УДК 620.178.7 https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.144

© О.О. Богданов[1] , В.А. Дербаба[1], В.М. Рубан[1], І.В. Антоненко[2]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна
[2]Відокремлений структурний підрозділ «Фаховий коледж ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара», Дніпро, Україна

ІНТЕГРАЛЬНА МЕТОДИКА ОБРОБКИ ДАНИХ ДЛЯ ОЦІНКИ КІНЕТИКИ РУЙНУВАННЯ ВАЛІВ

© O. Bohdanov[1], V. Derbaba[1], V. Ruban[1], I. Antonenko[2]
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
[2]Separate structural unit «Applied rocket-and-space engineering college of Oles Honchar Dnipro National University», Dnipro, Ukraine

INTEGRATED DATA PROCESSING METHOD FOR ESTIMATING SHAFT DESTRUCTION KINETICS

Мета. Вдосконалення методики контролю розвитку втомних тріщин у деталях машин, зокрема вала редуктора, на основі використання ультразвукового неруйнівного контролю. Це дозволяє підвищити точність оцінки довговічності та параметрів процесу руйнування, зменшити похибки при обробці експериментальних даних та забезпечити виявлення тріщин на ранніх стадіях розвитку.

Методика. Методи проведення досліджень базувалися на основах теорії механіки руйнування. Дослідження проведено на прикладі вала редуктора, який випробовувався на втому методом симетричного плоского згину за частоти 20 Гц. Для контролю розвитку тріщин використано ультразвуковий дефектоскоп, який дозволяє встановлювати залежність між сигналом від тріщини, її розміром та кількістю циклів навантаження. Обробка даних виконувалась за допомогою інтегральної форми рівняння Періса, що дає можливість уникнути похибок чисельного диференціювання та врахувати параметри процесу руйнування.

Результати. Запропонована методика дозволила виявити тріщини на ранній стадії розвитку в 1,5-3 рази швидше, ніж візуальні методи. Встановлено кількісний зв'язок між амплітудою сигналу та розміром тріщини, що підтверджується експериментальними даними. Обчислені параметри рівняння Періса з використанням методу сполучених градієнтів свідчать про тісний кореляційний зв'язок між коефіцієнтами. Відмінність між розрахунковими та експериментальними оцінками довговічності не перевищує 40%.

Наукова новизна. Розроблено новий підхід до обробки експериментальних даних, що усуває необхідність чисельного диференціювання та інтерполяції точок, що, у свою чергу, знижує похибки при аналізі залежностей між довжиною тріщини та кількістю циклів навантаження. Вперше обґрунтовано використання інтегральної форми рівняння Періса для оцінки параметрів кінетики руйнування валів редукторів, що дозволяє більш точно визначати швидкість росту втомних тріщин. Встановлено кількісну залежність між амплітудою ультразвукового сигналу та розміром тріщини, що дозволяє підвищити достовірність контролю на ранніх стадіях руйнування. Виявлено тісний кореляційний зв'язок між коефіцієнтами рівняння Періса, що підтверджується розрахунками, виконаними методом сполучених градієнтів.

Практична значимість. Запропонована методика дозволяє суттєво підвищити точність контролю втомного руйнування деталей машин і визначення їх довговічності. Виявлення

тріщин на ранніх стадіях розвитку забезпечує своєчасне виявлення дефектів, що сприяє підвищенню надійності та безпеки експлуатації обладнання.

Ключові слова: *механіка руйнування, втомні тріщини, вал редуктора, неруйнівний контроль, інтегральна методика.*

Вступ. Пошук шляхів підвищення довговічності деталей машин та механізмів є актуальною проблемою сучасного машинобудування. Це зумовлено тим, що на ремонт і обслуговування техніки використовуються значні матеріальні ресурси. Сучасне обладнання працює в умовах постійного збільшення потужностей і робочих навантажень, що зумовлює підвищення вимог до надійності деталей машин. Втрата працездатності та вихід з ладу під час експлуатації є наслідком таких процесів, як тертя та зношування, перерозподіл залишкових напружень, виникнення та розвиток тріщин та ін.

