DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.018

ЗАСТОСУВАННЯ 3D СКАНУВАННЯ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПАРАМЕТРІВ РУЙНУВАННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ПОВЕРХНІ ПІСЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА УДАРНО-АБРАЗИВНЕ ЗНОШУВАННЯ

Балаханова Т.В.[1], Кононенко Г.А.[2] [ORCID],

Подольський Р.В.[3] [ORCID], Ковзель М.А.[4]

[1]ІЧМ НАН, к.т.н., ст. досл., України

[2] ІЧМ НАН України, НТУ, «Дніпровська політехніка» д.т.н., ст.досл, України

[3]ІЧМ НАН України, ІПСУ НАН, Ph.D, України

[4] Дніпропетровського НДЕКЦ МВС, к.т.н., доц., України

Анотація.*Сучасний розвиток матеріалознавства пов'язаний із впровадженням цифрових технологій аналізу результатів випробувань. У роботі запропоновано підхід до вдосконалення методу ударно-абразивного зношування шляхом його цифровізації. На відміну від традиційної оцінки лише за втратою ваги, методика доповнена 3D-скануванням поверхні зразків після випробувань. Це дозволяє отримати кількісну інформацію про зміну геометрії, розподіл і величину пластичної деформації. Наукова новизна полягає у переході від одномірної оцінки зносостійкості до комплексної - з урахуванням деформаційного рельєфу поверхні. Результатом є побудова карт глибин і профілограм, які відображають опір матеріалу пластичному деформуванню в умовах ударно-абразивного впливу. Такий підхід розширює інформативність випробувань і створює основу для більш точного порівняння матеріалів та верифікації моделей зношування.*

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

Дослідження поверхні матеріалів є одним із найважливіших етапів матеріалознавчих досліджень і технічної експертизи. При цьому не має значення, чи йдеться про зразки після лабораторних випробувань, чи про деталі, пошкоджені в умовах реальної експлуатації, які потребують ретельного дослідження з метою встановлення механізму руйнування. Такий аналіз дозволяє визначити, чи є пошкодження випадковим, чи воно спричинене втомним руйнуванням, а також виявити можливу наявність сторонніх впливів, корозійних процесів або інших факторів деградації матеріалу. Окремим важливим напрямом є дослідження поверхні при оцінюванні зносостійкості

матеріалів, зокрема в умовах ударно-абразивного зношування. Цей вид навантаження характеризується складною природою і не може бути повністю передбачений лише на основі традиційних механічних характеристик. Наприклад, ступінь зношування при суто абразивному навантаженні часто корелює з твердістю, але у випадку ударно-абразивного впливу, матеріал повинен поєднувати високу твердість із достатньою в'язкістю руйнування [1].

Найпоширенішим способом випробування матеріалів на ударно-абразивну стійкість є використання випробувальних машин барабанного типу (рис. 1) [2].

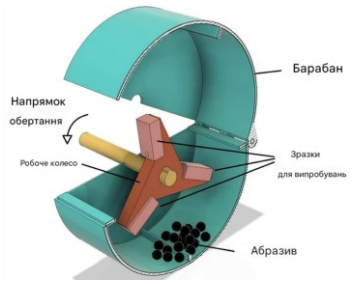

Рисунок 1 – Схематичне зображення випробувальної машини на ударно-абразивне зношування барабанного типу [3]

Суть методу полягає у закріпленні зразків певної геометричної форми та розмірів у порожнистому циліндрі (барабані), заповненому абразивними частками. Розмір, форма, кількість і, найважливіше, матеріал цих часток підбираються відповідно до умов, що моделюють реальну експлуатацію матеріалу. Як абразив можуть використовуватися керамічні тіла, металевий дріб, дрібні камінці тощо. Після закріплення зразків і завантаження абразиву барабан герметично закривається та приводиться в обертання з заданою швидкістю протягом визначеного часу. Після завершення випробувань зразки очищують і визначають втрату маси та об'єму – так званий класичний підхід. Однак вони не дозволяють врахувати локальні особливості зношування, зокрема наявність пластично деформованих зон, а також не дають можливості встановити механізми пошкодження.

