

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

УДК 539.43:620.179.16

DOI <https://doi.org/10.26661/2413-6549-2020-1-01>

ОЦІНЮВАННЯ КРИТЕРІЇВ ГРАНИЧНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛІВ АВІАЦІЙНИХ ГТД НА ОСНОВІ АКУСТОЕМІСІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЕГРАДУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ БАГАТОЦИКЛОВОЇ ВТОМИ

Беженов С. О.

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання
Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна
orcid.org/0000-0001-7329-356X
bezhenov@zntu.edu.ua*

Ключові слова: втома, деформація, акустична емісія, поверхнєве зміцнення, пошкодження структури матеріалу, стадійність руйнування.

Сучасні вимоги до підвищення термінів експлуатації з одночасним зниженням вартості продукції машинобудування зумовлюють потребу пошуку нових і вдосконалення наявних методів зміцнення конструкційних матеріалів. Урахування різноманітних експлуатаційних, конструкційних і технологічних факторів лише розрахунковими методами не забезпечує необхідної точності прогнозування механічної поведінки виробів в умовах втоми, що потребує проведення довготривалих випробувань задля верифікації результатів розрахунків. Тому актуальним залишається розвиток методик прогнозування граничного стану конструкційних матеріалів на великих базах періодичного навантаження за даними, що не руйнують методів контролю, зокрема методу акустичної емісії (АЕ). Ви рішення поставленого завдання ґрунтується на таких теоретичних передумовах. Використовується акустоемісійна модель циклічного деградування конструкційних матеріалів, яка встановлює зв'язок між характеристикою опору втоми матеріалу та його акустоемісійною активністю. Зазначена модель поєднує авторську модель багатоциклової втоми, динамічну дислокаційну модель плинності (Т. Екоборі), закон дискретності структурно-енергетичної теорії руйнування матеріалів (В.С. Іванова) і загальноприйняті уявлення про стадійність характеру процесу накопичення пошкоджень при циклічному навантаженні. Досліджувалися модельні зразки сплавів на основі нікелю й титану. Зразки виготовлено як за стандартних технологічних процесів, так і після поверхневого ультразвукового зміцнення. Описано особливості циклічних АЕ характеристик, які є ідентичними для різних класів матеріалів з різною технологічною спадковістю. На основі одержаних результатів встановлено залежності між інформативними параметрами АЕ та критеріями граничного стану досліджуваних матеріалів авіаційних ГТД в умовах багатоциклової втоми. Це дасть можливість оцінювати ефективність видів і режимів технологічних операцій, спрямованих на підвищення ресурсу деталей ГТД, за даними неруйнівного АЕ контролю.

ESTIMATING THE CRITERIA FOR THE LIMITING STATE OF AVIATION GAS TURBINE ENGINE MATERIALS BASED ON THE ACOUSTIC EMISSION MODEL OF MATERIAL DEGRADATION UNDER CONDITIONS OF HIGH-CYCLE FATIGUE

Bezhenov S. O.

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Internal Combustion Engines
Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho str., 64, Zaporizhzhya, Ukraine
orcid.org/0000-0001-7329-356X
bezhenov@zntu.edu.ua*

Key words: *fatigue, deformation, acoustic emission, hard facing, damages of the material structure, stage-by-stage fracture.*

Modern mechanical engineering products are expected to have increased lifetime at reduced cost. In order to enable this development, new and improved methods of structural materials strengthening have to be found. Mathematical modelling of the mechanical behaviour of the products in the conditions of fatigue, taking into account various operational, design and technological factors does not provide the necessary accuracy and has to be verified in long-term tests. Therefore, development of methodology for predicting the limiting state of structural materials under long-term periodic load by non-destructive control methods, in particular the acoustic emission (AE) method, remains topical.

The solution of this problem is based on the following theoretical assumptions. An acoustic emission model of cyclic degradation of structural materials is used, which establishes a relationship between the fatigue resistance characteristic of the material and its acoustic emission activity. The model combines the author's model of high-cycle fatigue, dynamic dislocation yielding model (by T. Yokobori), the law of discreteness of the structural-energy theory of material destruction (by V.S. Ivanova), and generally accepted ideas about the stage-by-stage process of damage accumulation under cyclic loading.

The studied designed nickel- and titanium-based alloy samples have been studied. The samples were fabricated both in standard technological process and including ultrasonic surface hardening. Features of cyclic AE characteristics that are identical for different classes of materials with different technological inheritance are described. Based on the obtained results, the relationships between the informative parameters of AE and the criteria of the limiting state of the studied materials for aviation gas turbine engines under the high-cycle fatigue conditions are established. This enables assessment of the effectiveness of the technological measures aimed at increasing the life of parts of the gas turbine engine, based on non-destructive AE control.

