в'язкість, пластичність і здатність матеріалу до деформаційного зміцнення. Загалом зносостійкість визначається сукупністю властивостей, мікроструктурою, фазовим складом, а також параметрами взаємодії в трибологічній системі [5, 9].

Швидкість ударно-абразивного зношування також визначається швидкістю зіткнення частинок, причому ця залежність має ступеневий характер; показник ступеню є вищим для крихких матеріалів. Кут атаки істотно впливає на механізм руйнування: для пластичних матеріалів максимальна інтенсивність ерозії спостерігається за малих кутів, тоді як для крихких – за кутів, близьких до нормального [1, 5].

Суттєвий вплив мають також характеристики абразивних частинок, зокрема їх розмір, форма та твердість [10]. Встановлено критичний розмір частинок, після досягнення якого швидкість ерозії стабілізується. Для пластичних матеріалів швидкість зношування зменшується, якщо відношення твердості частинок до твердості матеріалу є меншим за одиницю. Додатковими факторами є щільність потоку частинок та температура середовища. Процес руйнування при багаторазових ударах відбувається у два етапи: зародження та розвиток тріщин у підповерхневому шарі, а також відокремлення частинок зносу у вигляді лусочок [11]. У зв'язку з цим матеріали, що працюють в умовах ударно-абразивного зношування, повинні поєднувати високу твердість із достатньою пластичністю та в'язкістю, що забезпечує опір як пластичній деформації, так і крихкому руйнуванню [12, 13]. Тому при аналізі механізмів деградації поверхні необхідно враховувати не лише втрату ваги як показник зношування, а й параметри, які характеризують процеси пластичної деформації, руйнування та структурних змін у матеріалі.

Слід зазначити, що на сьогодні відсутня уніфікована методика визначення ударно-абразивного зношування, незважаючи на його широке використання у наукових і прикладних дослідженнях для опису складних умов руйнування, в яких одночасно реалізуються механізми ударної та абразивної дії.

Суттєвою проблемою є складність відтворення реальних умов експлуатації в лабораторних випробуваннях. На практиці умови характеризуються високою мінливістю, зокрема зміною температури, вологості, складу та концентрації абразивних частинок, а також нерівномірністю навантаження в часі. Крім того, геометрія та розташування елементів конструкції впливають на інтенсивність зношування; наприклад, периферійні елементи ковша екскаватора зношуються швидше, ніж центральні [14].

Моделювання процесів ударно-абразивного зношування засобами чисельного аналізу хоча й має своїх прихильників (ABAQUS та Ls-DYNA) є обмеженим через складність опису багатофакторної взаємодії частинок між собою, із поверхнею матеріалу та рухомими елементами системи (наприклад, обертання барабана, змінні швидкості та тривалість навантаження).

У зв'язку з цим, вдосконалення експериментальних методик базується на створенні випробувального обладнання, здатного максимально імітувати реальні умови роботи матеріалу. При цьому вибір методики має бути обґрунтованим специфікою роботи матеріалу. Це є критично важливим для отримання достовірних результатів і коректної оцінки матеріалів за зносостійкістю.

На сьогодні найбільш поширеними методами випробувань є дослідження зношування за схемою «штифт–диск» та випробування в умовах тертя сухим піском із використанням гумового колеса [15, 16]. Але вони, як правило, не дозволяють використовувати абразивні частинки, характерні для реальних умов експлуатації, і переважно є орієнтованими на оцінку зносостійкості за твердістю матеріалу. Зміна структурного стану чи зменшення крихких характеристик окремих фаз підвищують супротив ударному руйнуванню при одночасній стійкості до абразивного зношування. Наприклад, високолеговані білі чавуни з високим вмістом хрому демонструють високу зносостійкість у випробуваннях цього типу завдяки наявності твердих карбідних фаз, що перешкоджають проникненню абразиву. Однак в умовах ударного або виривного зношування їхня ефективність суттєво знижується внаслідок крихкого руйнування та фрагментації карбідів, що призводить до інтенсифікації зношування [17]. Мартенсит, який утворюється із залишкового аустеніту під дією динамічних навантажень чавуну здатен чинити опір крихкому руйнуванню тільки завдяки легуванню [18].

