

Діагностика технічного стану і прогнозування безаварійно гарантованого напрацювання зубчастих коліс важко навантажених машин

Гайдамака А. В.¹, Музикін Ю. Д.¹, Клітної В. В.¹

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», України

Анотація. У статті проаналізовано умови роботи зубчастих передач важко навантажених машин. Дано огляд сучасних підходів в оцінці технічного стану зубчастих коліс за рівнем накопичених втомних пошкоджень в процесі експлуатації. В ході аналізу сучасної технічної літератури встановлено два перспективних способи діагностики технічних об'єктів за рівнем накопичених втомних пошкоджень в експлуатації, а саме діагностика за твердістю металу і діагностика за параметрами магнітної петлі гістерезису. Розроблено алгоритм проведення діагностики технічного стану і прогнозування безаварійно гарантованого напрацювання зубчастих коліс важко навантажених машин, в основу якого покладені запропонована процедура діагностики за вимірюванням твердості металу, яка включає п'ять основних етапів: вибір прибору; вибір схеми вимірювань; вибір числа замірів, кількості і взаємного розташування точок вимірювання; розробку конструкції шаблону для вимірювань; розробку пристосування для кріплення шаблонів і методика прогнозування з урахуванням стадій припрацювання і стабільних за лінійною функцією накопичення пошкоджень в експлуатації.

Ключові слова: діагностика, технічний стан, прогнозування, гарантоване напрацювання, зубчасте колесо, втомні пошкодження.

Вступ

В цій статті висвітлено сучасний стан з діагностики зубчастих коліс за рівнем накопичених втомних пошкоджень в процесі їх експлуатації. Це відносно новий напрям діагностики зубчастих коліс важко навантажених машин, наприклад автомобільної, гірничорудної та металургійної промисловості. За вказаною темою існує відносно невелика кількість публікацій через поширеність інших достатньо розвинутих напрямків діагностики технічного стану, призначених для пари або групи зубчастих коліс (редукторів, трансмісій). Разом з тим, узагальнення відомої і дуже обмеженої інформації щодо визначення технічного стану окремих зубчастих коліс важко навантажених машин, особливо з великими модулями ($m > 20$ мм), дозволяє намітити перспективи розвитку і впровадження такої діагностики технічного стану зубчастих коліс безпосередньо в процесі експлуатації.

Аналіз публікацій

Зубчасті колеса редукторів важко навантажених машин, наприклад бортова коробка передач танка на максимальних потужностях або привод валків прокатних станів у звичайному режимі працюють зі значними короткочасними перевантаженнями, у середовищі підвищеної вібрації та температури часті з недостатнім змащенням і низьким рівнем повітряної та гідравлічної фільтрації [1–7]. Це спричиняє передчасну появу втомного викришування робочих поверхонь зубців коліс редукторів та втомне їх руйнування. В умовах відсутності інформації щодо дійсного технічного стану зубчастих коліс вказаних редукторів, з метою виключення аварійної поломки, їх заміна виконується по закінченню заданого строку експлуатації. Підвищення ефективності виробництва можливе при переході від планово-попереджувального обслуговування редукторів до обслуговування за дійсним технічним станом. Отже постає необхідність науково обґрунтованого визна-

чення технічного стану і прогнозування безаварійно гарантованого напрацювання зубчастих коліс важко навантажених машин.

Технічний стан машин в експлуатації визначається на основі знання інформативного параметру технічного стану (ПТС), критерію граничного стану об'єкту і результатів періодичного чи безперервного контролю ПТС. При оцінці технічного стану зубчастих передач широко розповсюджені такі діагностичні параметри як: інтенсивність зміни температури, кінематична похибка передач, віброакустичні сигнали [8–14].

Реєстрація зміни температури зубчастого зачеплення [9], як інтегральний спосіб оцінки технічного рівня вказує лише на погіршення умов роботи без встановлення конкретної причини. Тому цей метод діагностики мало ефективний.

Метод оцінки технічного стану зубчастих передач [10], що базується на аналізі характеру зміни кінематичної похибки передач, дозволяє виявляти одиничні дефекти зубців, оцінювати нерівномірність зносу як пари, так і багатоступеневого зачеплення.

Віброакустичний метод [13, 14] найбільш розвинутий і інформативний. В дослідженнях виділяють чотири основних параметри вібрації редуктора, кожному з яких відповідає певний вид пошкодження – викришування, тріщини, сколювання, полонка.

