

УДК 656.13

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ КОМБІНАЦІЙ МЕТОДІВ ЗМІЦНЕННЯ ДЛЯ РІЗНИХ ТИПІВ ДЕТАЛЕЙ З РІЗНИМ МЕХАНІЗМОМ ЗНОШУВАННЯ

В.М. Чумак, асп.,

Є.В. Манько, асп.,

В.В. Аулін, проф., д-р. техн. наук,

С.В. Лисенко, доц., канд. техн. наук,

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький

У рамках дослідження розглядаються вісім типів ресурсовизначальних деталей автомобільної та сільськогосподарської техніки, які характеризуються різними домінуючими механізмами зношування, матеріалами та умовами експлуатації. Вибір цих деталей обумовлений їх критичним впливом на загальну надійність техніки та необхідністю охоплення основних типів зношування: абразивного, втомного, корозійно-механічного та абразивно-ґрунтового.

Для кожного типу деталі розглядаються три категорії методів зміцнення: термообробка (5 методів), покриття (4 методи) та комбіновані технології (5 методів). Кожен метод характеризується набором керуваних параметрів, що формують простір оптимізації.

Запропонована система складається з двох ключових модулів: прямої нейромережевої моделі прогнозування зносу та оптимізаційного модуля на базі генетичного алгоритму.

Архітектура прямої моделі розширює підхід, шляхом додавання параметрів зміцнення до вхідного простору. Модель приймає 24 вхідних параметри, що поділяються на три групи: група 1 - параметри УОД деталі (12 параметрів); група 2 - параметри термообробки (6 параметрів); група 3 - параметри покриття (6 параметрів).

Топологія мережі оптимізована для розширеного вхідного простору:

– вхідний шар: 24 нейрони;

– перший прихований шар: 256 нейронів з функцією активації ReLU;

– другий прихований шар: 128 нейронів з функцією активації ReLU;

– третій прихований шар: 64 нейрони з функцією активації ReLU;

– четвертий прихований шар: 32 нейрони з функцією активації ReLU;

– вихідний шар: 2 нейрони з лінійною активацією (інтенсивність зносу та залишковий ресурс).

Пакетна нормалізація (BatchNorm) та Dropout з коефіцієнтом 0,3 застосовуються після кожного прихованого шару. Оптимізатор Adam зі швидкістю навчання 3×10^{-4} та розміром батчу 256 зразків. Загальна кількість параметрів моделі складає приблизно 45 000, що забезпечує достатню ємність при збереженні обчислювальної ефективності.

Параметри генетичного алгоритму: розмір множини рішень-кандидатів – 200, кількість ітерацій – 500, ймовірність мутації - 0,05, ймовірність кросовера – 0,8, турнірна селекція з розміром турніру 3.

Обмеження оптимізації включають: технологічну сумісність (не всі комбінації термообробки та покриття є технологічно можливими); температурні обмеження (температура нанесення покриття не повинна перевищувати температуру відпуску загартованого шару); мінімальна адгезія покриття ≥ 20 Н.

Датасет обсягом 40000 зразків сформовано з двох джерел:

1. Синтетичні дані з підвищеною точністю (20 000 зразків) - згенеровані для імітації

умов реальних лабораторних випробувань. Параметри зміцнення та характеристики деталей обирались у вузьких, технологічно обґрунтованих діапазонах, що відповідають типовим промисловим режимам. Стохастична компонента з коефіцієнтом варіації 5...10% відображає реалістичний розкид результатів.