Вступ. Сучасні вимоги до підвищення термінів експлуатації з одночасним зниженням вартості продукції машинобудування зумовлюють потребу пошуку нових і вдосконалення наявних методів зміцнення конструкційних матеріалів. Водночас, оскільки більшість конструкцій працюють в умовах циклічно діючих навантажень, коли визначальним видом руйнування виявляється втома, актуальним залишається завдання отримання достовірних даних про опір утомі конструкційних матеріалів на великих базах періодичного навантаження. Гострою, зокрема,

є проблема забезпечення необхідної довговічності відповідальних деталей ГТД. Завдання значно ускладнюється, якщо виникає необхідність здійснити вибір та обґрунтувати режими технологічних методів фінішної та зміцнюючої обробки матеріалів деталей машин з достовірним прогнозом їх довговічності в заданих умовах експлуатації [1].

Урахування різноманітних експлуатаційних, конструкційних і технологічних факторів лише розрахунковими методами не забезпечує необхідної точності прогнозування механічної пове-

дінки виробів в умовах втоми [2–4], що потребує проведення довготривалих випробувань задля верифікації результатів розрахунків. Отже, повністю відмовитися від тривалих випробувань на втому сьогодні не є можливим, а матеріальні та часові витрати на забезпечення таких випробувань є очевидними.

Поряд із розвитком методик прогнозування циклічної довговічності конструкційних матеріалів на великих базах періодичного навантаження за даними високочастотних випробувань [5] одним із перспективних напрямів оцінювання технічного стану виробів, що експлуатуються в умовах багатоциклової втоми (БЦВ), є застосування неруйнівних методів контролю, зокрема методу акустичної емісії (АЕ) [6; 7]. Проте через складність визначення реального напружено-деформованого стану (НДС) локальних об'ємів матеріалу, що є відповідальними за його руйнування, усе ще залишається проблемним установлення зв'язку між ступенем деформації конструкційного матеріалу та параметрами АЕ в заданих умовах навантаження.

Метою роботи є дослідження можливості оцінювання граничного стану матеріалів різних класів з різною технологічною спадковістю в умовах багатоциклової втоми на основі даних попереднього неруйнівного контролю методом АЕ.

Теоретичні передумови розв'язання задачі. У роботі використано акустоемісійну модель циклічного деградування конструкційних матеріалів [8], яка встановлює зв'язок між характеристикою опору втомі матеріалу та його акустоемісійною активністю. Модель поєднує модель БЦВ [9], динамічну дислокаційну модель плинності [10], закон дискретності структурно-енергетичної теорії руйнування матеріалів [11], загальноприйняті уявлення про стадійність характеру процесу накопичення пошкоджень при циклічному навантаженні. При цьому важливим є інкубаційний період втоми, так звана стадія нелокалізованого руйнування [12], коли в структурі матеріалу утворюються субмікроскопічні тріщини, випадково розташовані по об'єму.

Згідно з моделлю БЦВ, темп циклічного деградування матеріалу задається величиною параметра m як мірою стійкості локального об'єму до зовнішнього навантаження в умовах БЦВ:

$$m = \frac{\lg(C_{HCF}/N_p)}{\lg \sigma_p}. \quad (1)$$

На основі динамічної дислокаційної моделі плинності інтенсивність АЕ випромінювання пов'язується з інтенсивністю змінювання НДС локального об'єму [13], що не суперечить відомим АЕ моделям. Логарифмічна міра інтенсив-

ності АЕ випромінювання матеріалу при його циклічному навантаженні подається у вигляді:

$$n_{AE} = \frac{\lg(\dot{N}_{\Sigma AE}/\dot{N}_{\Sigma AE(0)})}{\lg(\sigma_a/\sigma_p)}. \quad (2)$$

З позицій структурно-енергетичної теорії руйнування встановлюється зв'язок між граничною мірою пошкодженості матеріалу в одному циклі навантаження та мінімальною мірою швидкості появи сигналів АЕ при накопиченні пошкоджень у матеріалі із заданим законом циклічного навантаження має вигляд:

$$n_{AE} = \mu \cdot m \cdot \frac{\lg \sigma_p}{\lg \Delta \sigma_a}, \quad (3)$$

де μ – коефіцієнт жорсткості напруженого стану матеріалу, який визначає енергетичний бар'єр руйнування останнього, $\Delta \sigma_a$ – крок змінювання амплітуди напружень циклу, за якого маємо усталене реєстрування сигналів АЕ.