Загальним недоліком двох останніх методів діагностики зубчастих передач є залежність точності оцінки технічного стану від кваліфікації діагноста, його знань про особливості конструкції і функціонування, а також природи вібраційних процесів. При цьому аналіз та інтерпретація віброакустичних сигналів має велику долю суб'єктивізму в розшифровці типу дефекту і його кількісної оцінки. Крім того, кожен з вищевказаних методів дає інтегральну оцінку для групи коліс і не дозволяє виявити технічний стан окремого зубчастого колеса, оцінити знос чи викришування його зубців.

У зв'язку з вищевказаним, останнім часом з'явилися напрямки діагностики окремих технічних об'єктів за рівнем накопичених втомних пошкоджень в експлуатації [15, 16]. Найбільш актуальними в рамках проблематики, що розглядається бачаться напрямки діагностики за твердістю металу [17–20], за параметрами деформаційної [18, 21, 22] та магнітної петель гістерезису [23–26].

Зміна властивостей поверхневих шарів металу зубчастих коліс в експлуатації може

бути узагальненим діагностичним критерієм. Вимірюючи в процесі планово-переджувальних робіт, наприклад твердість металу зубців в зонах можливого руйнування, і порівнюючи отримані значення з гранично досягнутою твердістю дефектного колеса, оцінюють його технічний стан [17]. Однак при застосуванні напрямку діагностики за твердістю металу як діагностичного інструменту для вимірювань на місці треба враховувати, що, як відомо, явище втоми є чутливим щодо вм'ятин або інших розривів матеріалу, які спричиняють концентрації напружень, і можуть утворюватись при вимірюванні твердості. Використання сучасних приладів для замірів нівелює зазначені недоліки методу, таким чином, можна стверджувати, що метод можна вважати неруйнівним. Крім того в роботі [27] уточнюють, що оскільки полірування зразка, пошкодженого втомлюванням, частково, якщо не повністю, видаляє поверхневі зерна, загартовані деформацією, тому, за можливості, зразки повинні бути відшліфовані електрохімічним методом, це слід виконати перед проведенням циклічної обробки. Врахувавши зазначені вимоги при проведенні замірів твердості слід зазначити дуже гарну кореляцію результатів замірів з процесом втомного руйнування [18]. Технічний стан деталі, згідно з патентом [21], можна визначити і за коефіцієнтом внутрішнього розсіювання енергії дослідного об'єкту шляхом вимірювання коерцитивної сили – інформативної характеристики гістерезисних властивостей металу. Коефіцієнт внутрішнього розсіювання енергії деталі порівнюють з даними експериментальної кривої, раніше отриманої для аналогічної деталі зі 100% ресурсом, після чого визначають безаварійно гарантоване напрацювання деталі.

Метод визначення залишкової намагніченості металу деталі базується на тісній кореляційній залежності між структурно-чутливими магнітними параметрами металу і величиною механічного напруження. Залишковий ресурс металоконструкцій за результатами магнітного контролю визначають за попередньо встановленою експериментальною залежністю величини магнітного параметру від кількості циклів навантаження. Широко застосований магнітний параметр – коерцитивна сила має високу чутливість до зміни структури металу при навантаженні: приріст величини коерцитивної сили від вихідного положення до стану руйнування, залежно від марки матеріалу, сягає 100–400%.

При використанні зазначеного методу треба враховувати, що він працює тільки для феромагнітних матеріалів, також у роботі [28] прийшли до висновку, що параметри гістерезису зазвичай не демонструють значних змін до останніх 10–20% терміну служби при втомному руйнуванні, тобто використання методу за межею текучості потребує чутливого обладнання. Методом магнітної структуроскопії визначено залишковий ресурс багатьох металоконструкцій: баштових, козлових, мостових кранів, прокатних валків [29–31]. Нормативною базою цього методу є Міжнародний стандарт ISO 4301.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розробка алгоритму проведення діагностики технічного стану і прогнозування безаварійно гарантованого напрацювання зубчастих коліс важко навантажених машин.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

- розробити процедуру діагностики технічного стану за результатами визначення рівня накопичених втомних пошкоджень в експлуатації;
- вибрати методику прогнозування безаварійно гарантованого напрацювання.