2. Синтетичні дані з розширеним охопленням (20000 зразків) – згенеровані з ширшим діапазоном параметрів для дослідження всього простору можливих рішень на основі каліброваних фізичних моделей зношування: модифікована модель Арчарда для абразивного зношування, модель Пальмгрена-Майнера для втомного, комбінована модель для корозійно-механічного та кастомізована модель для абразивно-грунтового зношування. Параметри зміцнення інтегровані через модифікацію коефіцієнтів зношування:

$$K_{eff} = K_{base} \cdot \alpha_{HT}(T, t, d) \cdot \alpha_{coat}(h, H_c, \mu_c) \quad (2)$$

де K_{base} – базовий коефіцієнт зношування без зміцнення; α_{HT} – поправочний коефіцієнт термообробки, що залежить від температури T , тривалості t та глибини зміцненого шару d ; α_{coat} – поправочний коефіцієнт покриття, що залежить від товщини h , твердості H_c та коефіцієнта тертя μ_c покриття.

Коефіцієнти α_{HT} α_{coat} визначені на основі фізичних закономірностей зміцнення та мають значення в діапазоні 0,05...1,0 (де менше значення відповідає більшому ефекту зміцнення). Стохастична компонента з коефіцієнтом варіації 10...20% додана для відображення реальної варіабельності результатів зміцнення.

Розподіл датасету: навчальна вибірка - 70% (28 000 зразків), валідаційна – 15% (6000 зразків), тестова – 15% (6000 зразків).

Навчання прямої MLP-моделі проведено протягом 85 епох з ранньою зупинкою (patience = 20). Динаміка навчання демонструє стабільну збіжність без ознак перенавчання завдяки застосуванню BatchNorm та Dropout.

Найвищу точність прогнозування отримано для гільз циліндрів ($R^2 = 0,9683$) та поршневих кілець ($R^2 = 0,9665$), що пояснюється більш стабільними умовами експлуатації автомобільних деталей. Для більшості деталей сільськогосподарської техніки MAPE знаходиться в діапазоні 5...7%, що є прийнятним для прогностичних задач такого класу. Виняток становлять підшипники кочення ($R^2 = 0,3284$, MAPE = 21,55%), що свідчить про значну нелінійність та варіабельність їх поведінки в умовах синтетично розширеного простору параметрів і вказує на необхідність додаткового збору реальних даних для цього типу деталей.

Оптимізаційний модуль NSGA-II з множиною 200 рішень-кандидатів протягом 500 ітерацій визначив оптимальні комбінації зміцнення для кожного типу деталі.

Результати демонструють, що оптимальні комбіновані методи зміцнення забезпечують суттєво більший приріст ресурсу, ніж окремі методи. Для автомобільних деталей приріст ресурсу становить 143...195%, а для деталей сільськогосподарської техніки – 166...196%. Варто зазначити, що для підшипників кочення покриття (6289 год) поступається базовому ресурсу (8000 год) при ізольованому застосуванні, проте комбінований підхід забезпечує суттєве підвищення до 19475 год (+143%).

«Синергетичний ефект» відображає додатковий приріст ресурсу від комбінації порівняно з сумою окремих ефектів термообробки та покриття. Для більшості деталей домінуючим методом термообробки є азотування при 500°C, тоді як оптимальний тип покриття варіюється: PVD для автомобільних деталей та деталей з низькоабразивними умовами, борування - для деталей з інтенсивним зношуванням. Найвищий синергетичний ефект (+50%) спостерігається для шестерень КП, підшипників кочення та гільз циліндрів, найнижчий (+6%) – для культиваторних лап.

Для кожного типу деталі побудовано Парето-фронт у просторі «прогнозований

ресурс-вартість зміцнення». Аналіз Парето-фронтів дозволив виділити три характерні зони рішень:

Зона 1 (економічна) – бюджетні рішення з помірним ефектом: переважно лише термообробка (гартування або нормалізація), приріст ресурсу 30...60%, відносна вартість 0,8...1,5. Рекомендовано для масового виробництва з обмеженим бюджетом.

Зона 2 (оптимальна) – збалансовані рішення: комбінації «термообробка + недороге покриття» (борування, наплавлення), приріст ресурсу 80...150%, відносна вартість 2,0...3,5. Найкраще співвідношення ціна/ефективність для більшості застосувань.