Тому для повноцінного аналізу доцільно застосовувати комплексний підхід, який поєднує кількісні методи (вагові, об'ємні) з якісними (мікроструктурний та морфологічний аналіз поверхні). На сьогодні для

дослідження топографії поверхні широко застосовуються стандартизовані методи, регламентовані серією стандартів ISO 25178. Ці документи визначають конструкцію та метрологічні характеристики як контактних, так і безконтактних приладів (конфокальних, інтерферометричних, автофокусних тощо), призначених для площинного вимірювання топографії поверхні.

Застосування цих методів для оцінки зношування має низку суттєвих обмежень. По-перше, профілометричні методи дозволяють досліджувати лише локальні ділянки поверхні, що ускладнює аналіз просторово неоднорідного зношування. По-друге, формування цілісної топографічної моделі шляхом зшивання окремих сканів є трудомістким і супроводжується накопиченням похибок. По-третє, висока деталізація вимірювань часто супроводжується шумами та артефактами, що ускладнює інтерпретацію результатів.

У зв’язку з цим дедалі більшого поширення набуває використання оптичних 3D-сканерів, які мають низку суттєвих переваг [4]. Вони дозволяють швидко оцінити стан зношеної поверхні всього об’єкта без обмеження окремими локальними зонами, що є важливим при аналізі нерівномірного зношування. Ця технологія дозволяє формувати повноцінну тривимірну карту зношення досліджуваних компонентів, що забезпечує візуалізацію реального розподілу пошкоджень по всій поверхні виробу. Відповідно, стає можливим не лише якісне, але й кількісне визначення параметрів зношування на різних ділянках об’єкта. 3D-цифрова модель являє собою хмару точок або трикутну сітку.

Попри високу ефективність оптичного 3D-сканування, цей метод має низку обмежень і джерел похибок. Зокрема, можливе виникнення артефактів у вигляді піків на краях подряпин і западин, втрата сигналу в зоні фокусування через наявність пилу, корозії або неоднорідностей матеріалу [5, 6]. Крім того, на криволінійних або складних геометріях поверхні можуть з’являтися хибні ділянки (так звані «плями») внаслідок самозатінення.

Одними з найбільших джерел похибок є некоректне суміщення отриманих сіток, а також помилки, пов’язані з обробкою даних. Тому процедура обробки результатів сканування потребує особливої ретельності.

Для підвищення точності доцільно використовувати еталонні зразки, а також контролювати відстань до об’єкта сканування, яка суттєво впливає на якість отриманих даних [7].

Процедура цифрового контролю зносу зазвичай полягає у порівнянні оцифрованої 3D-моделі зношеного зразка з еталонною моделлю незношеного стану та включає такі етапи: вирівнювання (реєстрацію) та накладання еталонної і зношеної моделей; обчислення відхилень між поверхнями; визначення різниці об’ємів для кількісної оцінки інтенсивності зношування; побудову 3D-карти відхилень, що відображає просторовий розподіл зносу по поверхні зразка.

Одним із прикладів підвищення якості 3D-сканування є використання джерел світла синього спектра [8], що дозволяє підвищити точність вимірювань за рахунок меншої довжини хвилі та кращої стійкості до впливу зовнішнього освітлення.

Під час роботи з оптичними 3D-сканерами необхідно дотримуватися методологічних і процедурних вимог, що забезпечують точність та повторюваність вимірювань. Налаштування системи повинні відповідати специфікаціям виробника для конкретного типу сканера, вимірюваного об’єму та параметрів, а при необхідності слід виконувати калібрування датчика відповідно до інструкцій користувача. Регулярне калібрування є обов’язковим [9], особливо після транспортування обладнання, зміни температури або оптики сканера, оскільки навіть у лабораторії зі стабільними умовами відхилення можуть накопичуватися та впливати на точність вимірювань. Поверхні зразків потребують підготовки: при наявності блискучих або напівпрозорих ділянок доцільно нанести антиблікове покриття, а температура об’єкта та навколишнього середовища має бути однаковою [10]. Під час сканування необхідно уникати коливань платформи та змін освітлення. Вимірювання виконуються з максимальною роздільною здатністю та відповідним часом експозиції для уникнення переекспонування.