Процедура та методика прогнозування безаварійного-гарантованого напрацювання зубчастих коліс

В цій частині роботи показано розвиток способу діагностики зубчастих коліс за вимірюванням твердості металу поверхневих шарів у зонах, де можливі вогнища руйнування. В публікації [17] вказано зони вимірювання твердості зубця, які розташовано в межах його торцевої поверхні. Однак при цьому відсутні рекомендації відносно числа дослідів, кількості і взаємного розташування точок вимірювання. Від числа дослідів по заміру твердості металу за весь період напрацювання аж до граничного стану появи втомних руйнувань в околиці ділильного діаметру (рис. 1, зона 1) чи втомних руйнувань у ніжці зубця (рис. 1, зона 2) залежить точність побудови функції вичерпання ресурсу. Припустивши, що вичерпання ресурсу зубчастого колеса являє собою функцію, яка не зростає, можна обмежитися мінімальними (п'ятьма) дослідями, що визначають будь-яку криву другого порядку.

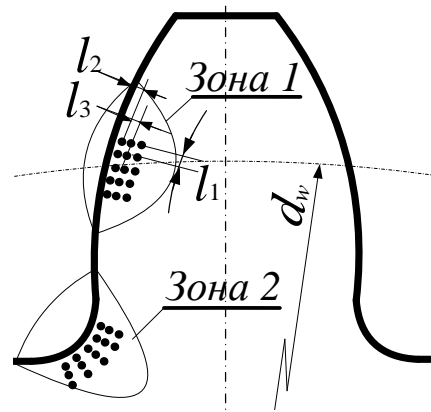


Рис. 1. Торць зубця з зонами вимірювання твердості

Якщо є нехарактерні значення твердості окремих точок, необхідно провести додаткові вимірювання близько від попередніх, оскільки можуть бути не тільки помилки вимірювань, але і неоднорідність металу. Тому кількість точок вимірювань в кожному досліді відповідно до рекомендацій [17] повинно бути не менше трьох...п'яти.

Взаємне розташування точок вимірювань у кожному досліді визначається метою дослідження, методом вимірювання та типом твердоміра. При вимірюванні твердості відстань від краю робочої поверхні зубчастого колеса до центру першого відбитку індентора твердоміра, а також між сусідніми відбитками повинно бути не менше трьох діаметрів відбитків. Збільшення відстаней між точками вимірювань погіршує точність оцінки технічного стану і утруднює прогнозування залишкового ресурсу зубчастого колеса. Усі перераховані вимоги до визначення твердості у локальних зонах зубців захищені патентом [32], який забезпечує необхідну точність діагностики і визначення безаварійно гарантованого напрацювання зубчастих коліс.

Жорсткі вимоги до відстаней між точками вимірювань потребують використання спеціальних шаблонів з можливістю їх одноманітного центрування і закріплення на зубчастому колесі під час дослідів.

Вимірювання твердості зубців можуть бути проведені і на робочих поверхнях зубців – навколо полюсної зони і біля кореня зуба.

Отже, процедура діагностики технічного стану зубчастих коліс за вимірюванням твердості металу повинна включати наступні основні етапи:

1. вибір прибору – портативного твердоміра;
2. вибір схеми вимірювань – з торця чи робочої поверхні зубця;

3. вибір числа дослідів, кількості і взаємного розташування точок вимірювання;

4. розробка конструкції шаблону для вимірювань в зонах можливих руйнувань зубців;

5. розробка пристосування для кріплення шаблонів.

Прогнозування безаварійного гарантованого напрацювання зубчастих коліс за результатами діагностики їх технічного стану виконується за рекомендаціями [33].

Безаварійне гарантоване напрацювання технічного об'єкту це напрацювання впродовж терміну, що забезпечує збереження параметрів нормативно-технічної документації. Прогнозування безаварійного гарантованого напрацювання можливе при наявності трьох умов – відомий ПТС, можливість періодичного (неперервного) контролю ПТС, наявність критерію граничного стану.

Прогнозування гарантованого напрацювання об'єкту звичайно здійснюють за схемою, що зображена на рис. 2.