Зона 3 (преміальна) - максимальний ефект: комбінації з PVD/HVOF покриттями, приріст ресурсу 150...210%, відносна вартість 4,0...5,5. Доцільно для критичних вузлів з високою вартістю простою.

Список використаних джерел

1. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. 2014. 370 с.
2. Аулін В.В., Лізунов С.М., Бобрицький В.М. Залежність інтенсивності зношування деталей від технологічних факторів лазерної обробки. Вісник ХДГУСГ. 2003. С.101-105.
3. Аулін В.В. До дослідження процесів тертя та зношування конструкційних матеріалів триботехнічного призначення. Зб. наук. праць КДТУ "Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація". Вип.14. 2004. С.221-216.
4. Аулін В.В. Напрямки побудови фізико-математичних моделей процесів тертя та зношування в машинах. Вісник Харківського нац. техн. університету с/г. Вип. 40. Техн. сервіс АПК, техніка та техн. у с/г машинобудуванні. Харків. 2005. С.349-354.
5. Аулін В.В. Зносостійкість гетерогенних композиційних матеріалів та покриттів в умовах абразивного зношування. Праці Таврійської держ. агротехн. академії. Вип.39. Мелітополь, ТДАТА, 2006. С.38-43.
6. Аулін В.В., Кузик О.В., Тихий А.А., Лисенко С.В., Жилова І.В. Механізми внутрішнього та зовнішнього тертя та їх вплив на процеси зношування трибоспряження деталей машин. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 10(41), ч.І. С.250-260.
7. Аулін, Лисенко С.В., Жилова І.В., Грачов Т.А. Управління процесами тертя та зношування деталей за допомогою нанесення багатокомпонентних та багатошарових покриттів. Матеріали Іої Міжнародної науково-практичної конференції "Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability", 17-19 квітня 2019 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2019. С.50-52.
8. Аулін В.В., Деркач О.Д., Макаренко Д.О., Гриньків А.В. Вплив режимів експлуатації на зношування деталей, виготовлених з полімерно-композитного матеріалу. Проблеми трибології (Problems of tribology). Хмельницький. ХНУ, 2018. №4. С.65-69.
9. Аулін В.В., Жилова І.В., Лисенко С.В. Мезомеханіка – сучасний підхід до теорії зношування. Зб. тез доповідей XII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Підвищення надійності машин і обладнання». Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 75-77.
10. Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В., Жилова І.В. Фізико-мезомеханічний підхід до виявлення характеру зношування спряжень деталей сільськогосподарської і автотранспортної техніки. Проблеми трибології (Problems of tribology). Хмельницький. ХНУ, 2017. №4. С.82-86.
11. Аулін В.В. Рівняння стану елементів трибосистем та режими їх зношування. Зб. тез матеріалів міжнар. наук.-практ. конф. "Трибологія, енерго- та ресурсозбереження" яка проводилась в рамках "Ольвійського форуму - 2015", 3-6 червня 2015, Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. С.9-11.
12. Манько Є. В., Чумак В. М., Аулін В. В., Тихий А. А. Механізми зміцнення матеріалів деталей машин та розробка комбінованих технологій на основі лазерного легування. Зб. тез доповідей XII Міжнар. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання» 20-21 лют. 2025 р., м. Київ / МОН України, НУБіП. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2025. С.467-469.
13. Аулін В.В., Кузик О.В. Особливості контактної взаємодії деталей, зміцнених композиційними матеріалами. Матеріали X Міжнар. наук.-практичної конференції. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с.-г. техніки. Кіровоград: КНТУ, 2015. С.153-154.
14. Аулін В.В., Лисенко С.В. Триботехнології відновлення спряжень деталей дизелів транспортних засобів та керування процесами зміцнення їх робочих поверхонь. Матеріали VIII міжн. наук.-практ. конф. "Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту", 19-21 жовтня 2015 року: зб. наук. праць. Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та ін.]. Вінниця: ВНТУ, 2015. С. 24-27.