Одним із найрозповсюдженіших методів дослідження ударно-абразивного зношування є барабанні методи випробування, зокрема типу *impeller-tumbler*, що при випробуванні створює каскадний потік абразивних частинок. Незважаючи на відсутність стандартизації, ці методи широко застосовуються у наукових і прикладних дослідженнях завдяки здатності

відтворювати умови взаємодії матеріалу з потоком абразивних частинок, наближених до умов експлуатації [2, 19, 20].

В дослідницькій практиці використовувалися різні конструкції установок. Типова конструкція випробувальної установки включає сталевий барабан із можливістю герметичного закриття, всередині якого розміщено маточину робочого колеса з тримачами для зразків. Зразки, як правило, встановлюються під заданими кутами (наприклад, 45° або 90°) до напрямку руху абразиву. Барабан заповнюється абразивними частинками (щебінь, гранітна крихта, металевий дріб тощо) і обертається з відносно невеликою швидкістю, що забезпечує безперервний каскадний рух частинок і їхню взаємодію із зразками (рис. 2).

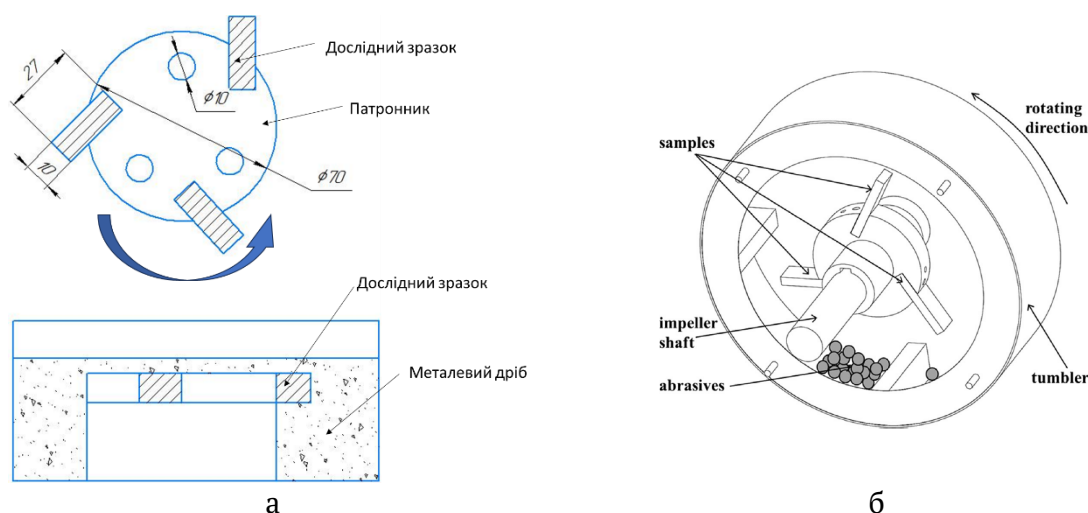


Рисунок 2 – Приклади схем робочої камери дослідних машин для визначення ударно-абразивного зношування; а – машина УА-3, б – машина MLD-10 [20]

Важливим є вплив розташування зразків у барабані [21], тому воно має бути максимально уніфікованим, щоб забезпечити однакові умови навантаження. Для підвищення достовірності результатів доцільно здійснювати перестановку зразків між тримачами або використовувати еталонні зразки для контролю відтворюваності умов.

Параметри випробування суттєво впливають на інтенсивність зношування. Зокрема, швидкість обертання барабана повинна забезпечувати вільний рух частинок: при надто низьких швидкостях зменшується кількість зіткнень, тоді як при надто високих – абразивні частинки утримуються на периферії

барабана, що також знижує ефективність їх взаємодії зі зразками. Також важливими є гранулометричний склад, форма та твердість абразиву, які повинні залишатися стабільними принаймні в межах одного випробування. Умови зношування регулюються кількістю абразиву, розміром частинок, тривалістю та режимом випробування. Хоча стандартна тривалість становить близько 1 години, багатогодинні випробування вважаються більш репрезентативними, оскільки дозволяють врахувати еволюцію процесів зношування [22].