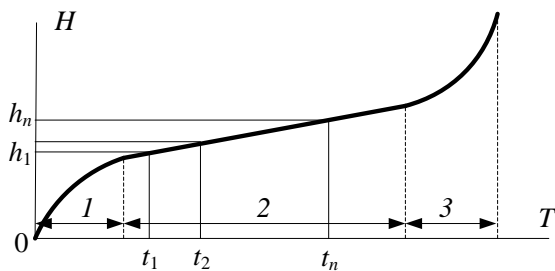


Рис. 2. Типова схема залежності величини (H) пошкоджень від терміну (T) експлуатації: 1 – припрацювання; 2 – стабільне накопичення пошкоджень; 3 – інтенсивне руйнування

Через певні періоди експлуатації t_1, t_2, \dots, t_n вимірюють максимальні величини пошкоджень (знос, деформація) h_1, h_2, \dots, h_n і екстраполюють залежність до гранично допустимої величини пошкодження h_n . Такий спосіб дозволяє отримати достатньо точну оцінку гарантованого напрацювання, якщо відома залежність $h(t)$.

В цій роботі прогнозування гарантованого напрацювання зубчастих коліс пропонується виконувати з урахуванням стадій припрацювання і стабільного накопичення пошкоджень (лінійна функція), оскільки колеса знімають з експлуатації завчасно до можливого їх руйнування. Припускаючи, що пошкодження (параметр контролю) в зубчастому колесі накопичуються монотонно за лінійною функцією, а їх дисперсія не змінюється,

при прогнозуванні гарантованого напрацювання використовують метод за стандартизованими нормами розрахунку. Введені припущення справедливі в тому випадку, коли параметр контролю підпорядковується нормальному закону розподілу. Останнє справедливе для пошкоджень зубців, які залежать від багатьох факторів. Причому вважається, що кожний з факторів має рівновеликий вплив на появу пошкоджень. Отже запропонований вид функції зміни параметра контролю цілком обґрунтований.

Лінійна функція зміни параметра контролю приймається у вигляді:

$$x(t) = c_1 + c_2 \cdot \tau, \quad (1)$$

де c_1, c_2 – коефіцієнти лінійної функції зміни параметра; $\tau = t_i - t_0$, $\tau \geq 0$, $t_0 \geq 0$ – початкове значення напрацювання.

Параметр призначення (наприклад пошкоджуваність) оцінюють по зміні параметру контролю за виразом:

$$y_i = x(t_i) + \xi_i, \quad i = 1 \dots N, \quad (2)$$

де t_i – значення напрацювання i -тий термін вимірювання, $t_0 \leq t_1 \leq t_2 \dots \leq t_N$, ξ_i – необмежена випадкова величина з дисперсією σ^2 , що симетрично розташована відносно нульового математичного очікування або симетрично розподілена обмежена випадкова величина, для якої при всіх значеннях напрацювання виконується умова:

$$-\xi \leq \xi(t) \leq \xi, \quad 0 \leq \xi \leq \infty. \quad (3)$$

При цьому число вимірювань вибирають за умови $N \geq 2m$, де m – кількість невідомих коефіцієнтів закону зміни параметра (рекомендується $N \geq 11$), а терміни вимірювань t_i – так, щоб випадкові величини ξ_i були практично незалежними.

Рекомендується наступний порядок прогнозування при N вимірюваннях величини y_i через довільні інтервали експлуатації:

1. Розраховують величини:

$$Y_1 = \sum_{i=1}^N y_i, Y_2 = \sum_{i=1}^N \tau_i \cdot y_i. \quad (4)$$

$$D = N \sum_{i=1}^N \tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N \tau_i \right)^2; \quad D_{11} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i^2}{D}; \quad (5)$$

$$D_{12} = D_{21} = -\frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{D}; \quad D_{22} = \frac{N}{D}.$$

2. Розраховують оцінки коефіцієнтів c_1, c_2 :

$$c_1 = Y_1 \cdot D_{11} + Y_2 \cdot D_{21}, \quad c_2 = Y_1 \cdot D_{12} + Y_2 \cdot D_{22}. \quad (6)$$

3. Розраховують оцінку середнього квадратичного відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - c_1 - c_2 \cdot t_i)^2 / (N - 2)}. \quad (7)$$

4. Розраховують середні квадратичні відхилення коефіцієнтів c_1, c_2 :

$$\sigma_1 = \sigma \sqrt{D_{11}}, \quad \sigma_2 = \sigma \sqrt{D_{22}}. \quad (8)$$

5. Розраховують гарантовані оцінки коефіцієнтів c_1, c_2 :

$$c_{1r} = c_1 \pm K \cdot \sigma_1; \quad (9)$$

$$c_{2r} = c_2 \pm K \cdot \sigma_2, \quad (10)$$

де $K = 1,282$ з довірчою ймовірністю $\gamma = 0,9$; $1,646$ ($\gamma = 0,95$); $2,32$ ($\gamma = 0,99$); (+) береться при збільшенні параметру призначення «пошкоджуваності», (-) при зменшенні.

