

УДК 621.326

Сергій Попов, докт. філ. наук, проф.; Михайло Гребешков, аспірант
Національний університет «Запорізька політехніка», Україна

НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ І КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЗНОШУВАННІ В СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ ІНЖЕНЕРНИХ КАДРІВ

Анотація: У роботі сформульовано науково-методологічні засади забезпечення надійності деталей і конструкцій при зношуванні. Запропоновано інтегрований підхід, що поєднує трибоматеріалознавство, імовірісно-статистичні методи та FEM-моделювання. Розроблено структуру навчального курсу для формування компетентностей прогнозування ресурсу та довговічності.

Ключові слова: надійність, зношування, трибосистема, технологічна спадковість, розподіл Вейбулла, FEM-моделювання.

Serhii Popov, Mykhailo Hrebieshkov

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR ENSURING THE RELIABILITY OF COMPONENTS AND STRUCTURES UNDER WEAR IN ENGINEERING EDUCATION

Abstract: The paper presents methodological foundations for ensuring reliability of components under wear. An integrated approach combining tribomaterials science, probabilistic methods, and FEM modeling is proposed. A course structure for lifetime prediction and durability assessment is developed.

Keywords: reliability, wear, tribosystem, technological heredity, Weibull distribution, FEM modeling.

Вступ. Сучасний етап розвитку глобальної економіки характеризується зміною парадигми промислового виробництва. На перший план виходять вимоги ресурсозбереження, екологічності та мінімізації життєвого циклу виробів при одночасному підвищенні їхньої експлуатаційної надійності. Проблема підготовки вищих інженерних кадрів механічного профілю стає більш нагальною, оскільки сучасний інженер має враховувати складні процеси руйнування та зношування ще на стадії концептуального проектування.

Актуальність даного дослідження зумовлена тим, що в умовах широкого впровадження технологій вторинної переробки (рециклінгу) та використання новітніх методів виготовлення, таких як адитивні технології, традиційні методи розрахунку надійності потребують суттєвого доопрацювання. Виходячи з цього, задача науково-технічних проектів сьогодні нерозривно пов'язана з надійністю деталей і конструкцій, особливо в умовах тривалого спрацювання. Це диктує необхідність формування нових методологій освітянського простору для всіх рівнів підготовки - бакалаврів, магістрів, аспірантів, докторантів.

Основні наукові методології аналізу надійності деталей і конструкцій при зношуванні. Наукова методологія аналізу надійності в умовах зношування базується на міждисциплінарному підході, що поєднує класичну механіку деформації твердого тіла, фізичне матеріалознавство, математичну теорію надійності, триботехніку та теорію зношування. У межах дослідження доцільно виокремити такі ключові методологічні напрями:

1. Імовірісно-статистична методологія.

Оскільки процес зношування має випадковий характер, зумовлений неоднорідністю структури матеріалу та варіативністю зовнішніх навантажень, надійність $P(t)$ визначається як ймовірність того, що визначальний параметр зносу $U(t)$ не перевищує граничне значення U_{lim} протягом часу t :

$$P(t) = P(U(t) < U_{lim}) = \int_0^{U_{lim}} f(u, t) du$$

де $f(u, t)$ - щільність розподілу величини зносу в момент часу t .

Методологія передбачає використання складних розподілів, таких як розподіл Вейбулла-Гніденка, який дозволяє моделювати різні стадії життя деталі [2,3]: припрацювання, нормальну експлуатацію та період інтенсивного виходу з ладу. Імовірність безвідмовної роботи за цим законом описується виразом [12]:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]$$

де β - параметр форми, що характеризує фізику процесу (при $\beta < 1$ - припрацювання, при $\beta \approx 1$ - сталий знос, при $\beta > 1$ - деградація); η - параметр масштабу.