Варто зауважити, що наведена акустоемісійна модель циклічного деградування конструкційних матеріалів у вигляді залежності (3) потребує введення певних поправок, оскільки процес накопичення пошкоджень при циклічному навантаженні має стадійний характер і визначається механізмами з різним рівнем енергій. Окрім того, необхідно враховувати наявність концентратора напружень (враховується коефіцієнтом k_a) та зворотні процеси деформування локальних об'ємів, які є характерними для стадії динамічної стабілізації структури (враховуються коефіцієнтом k_N). Важливим фактором також є суттєве розсіювання експериментальних даних, що має місце при випробуваннях натурних виробів (враховується коефіцієнтом k_σ). Отже, остаточно маємо:

$$n_{AE(i)} = \mu_{(i)}^{(j)} \cdot m \cdot \frac{\lg \sigma_p}{\lg \Delta \sigma_a} \cdot k_{a(i)} \cdot k_{N(i)} \cdot k_{\sigma(i)}, \quad (4)$$

де індекс « i » визначає стадію нелокалізованого руйнування, а індекс « j » – порядковий номер енергетичного рівня руйнування ($j = I - VII$, згідно з енергетичним спектром [11]).

Щодо стадійності локальних деформаційних процесів під час циклічного навантаження, то тут загально визначеними є такі стадії [14]: I – стадія динамічної стабілізації структури, коли мають місце зворотні процеси локальної перебудови структури матеріалу; II – стадія мікроплинності, де відбувається часткова локальна незворотна перебудова структури матеріалу; III – стадія деформаційного зміцнення з інтенсивними незворотними процесами локальної перебудови структури матеріалу.

Матеріали та методики експериментальних досліджень. Досліджували циліндричні

спеціальні зразки [15] матеріалів різних класів з різною технологічною спадковістю: нікелевий жароміцний сплав ХН77ТЮР-ВД аустенітного класу ($21\text{Cr} - 2,6\text{Ti} - 0,6\text{Al} - 0,46\text{Fe} - 0,37\text{Cu} - 0,31\text{Si} - 0,29\text{Mn}$) і титановий деформований сплав ВТ8 мартенситного класу ($6,4\text{Al} - 3,3\text{Mo} - 0,3\text{Si}$). Зразки виготовлено як за стандартних технологічних процесів (СТП), так із застосуванням фінішного поверхневого ультразвукового зміцнення (УЗЗ), режими якого наведено в [16].

Циклічні випробування здійснювали на електродинамічному вібростенді консольним згином зразків за методикою, яку наведено в [17]. У процесі ступінчастого змінювання циклічних навантажень зразків реєстрували сигнали АЕ в частотній смузі від 0,2 до 2,0 МГц. За інформативний параметр сигналів АЕ, що характеризує динаміку структурних перебудов конструкційного матеріалу при циклічних навантаженнях, прийнято швидкість рахування акустичної емісії, оскільки за таких умов змінювання НДС локальних об'ємів матеріалу відбувається дуже динамічно [18].

На рис. 1 схематично наведено методику проведення неруйнуючого контролю для одержання АЕ характеристики конкретного виробу, яку суміщено з результатами подальших випробувань його ж на втому. Тут точки, які ілюструють ступінчасте зростання навантаження, простав-

лено через 50 МПа. Тривалість дії циклічних напружень на кожному рівні навантаження виробів не перебільшувала тривалість інкубаційного періоду втомного руйнування ($N_{(AE\ test)} < N_{cr}$). Отже, під час АЕ контролю кожний об'єкт дослідження залишався в межах стадії нелокалізованого руйнування.

Результати експериментальних досліджень і їх обговорення. Під час експлуатації авіаційних ГТД основними параметрами, що будуть визначати надійність і ресурс, є характеристики опору втомі найвідповідальніших елементів. Такими параметрами, згідно з моделлю БЦВ, є параметр m , який характеризує темп накопичення пошкодженостей структури матеріалу від втоми, і значення границі витривалості σ_{-1} , яка обмежує максимальні циклічні навантаження, що можуть допускатися в процесі експлуатації.

У результаті випробувань на втому зразків нікелевого й титанового сплавів одержано названі критерії граничного стану в умовах довготривалої дії періодичних навантажень усіх об'єктів дослідження в різному технічному стані (СТП та УЗЗ). Механічні властивості й характеристики опору багатоциклової втомі досліджуваних матеріалів наведено в таблиці 1.