6. Розраховують середнє (очікуване) безаварійне напрацювання:

$$T_\gamma = (Y_{гр} - c_{1r}) / c_2 - t_k, \quad (11)$$

де $Y_{гр}$ – граничне значення параметру призначення; t_k – напрацювання на момент останнього вимірювання.

7. Розраховують гарантоване безаварійне напрацювання:

$$T_\gamma = (Y_{гр} - c_{1r}) / c_{2r} - t_k. \quad (12)$$

Висновки

За аналізом технічної літератури встановлено два перспективні способи діагностики зубча-

стих коліс важко навантажених машин за рівнем накопичених втомних пошкоджень в експлуатації: за твердістю металу і за параметрами магнітної петлі гістерезису.

Розроблено процедуру діагностики технічного стану зубчастих коліс за вимірюванням твердості металу, яка включає п'ять основних етапів: вибір прибору; вибір схеми вимірювань; вибір числа замірів, кількості і взаємного розташування точок вимірювання; розробку конструкції шаблону для вимірювань; розробку пристосування для кріплення шаблонів.

Використання запропонованої методики прогнозування безаварійного гарантованого напрацювання зубчастих коліс з урахуванням стадій припрацювання і стабільного за лінійною функцією накопичення пошкоджень в експлуатації потребує мінімально можливих п'яти дослідів по трьом точкам вимірювань. В порівнянні з розвинутим віброакустичним методом, при використанні якого необхідна значна кількість датчиків, так в роботі [18], для виявлення пошкоджень застосовувалось 28 датчиків, для локалізації пошкодження вже знадобилися 72 датчики.

При визначенні безаварійного гарантованого напрацювання на основі декількох критеріїв граничного стану остаточне рішення приймається по тому критерію, який визначає мінімальний термін.

Подяка

Ця робота проводилась у рамках договору № БФ 1301 з Національним технічним університетом «Харківський політехнічний інститут» на виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки. Розробка методологій і шляхів підвищення технічного рівня деталей та вузлів машин важких режимів експлуатації», що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

- Гапонов, В. С., Музыкин, Ю. Д., Татьков, В. В., Путноки А. Ю., Войтович. А. И. (2013) Характеристики режима работы зубчатых передач прокатного стана 1680 ЦПТЛ металлургического комбината ОАО