Функції прогнозованого розподілу зносостійкості є розроблено проф. Поповим С.М. зі співавторами [1,6]. Вони базуються на багатокритеріальних моделях вигляду:

$$\epsilon = F(K[(X)^\alpha; (Y)^\gamma; (Z)^\beta])$$

де X, Y, Z - параметри, що враховують фізико-механічні властивості металу, характеристики абразиву та умови зовнішнього навантаження. Такий підхід дозволяє переходити від детермінованих розрахунків до імовірнісного прогнозування ресурсу трибосистем на стадії концептуального проектування.

2. Трибоматеріалознавство

Дана методологія розглядає зношування як результат дисипації (розсіювання) механічної енергії, що підводиться до зони фрикційного контакту. Надійність трибосистеми при цьому аналізується через призму формування захисних вторинних структур на поверхнях тертя.

Відповідно до положень синергетики, за умови досягнення критичних параметрів навантаження, поверхневий шар може переходити у стан самоорганізації. Цей процес супроводжується утворенням дисипативних структур, що характеризуються мінімальним виробництвом ентропії та різким зниженням інтенсивності зношування [4,5,7].

Науковий аналіз у цьому випадку спрямований на виявлення умов реалізації «квазібеззношувального» режиму відповідно до енергетичного принципу Шарпі, який пов'язує зносостійкість зі здатністю матеріалу поглинати енергію без макроскопічного руйнування.

Загальний баланс енергії в зоні тертя описується рівнянням:

$$W = Q + \Delta U_{cmp} + \Delta U_{nos}$$

де W - робота сил тертя; Q - теплові втрати; ΔU_{cmp} - прихована енергія деформації (зміна структури); ΔU_{nos} - енергія руйнування (утворення нових поверхонь).

Питома енергія зношування e^* , що визначає триботехнічну ефективність системи, розраховується як:

$$e^* = \frac{W}{\Delta V} \rightarrow \max$$

де ΔV - об'єм зношеного матеріалу.

Здатність матеріалів опиратися руйнуванню в узагальненому форматі багатокритеріальної трибосистеми описується функцією:

$$\epsilon = F(K[X^\alpha; Y^\gamma; Z^\beta])$$

де X, Y, Z - параметри, що враховують фізико-механічні властивості металу (зокрема твердість та ударну в'язкість), характеристики абразиву та умов навантаження.

Впровадження енергетичного підходу дозволяє пояснити варіацію інтенсивності зношування в межах одного матеріалу до 10-12 разів залежно від умов експлуатації та здатності системи до формування вторинних структур.

3. Методологія скінченно-елементного моделювання (FEM).

Сучасний аналіз надійності складних трибосистем неможливий без застосування чисельних методів [9]. Моделювання дозволяє спрогнозувати розподіл контактних напружень та температурних полів, які є першопричиною інтенсифікації втомного зношування. Це дає змогу оптимізувати геометрію конструкції ще до виготовлення дослідного зразка, що відповідає стратегічним завданням сучасної прикладної механіки.

Згідно з науковими підходами Попова С. М. та Антонюка Д. А., чисельне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) поверхневих шарів дозволяє врахувати реальну мікрогеометрію контакту та фізичну нелінійність властивостей матеріалів.

Для реалізації алгоритмів прогнозування зносу в CAE-системах найчастіше використовується дискретна форма закону Арчарда [10,11], інтегрована в ітераційний цикл перерахунку сітки:

$$\Delta h_i = k \cdot p_i \cdot \Delta s$$

де Δh_i - локальне лінійне зношування в i -му вузлі скінченно-елементної сітки; k - експериментально визначений коефіцієнт зношування; p_i - контактний тиск у вузлі, отриманий у результаті FEM-розрахунку; Δs - елементарний шлях тертя.

Загальне рівняння рівноваги системи в матричній формі, що розв'язується FEM-процесором, має вигляд:

$$[K]\{d\} = \{F_{ext}\} + \{F_{fric}\}$$

де $[K]$ - глобальна матриця жорсткості; $\{d\}$ - вектор вузлових переміщень; $\{F_{ext}\}$ - вектор зовнішніх навантажень; $\{F_{fric}\}$ - вектор сил тертя, що залежить від коефіцієнта тертя та локального тиску.