Отримувані при стандартних випробуваннях на гладких зразках характеристики механічних властивостей при статичному та циклічному навантаженні (границя міцності, границя текучості, границя втоми і т.п.) є основними для розрахунків на міцність і довговічність. Разом з тим для високонавантажених великогабаритних конструкцій практично неможливо позбутись різного роду дефектів типу тріщин, які виникають на стадії виготовлення, а також в процесі експлуатації (розшарування, непровари, пори, та ін.). Тому, поряд із загальноприйнятою методикою оцінки міцності та довговічності елементів конструкцій, необхідно проводити розрахунки за критеріями механіки руйнування [1].

Один із перспективних напрямів оцінки довговічності деталей машин на стадії руйнування – використання механіки руйнування – вимагає аналізу експериментальної інформації розвитку тріщин втоми [1, 2]. Така інформація може бути отримана у процесі випробувань натурних деталей на втому. При цьому актуальним є питання вибору методу контролю за виникненням та розвитком тріщин. Зокрема візуальні методи не завжди дозволяють контролювати процес розвитку макроскопічної тріщини. У разі ефективне застосування методів неруйнівного контролю, особливо ультразвукового [2, 3]. При цьому встановлюється залежність між сигналом від тріщини, її геометричним розміром та кількістю циклів навантаження.

Наразі не існує єдиної достатньо точної моделі, що дозволяє визначати швидкість росту втомних тріщин в елементах конструкцій та визначати їхню залишкову довговічність. Зазвичай спочатку тріщини зростають стабільно, тобто з кожним циклом навантаження розмір тріщини збільшується несуттєво. Після певної критичної кількості циклів навантаження тріщина починає зростати нестабільно, що призводить до втратити елементом конструкції придатності до експлуатації. При поступовому зростанні тріщин (середня ділянка кінетичної діаграми руйнування) одним із етапів обробки стає чисельне диференціювання кривої зростання тріщини для знаходження її швидкості [4, 5–11].

Операція заміни диференціального рівняння різницевим вносить похибки [12, 13], що особливо відчувається при випробуванні натурних зразків через

невисоку точність вимірювання довжин тріщин. У зв'язку з цим методика обробки експериментальних даних потребує подальшого розвитку.

Основна частина. Розглянемо вдосконалення методик контролю розвитку втомних тріщин та обробки отримуваної експериментальної інформації на прикладі випробувань валу редуктора. Під дією змінного навантаження відбувається сталий процес росту тріщини, який можна описати декількома рівняннями. У практиці аналізу розвитку втомних тріщин в діапазоні зміни швидкості зростання 10^{-8} м/цикл < dl / dN < 10^{-6} м/цикл широко застосовується рівняння Періса [8]:

$$dl/dN = C(\Delta K)^n, \quad (1)$$

де l – поточна довжина тріщини; N – кількість циклів навантаження; C і n – емпіричні коефіцієнти [6]; ΔK – розмах коефіцієнта інтенсивності напруги.

Формула (1) отримала найбільше поширення для опису швидкості росту втомних тріщин (РВТ).

Подальший аналіз даних проведено у межах моделі валу редуктора (рис. 1). В експлуатації зазначені випадки його поломки через втомні тріщини, які починаються на поверхні валу з четвертої ступені і в міру розвитку мають вигляд сегмента.

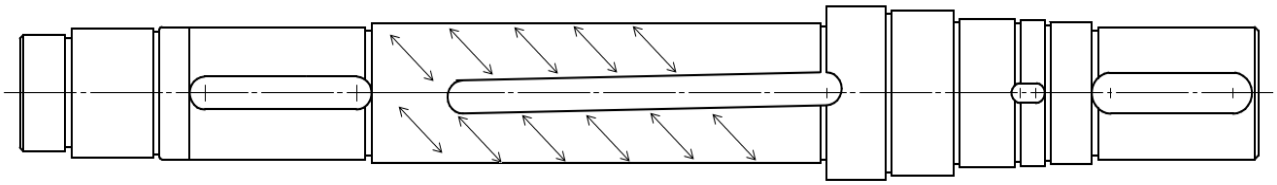

Рис. 1. Схема валу редуктора

Стендові випробування валу на втому проведені на машині УМП-2 при симетричному плоскому згині з частотою 20 Гц і постійній амплітуді двох рівнів згинального моменту: М1 = 1000 Н·м, М2 = 2000 Н·м.