- «Запорозжсталь». Вісник НТУ «ХП», № 42 (1015). С 42-48. Garonov V., Muzykin Y., Tatkov V., Putnoki A., Vojtovich. A. (2013) Charakteristiki rezhima raboty zubchatykh peredach prokatnogo stana 1680 CGPTL metallurgicheskogo kombinata OAO «Zaporozhstal». [Characteristics of the operating mode of the gears of the rolling mill 1680 TsGPTL metallurgical plant JSC «Zaporizhstal»]. Visnik NTU «HPI». [in Ukrainian].
2. Клітної, В. В., Клітної, В. В., Батрак, П. О. (2020). Оптимізація планетарної передачі бортового редуктора з використанням методу диференціальної еволюції. Автомобільний транспорт, (47). 15. С. 15-20. Klitnoy, V., Klitnoi, V., Batrak, P. (2020) Optimizaciya planetarnoi peredachi bortovogo reduktora z vikoristannyam metodu diferencialnoi evolyucii. [Optimization of planetary gear of onboard gear-box using the method of differential evolution]. Avtomobilnij transport. (47). 15. 15-20. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2020.47.0.15>
 3. Onishchenko, V. (2015). Investigation of tooth wears from scuffing of heavy duty machine spur gears. Mechanism and Machine Theory, Volume 83. P. 38-55. <https://doi.org/10.1115/1.802922.paper30>
 4. Крот, П. В. (2005) Проблемы управления технической эксплуатацией оборудования прокатных станов. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 10. С. 327-334. Krot, P. (2005) Problemy upravleniya tekhnicheskoy ekspluatatsiej oborudovaniya prokatnykh stanov. Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii. [Problems of managing the technical operation of rolling mill equipment]. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. 10. 327-334. [in Ukrainian].
 5. Крот, П. В. (2006) Анализ результатов исследований в области динамики и диагностики оборудования прокатных станов. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 12. С. 298-310. Krot, P. (2006) Analiz rezultatov issledovaniy v oblasti dinamiki i diagnostiki oborudovaniya prokatnykh stanov. [Analysis of research results in the field of dynamics and diagnostics of rolling mill equipment]. Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoj metallurgii. 12. 298-310. [in Ukrainian].
 6. Klitnoi, V., Gaydamaka, A. (2020) On the problem of vibration protection of rotor systems with elastic adaptive elements of quasi-zero stiffness. Diagnostyka, 21(2). P. 69-75. <https://doi.org/10.29354/diag/122533>
 7. Gaydamaka, A., Muzikin, Y., Klitnoi, V., Basova, Y., Dobrotvorskiy, S. (2021) Selecting the Method for Pre-tightening Threaded Connections of Heavy Engineering. International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE), P. 69-77. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_7
 8. Антипенко, Г. Л., Судакова, В. А., Шамбалова, М. Г. (2016) Оценка технического состояния зубчатых колёс по анализу кинематической погрешности передачи. Вестник Белорусского университета, 3(52). С. 6–18. Antipenko, G., Sudakova, V., Shambalova, M. (2016) Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya zubchatykh kolyos po analizu kinematischej pogreshnosti peredachi. [Assessment of the technical condition of gears by analyzing the kinematic error of transmission]. Vestnik Belorusskogo universiteta. 3(52). 6–18. [in Russian].
 9. Frini, M., Soualhi, A., El Badaoui, M. (2019) Gear faults diagnosis based on the geometric indicators of electrical signals in three-phase induction motors. Mechanism and Machine Theory, Volume 138. P. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.030>
 10. Yuejian, C., Stephan, S., P. Stephan, H., Ming, J. Z. (2021) A time series model-based method for gear tooth crack detection and severity assessment under random speed variation. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 156. 107605. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107605>
 11. Yuejian, C., Xihui, L., Ming, J. Z. (2020) An improved singular value decomposition-based method for gear tooth crack detection and severity assessment. Journal of Sound and Vibration, Volume 468. 115068. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115068>
 12. Ишин, Н. Н., Гоман, А. М., Скороходов, А. С., Натурьева, М. К. (2014) Оценка остаточного ресурса зубчатых передач в условиях эксплуатации. Неразрушающий контроль и диагностика, № 2. С. 2–6. Ishin, N., Goman, A., Skorohodov, A., Natur'eva, M. (2014) Ocenka ostatochnogo resursa zubchatykh peredach v usloviyah ekspluatatsii. [Estimation of the residual life of gears under operating conditions]. Nerazrushayushchij kontrol i diagnostika. 2. 2–6. [in Russian].
 13. Omar D. M., Matti R. (2020). Gear fault models and dynamics-based modelling for gear fault detection – a review. Engineering Failure Analysis, Vol. 117. 104798. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104798>
 14. Anil, K., Gandhi, C. P., Yuqing, Z., Rajesh, K., Jiawei, X. (2020) Latest developments in gear defect diagnosis and prognosis: A review. Measurement, Vol. 158. 107735. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107735>
 15. Yucesan, Y. A., Dourado, A., Viana, F. A. C. (2021) A survey of modeling for prognosis and health management of industrial equipment. Advanced Engineering Informatics, Volume 50.