Характерною особливістю барабанних методів є локалізація зношування у крайових зонах зразків [5]. Встановлено, що швидкість зношування кромки може значно перевищувати зношування центральних ділянок, особливо на початкових стадіях випробування та при великих кутах встановлення зразків. Це дозволяє ефективно моделювати експлуатаційні умови для елементів, які працюють у режимах інтенсивного крайового зношування (кромки ковшів, лопатки, транспортні елементи) [23].

Водночас така нерівномірність розподілу зношування потребує обережного підходу до інтерпретації результатів і вибору зон для аналізу. Для отримання репрезентативних даних необхідно забезпечувати достатню тривалість випробувань та враховувати геометричні особливості зразків.

Результати випробувань на ударно-абразивне зношування визначаються за допомогою комплексу кількісних і якісних параметрів, що характеризують як інтенсивність втрати матеріалу, так і механізми його руйнування.

Найбільш поширеним підходом є зважування, яке—базується на вимірюванні втрати ваги зразка за певний проміжок часу або на одиницю площі [24, 25]. Простота реалізації та кількісний характер результатів зумовлюють його широке застосування. Втрати ваги можуть бути перераховані в об'ємне зношування, що дозволяє оцінити масштаб деградації матеріалу.

Водночас такий підхід має низку обмежень. Його точність істотно знижується при малих втратах ваги, а також у випадках нерівномірного зношування поверхні. Додаткові похибки можуть виникати внаслідок окиснення поверхні, поглинання вологи, перенесення матеріалу між контактуючими тілами або обмеженої точності вагового обладнання [26, 27]. Крім того, цей метод не дозволяє отримати інформацію про локальні зміни

поверхні та механізми зношування. Особливо це актуально для покриттів, де вимірювана втрата ваги включає як матеріал покриття, так і підкладки.

Загалом вимірювання втрати ваги або об'єму дає уявлення про загальний рівень зношування, однак не дозволяє ідентифікувати механізми руйнування. За однакових значень втрати матеріалу процеси зношування можуть суттєво відрізнятися за своєю природою, що вимагає застосування додаткових методів аналізу [17, 28]. Тому для повного розуміння механізмів зношування необхідними є металографічні дослідження поперечних перерізів зразків під час яких часто спостерігається формування деформованого шару, на межі якого з матрицею можуть зароджуватися втомні тріщини, що призводить до подальшого розшарування матеріалу. Додатково можуть проводитись вимірювання твердості поверхневих зон, де може спостерігатися як зміцнення, так і локальне розм'якшення матеріалу. Отримані результати співвідносяться з інтенсивністю зношування та характером пошкоджень, що дозволяє встановити взаємозв'язок між умовами навантаження і поведінкою матеріалу.

Такий комплекс методів аналізу створює передумови для підвищення інформативності ударно-абразивних випробувань і стає основою для впровадження сучасних цифрових підходів до дослідження зношування.

З цією метою широко застосовують методи дослідження морфології поверхні, зокрема оптичну та електронну мікроскопію, а також профілометричні вимірювання. Оптична стереомікроскопія дозволяє ідентифікувати характерні зони зношування, тоді як сканувальна електронна мікроскопія забезпечує детальний аналіз пошкодженої поверхні, включаючи виявлення вбудованих абразивних частинок, мікротріщин та локальних деформацій.

Початковий аналіз зношеної поверхні, окрім візуального огляду, який є суб'єктивним і не має кількісних показників, зазвичай здійснюється із застосуванням методів оцінки геометрії поверхні, зокрема оптичної профілометрії. При цьому часто досліджується окрема локальна ділянка зразка, що ускладнює подальшу ідентифікацію її положення відносно всієї деталі та обмежує репрезентативність результатів. Профілометричні методи, зокрема оптична профілометрія, дозволяють отримати кількісні характеристики мікрорельєфу поверхні, такі як шорсткість, глибина западин і висота напливів.