Контроль за виникненням втомних тріщин здійснено за допомогою ультразвукового дефектоскопа ДУК-66ПМ ехометодом за суміщеною схемою включення шукачів. Для забезпечення пропорційності між амплітудою сигналу та розміром тріщини застосовано контроль багаторазово-відбитим променем за схемою контролю тріщин у товстих пластинах [9]. Така схема дозволяє фіксувати шукач щодо площини розвитку тріщини протягом усього періоду випробувань. Відпадає необхідність у безперервному переміщенні шукача з метою оцінки розмірів тріщини під час використання традиційних схем.

Кількісний зв'язок між амплітудою ехосигналу та розміром тріщини встановлювався тарирувальними вимірами на штучному дефекті, виконаному в площині руйнування валу фрезою. Площа сегмента (тріщини) пов'язані з довжиною дуги (довжиною тріщини лежить на поверхні валу) простим співвідношенням.

Криві довжина тріщини – кількість циклів навантаження наведено на рис. 2 та 3.

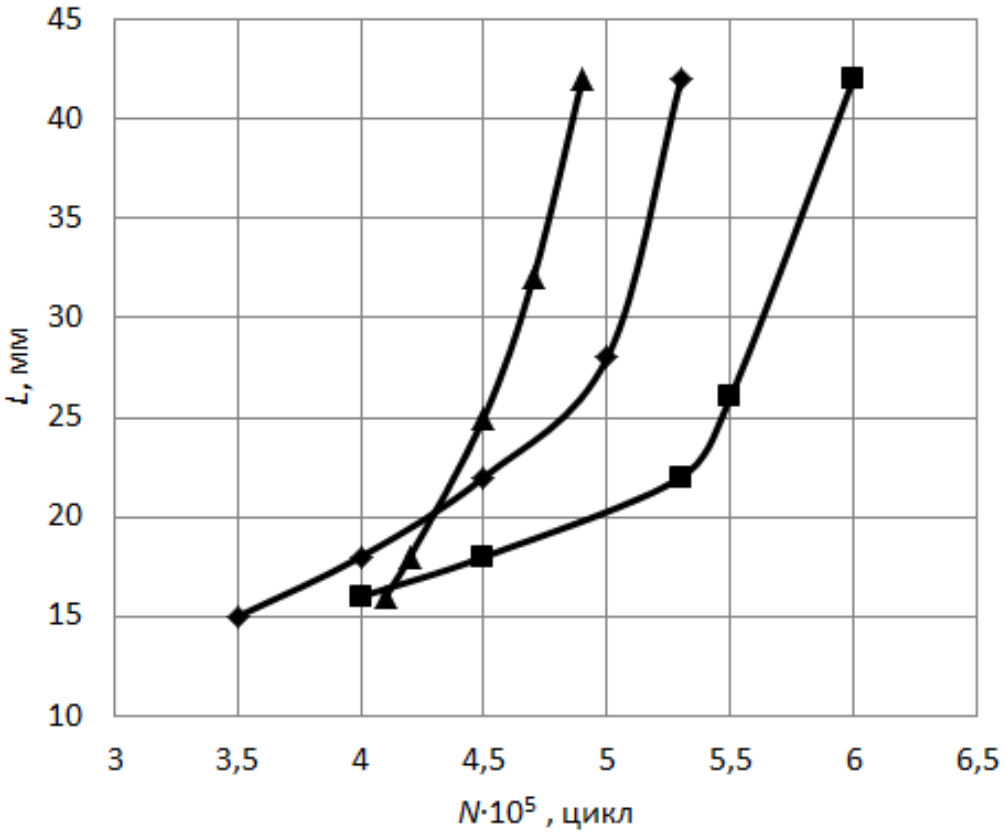

Рис. 2. Залежність довжини тріщини від кількості циклів навантаження при візуальному контролі

