УДК 621.9.048.7:004.8:004.94

Ковалевський С.В., докт. техн. наук, професор
Донбаська державна машинобудівна академія, м.Краматорськ, kovalevskii61@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖНИХ МОДЕЛЕЙ

В умовах ресурсообмеженого виробництва, зростання вартості нових вузлів і запчастин, а також необхідності забезпечення надійності машинобудівної техніки у складних та часто нестабільних експлуатаційних умовах, ремонтне виробництво перетворюється з допоміжної функції на стратегічно важливу ланку інженерної інфраструктури. Одним із ключових завдань у цій сфері є ефективне відновлення функціонально навантажених робочих поверхонь відповідальних деталей машин – зокрема, зносостійких зон, які безпосередньо визначають надійність та довговічність всього технічного вузла [1]. Значна частина аварій та відмов у складних механізмах виникає саме внаслідок порушень у функціонуванні поверхневого шару деталей машин, де накопичуються пошкодження, тріщини втоми, залишкові напруження й інші дефекти.

Сучасний спектр методів відновлення включає як традиційні технології (наплавлення, металізацію, механічне відновлення), так і високотехнологічні процеси: лазерне легування, електронно-променеву обробку, газодинамічне напилення, гібридні методи з наноармуванням, тощо. Вибір між ними визначається великою кількістю взаємозалежних чинників, серед яких: морфологія ушкоджень, фізико-механічні характеристики матеріалів основи та шару, умови теплового впливу, сумісність із геометрією деталі, ресурсоємність та економічна доцільність. Проте в більшості підприємств процес вибору методу відновлення залишається неформалізованим, здійснюється за інтуїтивною оцінкою спеціалістів або загальними табличними рекомендаціями, які не враховують специфіку реального пошкодження.

У цьому контексті є потреба у створенні сучасних інтелектуалізованих інструментів, здатних здійснювати обґрунтований і адаптивний вибір оптимального методу відновлення. У роботі запропоновано архітектуру інтелектуальної системи, яка базується на поєднанні глибоких нейромережних моделей, методів системного аналізу, багатовимірної класифікації та еволюційної оптимізації. Ключова ідея полягає в автоматичному співставленні параметрів ушкодження й експлуатаційних вимог до деталі з базою відомих технологічних рішень, структурованою у формі багатовимірного простору ознак. Такий підхід дозволяє враховувати сотні параметрів, адаптуватись до нових умов і забезпечити високу точність вибору з мінімальним впливом людського фактора.

Основу запропонованої методології складає ієрархічне моделювання зв’язку між зносом, властивостями відновленого шару та залишковим ресурсом. Для представлення методу відновлення використовується векторна модель у n-вимірному параметричному просторі:

$$\vec{\mathbf{X}} = \{x_1, x_2, ..., x_n\}, x_i \in R, \quad (1)$$

де x_i - нормалізовані значення таких параметрів, як: товщина шару, мікротвердість, енерговитрати, ступінь адгезії, градієнт твердості, термічна дія, тощо (кожен метод відновлення розглядається як точка у цьому просторі).

В системі передбачено багаторівневу архітектуру: SOM (Self-Organizing Maps) – для кластеризації технологій за ефективністю; CNN (Convolutional Neural Networks) – для аналізу мікроструктур; RNN (Recurrent Neural Networks) – для аналізу послідовності технологічних операцій; MLP (Multi-Layer Perceptron) – для інтегрованого прогнозу

ресурсу. Оптимізація архітектури нейромереж реалізується за допомогою генетичних алгоритмів. Адаптивна структура забезпечує навчання системи на основі накопичених виробничих кейсів.

Система була апробована на реальних даних з більш 150 кейсів відновлення 5 типів деталей: вали, підшипники, корпусні частини, зубчасті колеса, плунжери. Порівняльний аналіз показав, що застосування інтелектуальної класифікації: знижує інтенсивність зносу на 18–42% порівняно з експертною та критеріальною моделями; покращує корозійну стійкість на 15–35%; скорочує час підготовки ремонтного рішення у 2–3,5 рази; підвищує точність класифікації до 94,3%.

Програмна реалізація інтелектуальної системи класифікації включає 5 основних модулів: 1 – вхідний блок – отримання даних про ушкодження, умови експлуатації, тип деталі; 2 – нейромережний модуль – класифікація та прогноз на основі глибокого навчання; 3 – модуль технологічного проектування – формування технологічного маршруту; 4 – Модуль інтеграції – обмін з CAD/PLM/ERP-системами та цифровими двійниками; 5 – Аналітичний модуль – візуалізація рекомендацій, звіти, what-if сценарії.