Водночас профілометричні методи мають низку обмежень. Вони забезпечують детальний аналіз лише локальних ділянок поверхні та не дозволяють оцінити зміну геометрії деталі в цілому. Побудова тривимірної топографії шляхом зшивання окремих сканів є трудомісткою, потребує значного часу та може супроводжуватися похибками позиціонування.

Використання тривимірних (3D) досліджень суттєво розширює можливості аналізу, оскільки дає змогу оцінювати морфологію зношеної поверхні та визначати параметри, недоступні при традиційних двовимірних підходах [29, 30]. Використання сучасного програмного забезпечення дозволяє безпосередньо визначати об'єм втрати матеріалу на основі цифрової моделі поверхні, що підвищує точність оцінювання. Карта глибин дозволяє оцінювати геометричні та морфологічні характеристики пошкоджень (глибину, форму, орієнтацію подряпин, валиків, мікросколів, відлущувань і кратерів), а також параметри шорсткості поверхні. На основі цих даних визначаються характерні зони для подальших мікроструктурних досліджень, які, як правило, передбачають виготовлення поперечних шліфів. Це дає змогу виявити такі процеси, як утворення адіабатичних зсувних смуг, розшарування, розвиток тріщин, окиснення, локальна пластична деформація та зміни структурного стану підповерхневих шарів.

Важливим доповненням є застосування 3D-сканування, оскільки воно додатково дозволяє аналізувати морфологію зносу на макро- та мезорівні, забезпечуючи комплексну оцінку змін геометрії поверхні. Це особливо актуально для нерівномірного зношування, деформованих ділянок з напливами та оцінювання локальних пошкоджень, які потребують подальшого детального аналізу.

Існуючі методи вимірювання топографії поверхні умовно поділяються на контактні та безконтактні. Контактні методи (зокрема стилусні) характеризуються високою точністю та відтворюваністю, однак є трудомісткими, обмеженими за площею аналізу та можуть впливати на поверхню зразка [31-33]. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях перевага надається безконтактним оптичним методам, таким як інтерференційна та конфокальна мікроскопія, які дозволяють отримувати детальну інформацію про мікрорельєф поверхні. Застосування таких методів забезпечує можливість

порівняння реальної поверхні з еталонною (наприклад, CAD-моделлю) та візуалізації розподілу зносу у вигляді карт відхилень, що дає змогу ідентифікувати зони різної інтенсивності зношування [34].

Результати вимірювань можуть залежати від типу обладнання, умов сканування та застосованих алгоритмів фільтрації даних. Важливо зазначити, що вибір параметрів вимірювання та обробки даних істотно впливає на результати аналізу.

Тому використання лише 3D-сканування як єдиного методу оцінки зношування є недостатнім. Це пов'язано з обмеженою роздільною здатністю більшості сканерів (чутливість методу 0,1 – 0,01 мм), що не дозволяє виявляти дрібні особливості поверхні.

Отже, найбільш обґрунтованим підходом є комбіноване використання методів різного масштабного рівня.

Оптичні методи 3D-сканування набувають поширення і при оцінюванні зношування деталей складної геометричної форми, виготовлених із високоміцних матеріалів і підданих поверхневому зміцненню [35].

Сучасні дослідження демонструють тенденцію до інтеграції 3D-сканування з класичними трибологічними випробуваннями. Зокрема, поєднання даних, отриманих за допомогою трибометрів, із тривимірною топографією поверхні забезпечує проведення мультимасштабного та багатофізичного аналізу процесів зношування.

Оскільки різні процеси (пластична деформація, мікрорізання, втомне руйнування) проявляються на різних масштабних рівнях, їх роздільний аналіз забезпечує більш повне розуміння деградації матеріалу. На рисунку 3 наведено результати визначення зміни геометрії випробувального зразка відносно його початкового стану після проведення випробувань на ударно-абразивне зношування (рис.3, а) та еволюцію мікроструктури (рис.3, б) та мікротвердості після випробування (рис.3, в).