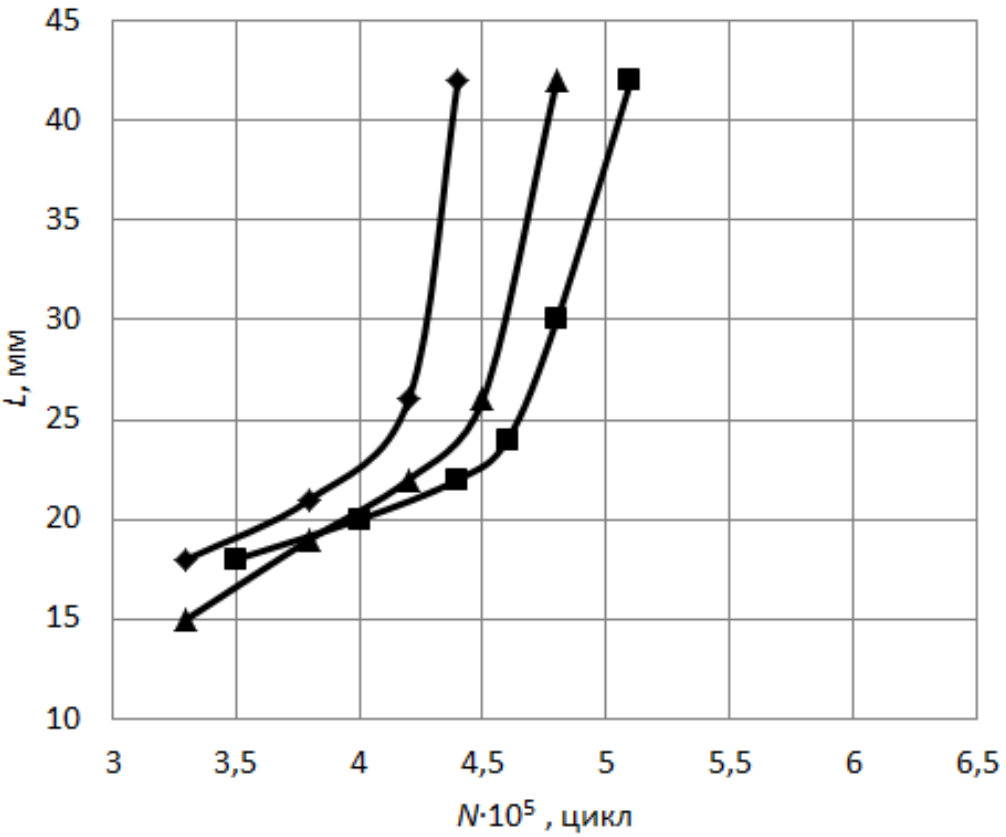

Рис. 3. Залежність довжини тріщини від кількості циклів навантаження при ультразвуковому контролі

Оцінки параметрів C і n знаходили з умови мінімуму функціоналу:

$$G(C, n) = \sum_{i=2}^{m} (l_i - l_i^{\wedge})^2 , \qquad (3)$$

де m – загальна кількість вимірювань довжин тріщин; l_i – оцінка тріщини довжиною l, одержувана з (2).

Обчислення проводили на ЕОМ на основі методу сполучених градієнтів, що має гарну збіжність при вирішенні такого роду завдань. При аналізі вихідних даних виявлено, що існує безліч пар параметрів C і n, що забезпечують мінімум функціоналу (3). Це свідчить про наявність між параметрами тісного кореляційного зв'язку, що не суперечить даним ряду авторів для зразків з різних матеріалів і елементів конструкцій.

У зв'язку з цим цікаві не окремі пари оцінок параметрів C і n, а регресійна залежність з-поміж них (рис. 4). Набір значень параметра для кожного валу отриманий мінімізацією функціонала G при відповідному наборі фіксованих значень n.