Таблиця 1 – Ключові результати порівняльного аналізу

Критерій	Інтелектуальна система	Експертна	Статистична
Точність класифікації (%)	94.3	82.7	78.9
Повнота (%)	91.8	75.4	83.2
F1-метрика	93.0	78.9	81.0
Час прийняття рішення (с)	1.2	4.5	2.8
Адаптивність	Висока	Низька	Середня

Запропонована інтелектуальна система дозволяє автоматизувати класифікацію та вибір технологій відновлення, підвищити обґрунтованість рішень, інтегрувати досвід експлуатації з цифровими технологіями обробки та управління життєвим циклом. Це відкриває шлях до створення цифрових профілів ремонтованих деталей, накопичення знань у вигляді тренувальних вибірок для ШІ, зниження впливу людського чинника та підвищення стійкості технічних систем у складних умовах.

Принциповою особливістю системи є можливість реалізації адаптивного контуру зворотного зв’язку, за якого параметри класифікаційної моделі можуть коригуватися на основі результатів реального технологічного процесу. Це означає, що при зміні типу зносу, матеріалу або умов ремонту система не потребує повного перенавчання, а лише оновлює локальні вагові коефіцієнти відповідно до нових прикладів. Такий підхід підвищує життєстійкість і переносимість системи між різними виробничими умовами.

Суттєвою перевагою розробленої моделі є також можливість її поетапної інтеграції у цифрову інфраструктуру ремонтного підприємства. Це охоплює такі приклади як підключення до діагностичних систем для автоматичного отримання інформації про ушкодження, використання CAD-даних для аналізу геометрії відновлюваної поверхні, формування цифрових паспортів відновлених деталей з накопиченням історії ремонту, підтримка рішень на етапі технічної експертизи. Реалізація системи на базі архітектури клієнт-сервер дозволяє забезпечити одночасний доступ декількох фахівців – технологів, ремонтників, конструкторів – до єдиної бази рішень. Візуалізаційна панель системи підтримує інтерактивне порівняння альтернативних методів відновлення із урахуванням вартості, часу, устаткування, впливу на ресурс та ризиків дефектів.

Таким чином, запропонована система забезпечує високу якість технічної підготовки ремонту, зменшує собівартість відновлення та сприяє цифровій трансформації ремонтного виробництва. Це особливо актуально в умовах обмеженого доступу до імпортних запасних

частин, зростання потреби в локалізації відновлювальних процесів та підвищених вимог до якості експлуатації машин в екстремальних умовах.

Список посилань

1. Algamal A., Abedi H., Gandhi U., Benafan O., Elahinia M., Qattawi A. Manufacturing, processing, applications, and advancements of Fe-based shape memory alloys // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 1010. – Article 177068. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177068.

УДК 621.941-229.3:531.133

Покатов Р.О., аспірант
Національний університет «Запорізька політехніка», romansmail99s@gmail.com

ВИБІР МЕТОДІВ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ РОБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ТУРБОРЕАКТИВНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Одним із методів фінішної обробки є віброобробка, яку можна розділити на віброабразивну та на віброобробку кульками.

З умови того, що лопатки працюють у середовищі високих динамічних, термічних та статичних навантажень, ця деталь впливає на ресурс та надійність двигуна [1].

Віброобробка на фінішній стадії виготовлення є одним із основних факторів загального технологічного забезпечення у виробництві лопатки.

Даний метод істотно впливає на стан поверхневого шару деталі, від якого залежить ступінь опору втоми і величина межі витривалості.

Такі фактори, як індикатори залишкової напруги, мікрорельєф та структура поверхні є основними.

Цей етап віброабразивної обробки знаходиться на фініші механообробки та є завершальною стадією.

Суть процесу віброабразивної обробки полягає у розміщенні лопатки в контейнері, у спеціальній вібромашині, яка генерує необхідну частоту та величину амплітуди коливань наповнювача (робочих тіл), таких як скляні або металеві кульки, кераміка та інше.

Реалізація ефективності віброобробки значно ускладнюється зі збільшенням розміру лопатки, так як з його збільшенням збільшується і вага контейнера з робочим середовищем.

Виходячи із завдань щодо забезпечення необхідної точності форми поверхні та надання необхідних властивостей поверхневому шару, широке застосування отримала віброобробка кульками.

Основним чинником визначальним ефективність цього методу є тривалість обробки.

Суть віброголтівки полягає в перерозподілі залишкових напруг та збільшенні рівня та глибини залягання стискаючих напруг.

В результаті дослідного дослідження було виявлено, що ці параметри із збільшенням тривалості процесу віброголівки змінюються до певної межі.

Межа тривалості для кожного сплаву є індивідуальною і тільки в результаті та за підсумками віброоборбортки, після вимірювання таких величин, як мікротвердість, рівень залишкових напруг і межу витривалості можна визначити оптимальний режим для кожного сплаву індивідуально.

Список посилань

1. Яценко В.К., Прітченко В.Ф. Технологічне забезпечення та прогнозування несучої здатності деталей ГТД – с. 6-36

2. Кореневській Є.Я., Яценко В.К.,Хуповка В.П. Оцінка ефективності зміцнення вібро- та гідрогалтовкой лопаток компресора зі сталі 14Х17Н2 – с. 22-23