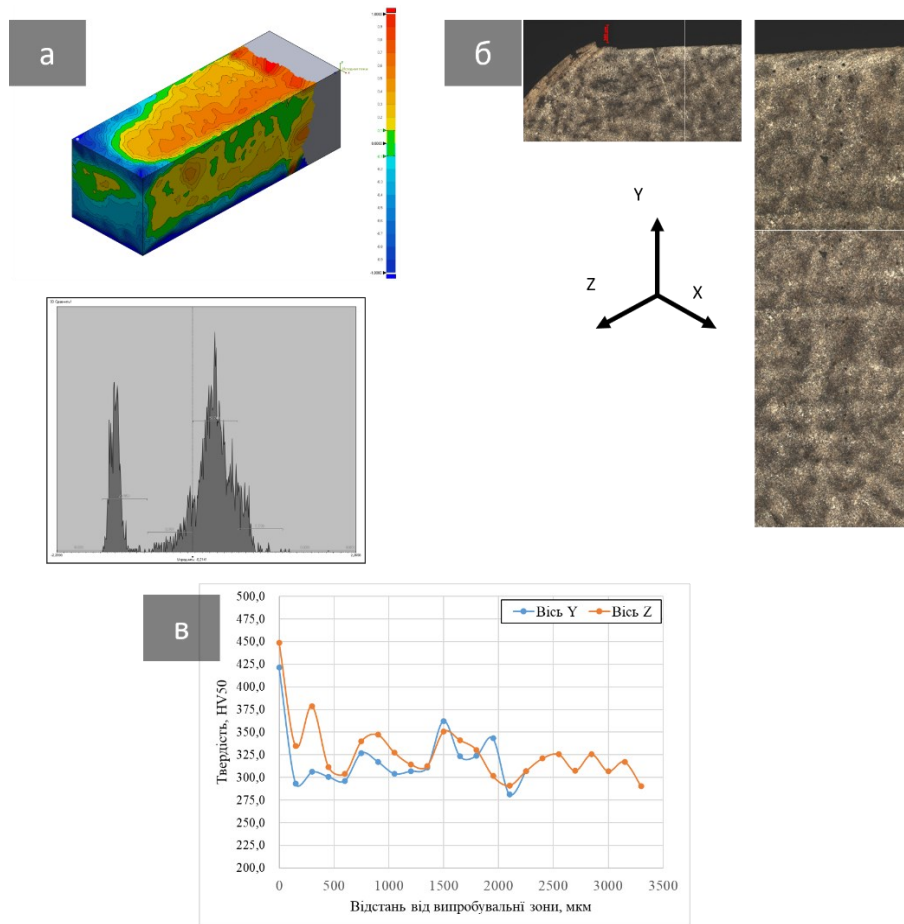


Рисунок 3 – Відхилення від початкових розмірів дослідних зразків по геометрії:
 а – після випробування на ударно-абразивне зношування,
 б – еволюція мікроструктури, в – зміна мікротвердості за перерізом

Таким чином, застосування 3D-сканування дозволяє виявити канавки, напливи та інші морфологічні особливості, що формуються внаслідок пластичної деформації; провести оцінювання нерівномірності навантаження та асиметрію зношування; визначити локальні зони інтенсивного зношування та проводити аналіз розподілу навантажень між різними ділянками зразка. Також проведення 3D-сканування дозволяє отримати детальні карти відхилень, що відображають зміну геометрії відносно поверхні перед випробуваннями, забезпечує цифрове документування об'єктів, створення точних моделей для мультимасштабного та багатофізичного аналізу, а також виконувати оцінку змін форми та розмірів деталей протягом терміну експлуатації.

Висновки

1. Використання оптичного 3D-сканування є ефективним та інформативним методом для дослідження ударно-абразивного зношування, оскільки дозволяє відтворювати реальний об’єм та топографію випробуваних деталей, виявляючи макро- і мезомасштабні зміни поверхні.

2. Побудова 3D-еталонної моделі незношеного зразка та її порівняння з оцифрованою моделлю зношеного матеріалу дозволяє кількісно оцінити швидкість зносу та розподіл навантажень по поверхні, а також побудувати карти відхилень для наочної візуалізації процесів деформації.