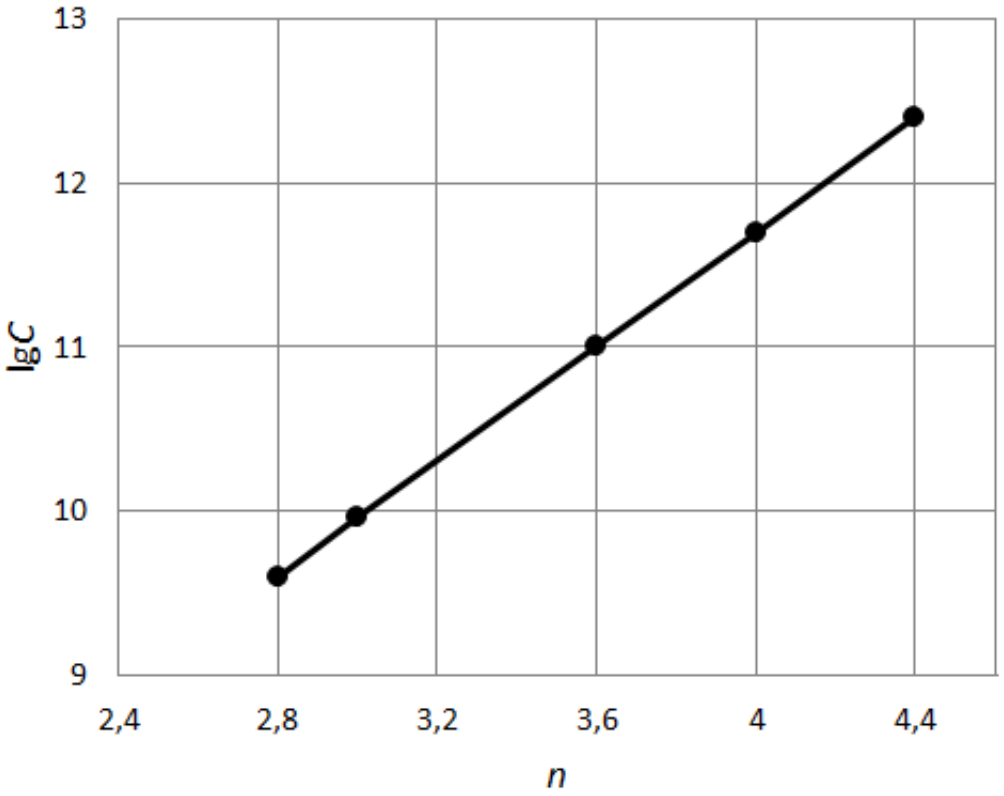

Рис. 4. Залежність між коефіцієнтами C і n

Для побудови кривої проводилося опосередкування параметрів з усіх випробуваних валів кожному рівні фіксованих значень n. Для $n = 3 \div 4$ середнє значення параметра $C^* = C/\pi^{n-2}$ знаходиться в діапазоні $0{,}6 \cdot 10^{-13} \div 3{,}3 \cdot 10^{-10}$, що із задовільною точністю збігається з оцінками цих параметрів у роботі [11]. Зіставлення розрахункових та експериментальних оцінок довговічності на стадії руйнування з урахуванням оцінки параметра C для кожного валу при $n = 4$ наведено у таблиці.

Таблиця

Порівняння оцінок довговічності

Номер валу	Рівень навантаження, Н·м	Оцінка довговічності, 10^5 цикл		$\frac{\lvert N_p - N_e \rvert}{N_e}$
		Експериментальні N_e	Розрахункові N_p	
1	M1 = 1000	20	15	0,25
2		18	15	0,17
3		8,8	12	0,36
1	M2 = 2000	1,7	1,2	0,29
2		1,1	0,8	0,27
3		1,5	1,1	0,27

Висновки. Запропонована методика дозволяє використовувати вихідні дані без інтерполяції експериментальних точок довжина тріщини – кількість циклів навантаження та подальшого чисельного диференціювання цих залежностей, а також уникнути помилок, пов'язаних із заміною диференціального рівняння (1) різницевим. У той самий час слід зазначити обмеження застосування запропонованої методики: інтегральне рівняння (2) отримано у припущенні сталості коефіцієнта Y, що визначається геометрією об'єкта та схемою навантаження.

Таким чином, ультразвуковий контроль у валу редуктора за розвитком тріщини втоми дозволяє виявити початкову фазу руйнування в 1,5–3 рази раніше, ніж візуальний контроль, і дає можливість проводити дослідження при випробуваннях на втому.

Для визначення параметрів рівняння, що описує процес руйнування на середній ділянці кінетичної діаграми руйнування, доцільним є застосування інтегральної форми рівняння Періса. Фактичні значення довговічності валу редуктора відрізняються від оцінюваних з урахуванням знайдених параметрів рівняння Періса лише на 40%.

Перелік посилань

1. Долгов, О. М. (2019). *Механіка руйнування : підручник*. НТУ «Дніпровська політехніка».
2. Березін, Л. М., & Рубанка, М. М. (2018). Розрахунки деталей на надійність та довговічність за критерієм втомленісної міцності. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія : Технічні науки.*, (5), 56–62. https://doi.org/10.30857/1813-6796.2018.5.6
3. Сусліков, Л.М., & Студеняк, І.П. (2016). *Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник*. Ужгород: Видавництво УжНУ.
4. Ясній, В. П. (2020). Особливості росту втомних тріщин у псевдопружному NiTi сплаві. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (4), 120–124. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-151-4-120-124
5. Ясній, П. В., Пиндус, Ю. І., & Фостик, В. Б. (2015). Оцінка мінімальної швидкості росту втомної тріщини після перевантажень розтягуванням-стиском з урахуванням асиметрії циклу навантаження. *Опір матеріалів і теорія споруд : наук.- техн. зб.* Київ. нац. ун-т будва і архітектури, (94), 231–243.