Використання FEM дозволяє ідентифікувати зони концентрації напружень, де ймовірність зародження втомних тріщин є максимальною, та впроваджувати конструктивні зміни для вирівнювання епюри контактного тиску, що підвищує загальну надійність виробу.

Концептуальні положення основ надійності деталей і конструкцій.

Концепція надійності трибосистеми базується на розумінні того, що зношування є не лише зміною геометричних параметрів, а й процесом поступової втрати працездатності та функціонального призначення системи. Основними положеннями цієї концепції є:

1. Концепція граничного стану.

Кожна конструкція має певний «ресурсний об'єм» матеріалу, який може бути втрачений без порушення геометричних параметрів деталей, вузлів і механізмів, а також без зниження їхньої кінематичної та конструкційної міцності і точності забезпечення зазорів Δ .

Радіальний зазор Δ чинить визначальний вплив на параметри частинок зношування: критичний розмір продуктів зносу d_p не повинен перевищувати величину зазору для запобігання переходу системи у режим прискореного абразивного руйнування.

Концептуально надійність забезпечується через баланс між середньою швидкістю зношування v та гранично допустимим зносом U_{lim} .

Детермінована модель ресурсу T :

$$T = \frac{U_{lim}}{v}$$

де U_{lim} - сумарний допустимий знос за технічними умовами; v - інтенсивність (швидкість) зношування.

Такий підхід дозволяє розглядати надійність не як статичну величину, а як функцію часу, що залежить від початкового «ресурсного об'єму» та стабільності триботехнічних характеристик системи протягом експлуатації.

2. Положення про технологічну спадковість.

Це фундаментальне положення стверджує, що надійність деталі закладається не лише на стадії конструювання, а й у процесі її технологічного виготовлення. Методи обробки металів різанням, технології зварювання, наплавлення та напилення, а також методи підвищення зносостійкості шляхом зміцнення поверхні й нанесення функціональних покриттів формують параметричний стан і трибоматеріалознавчі характеристики деталі [8,14].

Наприклад, залишкові напруження стиску $\sigma_{рез}$, сформовані внаслідок пластичної деформації (зокрема, обробки тиском або поверхневого зміцнення), можуть суттєво підвищувати опір втомному руйнуванню та зношуванню [13] за рахунок створення енергетичного бар'єру для зародження мікротріщин.

Формування в структурі надлишкових твердих фаз (карбідів, боридів, інтерметалідів, нітридів, карбонітридів та інших сполук) сприяє підвищенню зносостійкості від 3 до 10 разів залежно від їх морфології та розподілу. Інтегральна твердість HV такої гетерогенної структури може бути оцінена за правилом суміші:

$$HV_{сплаву} = \sum_{i=1}^n \frac{HV_{\mu i} \cdot F_i}{F}$$

де $HV_{\mu i}$ - мікротвердість i -ї фази (матриці або зміцнювача); F_i - площа, займана цією фазою на поверхні тертя; F - загальна площа контакту.

Крім того, утворення мартенситу деформації ($\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення), а також розвиток дисипативних (самоорганізованих) структур у поверхневих шарах під дією енергетичного впливу тертя можуть додатково підвищувати зносостійкість системи у 10-20 разів. Це явище базується на здатності поверхневого шару до інтенсивної дисипації підведеної механічної енергії без макроскопічного руйнування, що відповідає синергетичному підходу до надійності трибосистем.

3. Ресурсозбереження та циклічна економіка.

Сучасна концепція надійності передбачає врахування вимог ремонтпридатності та відновлюваності деталей ще на стадії проектування. Використання технологій вторинної переробки матеріалів і відновлення зношених елементів вимагає від інженера розуміння закономірностей зміни структури та властивостей матеріалу в процесі експлуатації і ремонту. У цьому контексті надійність розглядається як здатність конструкції зберігати функціональні та експлуатаційні параметри за умов багаторазових циклів відновлення.