3. Процедури підготовки даних, включно з калібруванням сканера, оптимізацією хмари точок або сітки, та врахуванням факторів зовнішнього середовища (температура, освітлення, бруд) є критично важливими для підвищення точності вимірювань і мінімізації систематичних похибок.

4. Запропонована цифрова методика оцінки зносу є простою, швидкою та в багатьох випадках точнішою порівняно з традиційними методами профілометрії та оптичного сканування окремих ділянок, що дозволяє отримати комплексну оцінку ударно-абразивного руйнування деталей.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Saha G. Abrasive wear of alloys for ground engaging tools. 2017.
2. Zolotarevskiy V., Corujeira Gallo S., Pereira M., Barnett M. Modelling of impeller-tumbler wear test with discrete element method. *Wear*. 2022. Vol. 510–511. 204509. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204509.
3. Chintha A.R. Metallurgical aspects of steels designed to resist abrasion, and impact-abrasion wear. *Materials Science and Technology*. 2019. Vol. 35. № 10. P. 1133–1148. DOI: 10.1080/02670836.2019.1615669.
4. Ratia-Hanby V., Rojacz H., Terva J., Valtonen K., Badisch E., Kuokkala V.-T. Effect of multiple impacts on the deformation of wear-resistant steels. *Tribology Letters*. 2015. Vol. 57. 15. DOI: 10.1007/s11249-014-0460-7.
5. Ratia V., Valtonen K., Kuokkala V.-T. Impact-abrasion wear of wear-resistant steels at perpendicular and tilted angles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2013. Vol. 227. № 8. P. 868–877. DOI: 10.1177/1350650113487831.
6. Wensink H., Elwenspoek M. A closer look at the ductile–brittle transition in solid particle erosion. *Wear*. 2002. Vol. 253. P. 1035–1043. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00223-5.
7. Sugimoto K.-i. Recent progress of low and medium-carbon advanced martensitic steels. *Metals*. 2021. Vol. 11. № 4. 652. DOI: 10.3390/met11040652.
8. Cai Y., Wei T., Jiang Y. et al. Tailoring martensite and ferrite via tempering to improve impact–abrasive wear resistance in lower alloy medium-carbon steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2026. DOI: 10.1007/s11665-026-13195-5.