6. Kravchenko, Yu., & Derbaba,V. (2020). Empirical definition of the shearing angle and chip-edge contact length when cutting. *Збірник наукових праць НГУ, 63*, 123–133. https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.123
7. Троїцький, В. А. (2006). *Ультразвуковий контроль: дефектоскопи, нормативні документи, стандарти з УЗК.* Київ : Фенікс.
8. Марущак, П. О. (2003). Методика дослідження швидкості росту тріщини і опис кінетичних діаграм руйнування в умовах втоми-повзучості. *Вісник Тернопільського національного технічного університету, 8*(2), 23–28.
9. Шинкарчук, Н. В., & Кот, В. В. (2022). Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень ізотропної пластинки з впаяним круглим пружним диском. *Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки»*, (73). https://doi.org/10.36910/775.24153966.2022.73
10. Ориняк, А. І. (2021). *Методи розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень з врахуванням геометричної нелінійності та довільної форми тріщини*.: *Дис. канд. техн. наук : 05.02.09 – динаміка та міцність машин*. Київ.
11. Сорочак А. П. (2015). *Тріщиностійкість і залишковий ресурс осей колісних пар з урахуванням структурно-механічної неоднорідності*. *Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 01.02.04 – механіка деформованого твердого тіла*. Тернопіль.
12. Дербаба, В.А., Пацера, С.Т. & Григоренко, В.У. (2022). Особливості механічної обробки зносостійких чавунів. *Збірник наукових праць НГУ, 71*, 217–230. https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.217
13. Дербаба, В.А., Носачов, В.С. & Різо, З.М (2021). Дослідження і удосконалення методики випробувань верстата на геометричну і кінематичну точність. *Збірник наукових праць НГУ, 64*, 198–212 https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.198

ABSTRACT

Purpose. Improving the method of monitoring the development of fatigue cracks in machine parts, in particular the gearbox shaft, based on the use of ultrasonic non-destructive testing. This allows to increase the accuracy of estimating the durability and parameters of the fracture process, reduce errors in the processing of experimental data and ensure the detection of cracks at the early stages of development.

The methods. The research methods were based on the principles of the theory of fracture mechanics. The study was conducted on the example of a gearbox shaft, which was tested for fatigue by the symmetrical plane bending method at a frequency of 20 Hz. An ultrasonic flaw detector was used to monitor the development of cracks, which allows establishing the dependence between the signal from the crack, its size and the number of load cycles. Data processing was performed using the integral form of the Paris equation, which makes it possible to avoid errors in numerical differentiation and take into account the parameters of the fracture process.

Findings. The proposed method allowed to detect cracks at the early stage of development 1.5–3 times faster than visual methods. A quantitative relationship between the signal amplitude and the crack size has been established, which is confirmed by experimental data. The calculated parameters of the Paris equation using the conjugate gradient method indicate a close correlation between the coefficients. The difference between the calculated and experimental estimates of durability does not exceed 40%.

The originality. A new approach to the processing of experimental data has been developed, which addresses the need for numerical differentiation and interpolation of points, which, in turn, reduces losses in the analysis of deposits between periods cracks due to the number of cycles of wear. First, a vicoristic integral form of the Peris equation was used to estimate the parameters of the kinetics of

gearbox shaft alignment, which makes it possible to more accurately determine the fluidity of the growth of internal cracks. A close relationship has been established between the amplitude of the ultrasonic signal and the size of the crack, which makes it possible to increase the reliability of control at the early stages of destruction. A close correlation between the coefficients of the Peris level was revealed, which is confirmed by the results obtained using the method of obtaining gradients.

Practical implementation. The proposed method allows to significantly increase the accuracy of monitoring fatigue fracture of machine parts and determining their durability. Detection of cracks at early stages of development ensures timely detection of defects, which contributes to increasing the reliability and safety of equipment operation.

Keywords: *fracture mechanics, fatigue cracks, gearbox shaft, non-destructive testing, integral methodology.*