101404.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101404>
16. Worden, K., Cross, E. J., Dervilis, N., Papatheou, E., Antoniadou, I. (2015) Structural health monitoring: from structures to systems-of-systems. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48. 21. P. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.497>
 17. Звонарев, И. Е., Иванов, С. Л., Шишлянников, Д. И., Фокин, А.С. (2014) Исследования поверхностной твёрдости металла в области повышенного износа и разрушения деталей горных машин. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, № 11. С. 67–76. Zvonarev, I., Ivanov, S., Shishlyannikov, D., Fokin, A. (2014) Issledovaniya poverhnostnoj tvordosti metalla v oblasti povyshennogo iznosa i razrusheniya detalej gornyh mashin. [Investigations of the surface hardness of metal in the area of increased wear and destruction of parts of mining machines]. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 11. 67–76. [in Russian].
 18. BJORHEIM, F., SIRIWARDANE, S. C., PAVLOU, D. (2022) A review of fatigue damage detection and measurement techniques. *International Journal of Fatigue*, Vol. 154. 106556. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106556>
 19. Drumond, G., Roudet, F., Chicot, D., Pinheiro, B., Pasqualino, I. (2021) A damage criterion to predict the fatigue life of steel pipelines based on indentation measurements. *J Offshore Mech Arct Eng*, 143(1). 011701. <https://doi.org/10.1115/1.4047203>
 20. Sulko, M., Chmelko, V., Кепка, М. (2017) Possibility of fatigue damage detection by non-destructive measurement of the surface hardness. *Procedia Structural Integrity*, 7. P. 262-267.
 21. Санкин, Ю. Н., Гурьянов, М.В. (2007) Способ неразрушающего контроля и прогнозирования ресурса деталей машин. Пат. 2305268 RU. G01N 3/32. заявл. 06.02.2006; опубл. 27.08.2007. № 2006103454/28. 4 с. Sankin, Y., Gur'yanov, M. (2006) Sposob nerazrushayushchego kontrolya i prognozirovaniya resursa detalej mashin. [Method of non-destructive testing and predicting the resource of machine parts]. Pat. 2305268 RU. [in Russian].
 22. Mocko, W., Grzywna, P., Kowalewski, Z. L., Radziejewska, J. (2016) An influence of cyclic loading on the form of constitutive relationship for DP500 steel. *Materials & Design*, Vol.103. P. 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.075>
 23. Горецкий, В. М., Дубов, А. А., Демин, Е. А. (2000) Исследование структурной повреждаемости стальных образцов с использованием метода магнитной памяти металла. *Контроль. Диагностика*, № 3. С. 23-26. Goreckij, V., Dubov, A., Demin, E. (2000) Issledovanie strukturnoj povrezhdaemosti stalnyh obrazcov s ispolzovaniem metoda magnitnoj pamjati metalla. [Investigation of the structural damage of steel samples using the metal magnetic memory method]. *Kontrol. Diagnostika*. 3. 23-26. [in Russian].
 24. Serbin, E. D., Kostin, V. N., Vasilenko, O. N., Ksenofontov, D. G., Gerasimov, E. G., Terentev, P. B. (2020) Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state. *NDT & E International*, Vol. 116. 102330. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102330>
 25. Venkatachalapathi, N., Jameel basha, S. MD., Raju, G. J., Raghavulu, P. (2018) Characterization of fatigued steel states with metal magnetic memory method. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5. 2. Part 2. P. 8645-8654. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.002>
 26. Губский, С. А., Сухомлин, В. И., Волох, В. И. (2014) Контроль напряжённого состояния сталей по коэрцитивной силе. *Машинобудування*, №13. С. 6-10. Gubskij, S., Suhomlin, V., Voloh, V. (2014) Kontrol napryazhyonnogo sostoyaniya stalej po koercitivnoj sile. [Control of the stress state of steels by coercive force]. *Mashinobuduvannya*. [in Ukrainian]. 13. 6-10.
 27. Ye. D. Y., Wang, D. J., An, P. (1996) Characteristics of the change in the surface microhardness during high cycle fatigue damage. *Mater Chem Phys*, 44(2). P. 179-181.
 28. Chen, Z. J., Strom, A., Jiles, D. C. (1993) Micromagnetic surface measurements for evaluation of surface modifications due to cyclic stress. *IEEE Trans Magn*, 29(6). P. 3031-3033.
 29. Уралов, Я. С. Ватулин, С. К. Коровин, А. П. Попов, В. А. (2004) Методика определения остаточного ресурса металлоконструкций башенных кранов БК-1000. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, № 2. С. 162-167. Uralov, Y., Vatulin, S., Korovin, A., Popov, V. (2004) Metodika opredeleniya ostatochnogo resursa metallokonstrukcij bashennyh kranov BK-1000. [Methodology for determining the residual life of metal structures of tower cranes BK-1000]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. 2. 162-167. [in Russian].
 30. Сниткин, В. М., Фролов, И. П., Овсянников, Е. М., Овсянников, В. Е. (2015) Оценка остаточного ресурса мостовых кранов коробчатого сечения. *Инженерный вестник Дона*, № 3(37). С. 89. Snitkin, V., Frolov, I., Ovsyannikov, E., Ovsyannikov, V. (2015) Ocenka ostatochnogo resursa mostovyh kranov reshetchatogo secheniya. [Estimation of the residual life of box-section overhead cranes]. *Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Inzhenernyj vestnik Dona»*. 3(37). 89. [in Russian].
 31. Бойко, Г. О., Бойко, Т. В., Спіхін, Р. А. (2018) Методи оцінки технічного стану вантажопідійомних кранів. *Вісник*

- східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, № 2 (243). С. 42-49. Boiko, H., Boiko, T., Yepikhin, R. (2018) Metody otsinky tekhnichnoho stanu vantazhopidiomnykh kraniv. [Methods for assessing the technical condition of cranes]. Visnyk skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. Volodymyra Dalia. 2 (243). 42-49. [in Ukrainian].
32. Гайдамака, А. В., Клітної, В. В., Музикін, Ю. Д., Татьков, В. В., Наумов, О. І., Бородин, Д. Ю. (2020) Спосіб діагностики коліс зубчастих передач за зміною твердості їх торців в зонах можливого руйнування. Пат. 145452, Україна: МПК G01M 13/02. заяв. 13.07.2020. опубл. 10.12.2020. бюл. № 23. 4 с. Gajdamaka, A., Klitnoi, V., Muzikin, Y., Tatkov, V., Naumov, O., Borodin, D. Spisib diagnostiki kolis zubchastih peredach za zminoyu tverdosti ih torciv v zonah mozhlivogo rujnuvannya. [Method of diagnosing gear wheels by changing hardness of their ends in zones of possible destruction]. Patent number 145452. [in Ukrainian].
33. ДСТУ 8646:2016 Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (строки служби) технічних систем [Чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 63 с. DSTU 8646:2016 Nadiinist tekhniky. Otsiniuvannia ta prohnouzuvannia zalyshkovoho resursu (stroky sluzhby) tekhnichnykh system [Reliability of equipment. Estimation and forecasting of residual resource (service life) of technical systems]. Vyd. ofits. Kyiv: DP «UkrNDNTs». [in Ukrainian].

Гайдамака Анатолій Володимирович¹, д.т.н., зав. каф. деталей машин та гідропневмосистем, тел. +38057-707-61-28, е-mail: anatolij.gaydamaka@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6952-4086

Музикін Юрій Дмитрович¹, к.т.н., проф. каф. деталей машин та гідропневмосистем, е-mail: Yurii.muzykin@khpi.edu.ua, тел. +38057-707-61-28, ORCID: 0000-0002-2356-7689

Клітної Володимир Вікторович¹, к.т.н., доц. каф. деталей машин та гідропневмосистем, тел. +38 067-282-93-24, Vladklitnoi@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0024-5959

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Diagnostics of the technical condition and prediction of accident-free guaranteed operating time of heavy loaded machines gear wheels

Abstract. Problem. This article highlights the current state of diagnostics of gears on the level of

accumulated fatigue damage in operation. The generalization of the known information on determination of a technical condition of separate gear wheels, especially with big modules ($m > 20$ mm), allows to outline prospects of development of such diagnostics of a technical condition of gear wheels directly in the course of operation. **Goal.** The goal of this study is to develop an algorithm for diagnosing the technical condition and forecasting a fault-free operation of the gears of heavy-duty machines. **Methodology.** The least squares method and the confidence interval method are used to predict accident-free guaranteed gear operation. **Results.** A procedure for diagnosing the technical condition of gears by measuring the hardness of the metal has been developed, which includes five main stages: selection of the device; choice of measurement scheme; selection of the number of measurements, number and relative position of measuring points; development of a design of a template for measurements; development of a device for fastening templates. When determining the accident-free guaranteed operating time on the basis of several criteria of the limit state, the final decision is made on the criterion that determines the minimum term. **Originality.** The method of forecasting accident-free guaranteed operating time of gears is chosen taking into account the stages of running-in and stable in linear function accumulation of damage in operation. **Practical value.** The use of the developed procedure for diagnosing the technical condition of the gears of gearboxes of heavy-duty machines will significantly increase the efficiency of their operation due to the transition from scheduled preventive maintenance to maintenance according to the actual technical condition.

Key words: diagnostics, technical condition, prediction, guaranteed operating time, gear wheel, fatigue damage.

Gaydamaka Anatoliy¹, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Machine Components and Hydraulpneumatic Systems, тел. +38057-707-61-28, anatolij.gaydamaka@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6952-4086

Muzykin Yurii¹, Ph.D., Prof. Department of Machine Components and Hydraulpneumatic Systems, тел. +38057-707-61-28, Yurii.muzykin@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2356-7689

Klitnoi Volodymyr¹, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Machine Components and Hydraulpneumatic Systems, тел. +38 067-282-93-24, Vladklitnoi@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2356-7689

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.