9. Sundström A., Rendón J., Olsson M. Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions. *Wear*. 2001. Vol. 250. P. 744–754. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00712-8.
10. Sahin Y., Ozdin K. The effect of abrasive particle size on the wear behaviour of metal matrix composites. 2004. P. 344–349. DOI: 10.1063/1.1766548.
11. Pondicherry K., Roy M. Comparative abrasive wear study of bearing steels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2025. DOI: 10.1177/09544062251380051.
12. Veinthal R., Tarbe R., Kulu P., Käerdi H. Abrasive erosive wear of powder steels and cermets. *Wear*. 2009. Vol. 267. P. 1838–1844. DOI: 10.1016/j.wear.2009.02.021.
13. Narayanaswamy B., Ghaderi A., Hodgson P., Cizek P., Chao Q., Safi M., Beladi H. Abrasive wear resistance of ferrous microstructures with similar bulk hardness levels evaluated by a scratch-tester method. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2019. Vol. 50. DOI: 10.1007/s11661-019-05354-2.
14. Cucinotta F., Scappaticci L., Sfravara F., Morelli F., Mariani F., Varani M., Mattetti M. On the morphology of the abrasive wear on ploughshares by means of 3D scanning. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 179. P. 117–125. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.01.006.
15. Di Puccio F., Di Pietro A., Mattei L. Pin-on-plate vs. pin-on-disk wear tests: theoretical and numerical observations on the initial transient phase. *Lubricants*. 2024. Vol. 12. № 4. 134. DOI: 10.3390/lubricants12040134.
16. Elalem K., Li D. Variations in wear loss with respect to load and sliding speed under dry sand/rubber-wheel abrasion condition: a modeling study. *Wear*. 2001. Vol. 250. P. 59–65. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00662-7.
17. Jun-tong X., Qing-de Z., Shi-hui L., Guang-Shun S. Influence of retained austenite on the wear resistance of high chromium cast iron under various impact loads. *Wear*. 1993. P. 83–88. DOI: 10.1016/0043-1648(93)90487-7.
18. Kovzel M., Babachenko O., Togobitska D. Iron-based chromium-manganese alloys with an increased range of tribological properties. In: Shalevska I. (ed.). *Modern trends in construction materials technologies*. Kharkiv : Technology Center PC, 2025. P. 4–41. DOI: 10.15587/978-617-8360-17-7.ch1.
19. Haiko O., Valtonen K., Kaijalainen A., Uusikallio S., Hannula J., Liimatainen T., Kömi J. Effect of tempering on the impact-abrasive and abrasive wear resistance of ultra-high strength steels. *Wear*. 2019. Vol. 440–441. 203098. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203098.
20. Haiko O., Miettunen I., Porter D., Ojala N., Ratia V., Heino V., Kemppainen A. Effect of finish rolling and quench stop temperatures on impact-abrasive wear resistance of 0.35 % carbon direct-quenched steel. *Tribologia – Finnish Journal of Tribology*. 2017. Vol. 35. № 1–2. P. 5–21.
21. Zhang Q., Zuo G., Lai Q., Tong J., Zhang Z. EDEM investigation and experimental evaluation of abrasive wear resistance performance of bionic micro-thorn and convex hull geometrically coupled structured surface. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. № 14. 6655. DOI: 10.3390/app11146655.
22. Ratia-Hanby V. Behavior of martensitic wear resistant steels in abrasion and impact wear testing conditions. 2015.
23. Ratia-Hanby V., Valtonen K., Kemppainen A., Kuokkala V.-T. The role of edge-concentrated wear in impact-abrasion testing. *Tribology Online*. 2016. Vol. 11. P. 410–416. DOI: 10.2474/trol.11.410.
24. Pawlus P., Reizer R. Profilometric measurements of wear scars: a review. *Wear*. 2023. Vol. 534–535. 205150. DOI: 10.1016/j.wear.2023.205150.

25. Li Y., Schreiber P., Schneider J., Greiner C. Tribological mechanisms of slurry abrasive wear. Friction. 2022. Vol. 11. P. 1079–1093. DOI: 10.1007/s40544-022-0654-1.
26. Pillari L.K. Fabrication of graphene-based master alloys for the development of B319 aluminum alloy-graphene composites with enhanced tribological properties. 2024. DOI: 10.14288/1.0444064.
27. Yang M., Chen X., Wang Z., Pan P. Study on the effect of tempering on the impact abrasive wear performance of 45Si2MnCr2Mo ultra-high strength steel. Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2566. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2566/1/012010.
28. Lukšić H., Rodinger T., Rede V., Švagelj Z., Čorić D. Comparative analysis of microstructure and properties of wear-resistant structural steels. Materials. 2025. Vol. 18. № 17. 4002. DOI: 10.3390/ma18174002.
29. Grochała D., Bachtia-Radka E., Dudzińska S. Badania cech powierzchni z wykorzystaniem optycznych metod skaningowych – wymagania i pomiary zgodnie z wytycznymi serii PN-EN ISO 25178. Przegląd Spawalnictwa – Welding Technology Review. 2016. Vol. 88. DOI: 10.26628/ps.v88i10.693.
30. Rastegar V., Karimi A. Surface and subsurface deformation of wear-resistant steels exposed to impact wear. Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. Vol. 23. DOI: 10.1007/s11665-013-0842-2.
31. Pawlus P., Reizer R., Żelasko W. Influence of the traverse speed of the stylus tip on changes in the areal texture parameters of machined surfaces. Materials. 2024. Vol. 17. № 20. 5052. DOI: 10.3390/ma17205052.
32. Podulka P., Kulisz M., Antosz K. Evaluation of high-frequency measurement errors from turned surface topography data using machine learning methods. Materials. 2024. Vol. 17. № 7. 1456. DOI: 10.3390/ma17071456.
33. Lee D.-H., Cho N.G. Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilometer. Measurement Science and Technology. 2012. Vol. 23. DOI: 10.1088/0957-0233/23/10/105601.
34. Hawryluk M., Ziemba J., Zwierzchowski M., Janik M. Analysis of a forging die wear by 3D reverse scanning combined with SEM and hardness tests. Wear. 2021. Vol. 476. 203749. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203749.
35. Vorburger T.V., Rhee H.G., Renegar T.B. et al. Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33. P. 110–118. DOI: 10.1007/s00170-007-0953-8.