Висновки

1. Оптичне 3D-сканування є ефективним сучасним інструментом для оцінювання зношування матеріалів, що забезпечує швидке отримання повної

просторової інформації про стан поверхні та дозволяє аналізувати нерівномірність зношування по всьому об'єкту.

2. Основними перевагами методу є висока швидкість, відносна простота реалізації, інформативність та можливість формування тривимірних карт зносу, які забезпечують як якісну, так і кількісну оцінку параметрів пошкодження.

3. Забезпечення точності та відтворюваності результатів вимагає суворого дотримання методологічних вимог, включаючи регулярне калібрування обладнання, підготовку поверхні зразків і контроль умов проведення вимірювань.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Narayanaswamy B., Ghaderi A., Hodgson P. та ін. Abrasive wear resistance of ferrous microstructures with similar bulk hardness levels evaluated by a scratch-tester method // Metall. and Mat. Trans. A. 2019. Vol. 50. P. 4839–4850. DOI: 10.1007/s11661-019-05354-2

2. Ratia-Hanby 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: J. of Eng. Trib.. 2013. Vol. 227. P. 868–877. DOI: 10.1177/1350650113487831

3. Júnior A., Caceres J., Rocha D. Study of the erosive-abrasive wear resistance of Fe–14%Cr–2.8%C high chromium cast iron // Materials Research. 2024. Vol. 27. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2023-0242

4. 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

5. Pawlus P., Reizer R. Profilometric measurements of wear scars: A review // Wear. 2023. Vol. 534–535. Art. 205150. DOI: 10.1016/j.wear.2023.205150

6. Valigi M. C., Logozzo S., Affatato S. New challenges in tribology: Wear assessment using 3D optical scanners // Materials. 2017. Vol. 10, No. 5. Art. 548. DOI: 10.3390/ma10050548

7. Lamberti L. Special issue on advances in characterization of materials with optical methods // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No. 13. Art. 7958. DOI: 10.3390/app13137958

8. Cucinotta F., Guglielmino E., Risitano G., Sfravara F. Assessment of damage evolution in sandwich composite material subjected to repeated impacts by means of optical measurements // Procedia Structural Integrity. 2016. Vol. 2. P. 3660–3667. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.455

9. Mendřický R. Determination of measurement accuracy of optical 3D scanners // MM Science Journal. 2016. P. 1565–1572. DOI: 10.17973/MMSJ.2016_12_2016183

10. Bilušić M., Olivari L. Comparative analysis of handheld laser scanner and optical 3D scanning systems for industrial applications // Proceedings of the 13th International Conference Mechanical Technologies and Structural Materials 2024 / eds. N. Čatipović, J. Krolo, N. Gjeldum. Split: University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2024. P. 37–48

APPLICATION OF 3D SCANNING FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF SURFACE DAMAGE AND DEFORMATION AFTER IMPACT-ABRASIVE WEAR TESTING

Tetiana Balakhanova, Ganna Kononenko, Rostyslav Podolskyi, Maksim Kovzel

Abstract. *The modern development of materials science is associated with the implementation of digital technologies for analyzing test results. This study proposes an approach to improving the impact-abrasive wear testing method through its digitalization. In contrast to the traditional evaluation based solely on weight loss, the methodology is supplemented with 3D scanning of specimen surfaces after testing. This makes it possible to obtain quantitative information on changes in geometry, as well as the distribution and magnitude of plastic deformation. The scientific novelty lies in the transition from a one-dimensional assessment of wear resistance to a comprehensive evaluation that takes into account the deformation-induced surface relief. The result is the construction of depth maps and profilograms that reflect the material's resistance to plastic deformation under impact-abrasive conditions. This approach enhances the informativeness of testing and provides a basis for more accurate comparison of materials and validation of wear models.*

Keywords: *impact-abrasive wear, surface topography, wear parameters, optical profilometry, 3D scanning, plastic deformation, service properties.*