Оптимізація строку служби деталей на основі технологій відновлювального наплавлення, сумарний ресурс виробу T_{Σ} з урахуванням n циклів відновлення визначається як:

$$T_{\Sigma} = T_n + \sum_{i=1}^n T_{e,i} \cdot K_i$$

де T_n - напрацювання нової деталі до першого граничного стану; $T_{e,i}$ - напрацювання після i -го відновлення; K_i - коефіцієнт збереження ресурсу ($0 < K_i \leq 1$), який

враховує деградацію структури основного металу та якість сформованого зносостійкого шару.

Ефективність стратегії відновлення за критерієм надійності оцінюється через коефіцієнт технічного використання $K_{тв}$:

$$K_{тв} = \frac{T_{\Sigma}}{T_{\Sigma} + \sum t_{рем} + \sum t_{обс}}$$

де $t_{рем}$ - час на проведення відновлювальних робіт; $t_{обс}$ - час на технічне обслуговування.

Використання методів зносостійкого наплавлення та зміцнення поверхонь тертя при відновленні дозволяє не лише повернути геометричні розміри, а й сформувати в робочому шарі гетерогенні структури (карбіди, бориди), що забезпечують підвищення експлуатаційної стійкості у 1.5-2.5 рази порівняно з базовими показниками нових деталей.

Висновки. Проблема підготовки інженерних кадрів у галузі механіки вимагає переходу від вивчення окремих технологічних операцій до системного розуміння надійності як комплексної властивості виробу.

Наукова методологія аналізу надійності в умовах зношування має базуватися на інтеграції стохастичних моделей із фізико-механічними закономірностями трибоматеріалознавчої взаємодії.

Розробка та впровадження дисципліни «Основи надійності деталей машин при зношуванні» дозволить підготувати спеціалістів, здатних вирішувати задачі економії ресурсів та забезпечувати безаварійну роботу складних технічних систем у сучасних економічних умовах.

Перелік посилань

1. Попов С. М., Антонюк Д. А., Нетребко В. В. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні: Навчальний посібник. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. - 368 с. (Стор. 9, 11, 12, 104, 156, 161, 162, 164, 368).
2. Frolov, M.; Tanchenko, S.; Ohluzdina, L. Parameter estimation of the Weibull distribution in modeling the reliability of technical objects // Journal of Engineering Sciences (Ukraine), 2024, 11(1), A1-A10. DOI: 10.21272/jes.2024.11(1).a1.
3. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: Weibull Distribution.
4. Malinovskiy, Yu. O.; Ilina, O. A.; et al. Self-organization of the tribosystem under non-stationary conditions of friction // Problems of Tribology, 2024, 29(3/113), 15-23. DOI: 10.31891/2079-1372-2024-113-3-15-23.
5. Ilina, O. A.; Mikosianchyk, O. O.; et al. Mechanisms of formation of wear-resistant dissipative structures in non-stationary lubrication conditions // Problems of Tribology, 2023, 28(3/109), 49-55. DOI: 10.31891/2079-1372-2023-109-3-49-55.
6. Попов С.М., Лаптева Г.М., Гребешков М.О., Капустян О.Є. Наукові задачі трибоматеріалознавства при аналізі трибосистем // Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 30 / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, ПДТУ, 2025. – С. 45-54 DOI: 10.31498/2522-9990302025347048.
7. Al-Quraan, T. M. A.; et al. Dynamic processes of self-organization in non-stationary conditions of friction // Advances in Tribology, 2023, Article ID 6676706. DOI: 10.1155/2023/6676706.
8. Wang, X.; et al. A Review on Tribological Wear and Corrosion Resistance of Surface Coatings on Steel Substrates // Coatings, 2025, 15, 1314. DOI: 10.3390/coatings15111314.