Received 09.03.2026.

Accepted 18.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 621.793.3:621.785.5:620.179

Tetiana Balakhanova, Ganna Kononenko, Rostyslav Podolskyi,

Maksim Kovzel, Zhanna Dementieva

METHODOLOGY FOR ANALYZING GEOMETRY CHANGES AFTER IMPACT-ABRASIVE WEAR TESTING

Abstract. *The current stage of development in materials science is characterised by a high level of research into the structure and mechanical properties of materials. Further*

progress in this field is linked not only to the development of fundamentally new testing methods, but also to the refinement of existing approaches through the integration of modern digital technologies for data recording and analysis. This allows not only for increased measurement accuracy and a greater number of intermediate values, but also for the determination of additional material behaviour characteristics that were previously inaccessible to direct measurement. The aim of this work is to enhance the informative value of the impact-abrasive wear testing method through its digitalisation, in order to obtain a comprehensive assessment of a material's resistance to dynamic impact. The paper presents an overview and examines aspects of improving the methodology for investigating impact-abrasive wear. Unlike classical approaches, which are limited to determining the mass loss of the specimen, the proposed methodology integrates 3D scanning to quantitatively assess changes in surface geometry following testing. The scientific novelty lies in the ability not only to record the integral wear index (mass loss), but also to directly measure the distribution and magnitude of plastic deformation accumulating in the metal under the dynamic impact of abrasive particles. The proposed approach allows a transition from a one-dimensional assessment of wear resistance to a two-dimensional one (mass loss + deformation relief). Based on the results of 3D scanning and subsequent processing of the obtained data, a graphical representation (depth map or profilogram) is generated, which quantitatively characterises the material's resistance to plastic deformation under impact-abrasive conditions. This opens up new possibilities for the comparative analysis of materials, the prediction of their behaviour under operational conditions, and the verification of mathematical models of wear processes.

Keywords: *impact-abrasive wear, gravimetry, surface topography, wear parameters, optical profilometry, 3D scanning*

Балаханова Тетяна Валеріївна – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший дослідник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, ORCID 0000-0003-2493-218X

Кононенко Ганна Андріївна – старший науковий співробітник, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, ORCID 0000-0001-7446-4105

Подольський Ростислав Вячеславович – Ph.D старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Дніпро, старший

науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, Київ, Україна, ORCID 0000-0002-0288-0641

Ковзель Максим Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, судовий експерт відділу фізико-хімічних, екологічних та гемологічних досліджень лабораторії досліджень матеріалів, речовин і виробів Дніпропетровського НДЕКЦ МВС України, ORCID 0000-0001-5720-1186

Демет'єва Жанна Андріївна – науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, ORCID 0009-0002-3194-9975

Balakhanova Tetiana Valeriivna – Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, Senior Scientist, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, ORCID 0000-0003-2493-218X

Kononenko Ganna Andriivna – Senior Researcher, Doctor of Engineering Sciences, Senior Scientist, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, ORCID 0000-0001-7446-4105

Podolskyi Rostyslav Viacheslavovych – Doctor of Philosophy (PhD), senior researcher, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Materials Engineer, LLC «Additive Laser Technologies of Ukraine», Dnipro; Senior Researcher, Institute of Applied Systems Analysis of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ORCID 0000-0002-0288-0641

Kovzel Maksim – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Forensic Expert of the Department of Physico-Chemical, Environmental and Gemological Research of the Laboratory for Research on Materials, Substances and Products of the Dnipropetrovsk Research and Development Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, ORCID 0000-0001-5720-1186

Dementieva Zhanna Andriivna – researcher, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, ORCID 0009-0002-3194-9975