Ефект зміцнення чітко проявляється у збільшенні границі витривалості σ_{-1} і параметра m . Показано, що УЗЗ підвищує границю витривалості

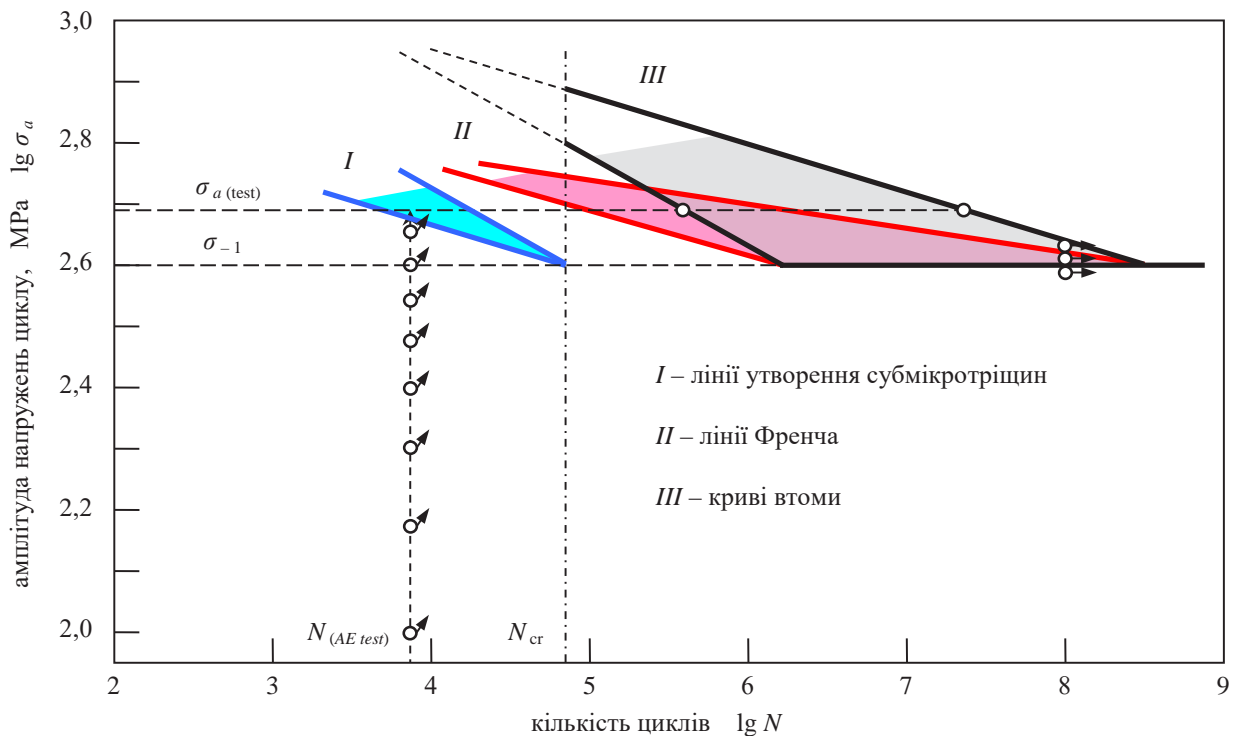


Рис. 1. Схема ступінчастого акустоемісійного тестування виробів з подальшим випробуванням їх на втому

на 30% для сплаву ХН77ТЮР-ВД та на 27,5% для сплаву ВТ8, тоді як границі міцності та пропорційності зазначених матеріалів у різних технічних станах залишаються незмінними.

Для всіх об'єктів дослідження одержано також АЕ характеристики (акустограми), які встановлювали зв'язок між швидкістю сумарного рахунку АЕ (\dot{N}_{AE}) та амплітудою відносних напружень симетричного циклу (σ_a/σ_p) при ступінчастому змінюванні циклічного навантаження. Результатами статистичної обробки результатів експериментів щодо АЕ-контролю всіх об'єктів дослідження стали значення акустоemisійного параметра $n_{AE(i)}$ на різних стадіях утомного пошкодження, а також значення абсцис точок зламу АЕ характеристик σ_{AE}^{**} , які представлено в таблиці 2. Достовірні значення тангенсу кутів нахилу АЕ характеристик досліджуваних об'єктів визначено лише для двох стадій деградування матеріалу виробів під дією циклічного навантаження: мікроплинності (стадія II) та деформаційного зміцнення (стадія III).

Аналіз одержаних циклічних АЕ характеристик виявив певні особливості, які є ідентичними для різних класів матеріалів.

По-перше, це стадійність, яка проявляється в стрибкоподібній зміні темпу зростання АЕ активності матеріалу після досягнення певного значення відносних напружень циклу, яке є пропорційним до границі витривалості:

$$\sigma_{-1} = \gamma \cdot \sigma_{AE}^{**}, \quad (5)$$

з відносно стабільним коефіцієнтом пропорційності γ (див. таблицю 2).

По-друге, це суттєва зміна АЕ активності конкретного матеріалу після обробки УЗЗ на кожній із зафіксованих стадій навантаження: на стадії мікроплинності, так само як і на стадії деформаційного зміцнення, спостерігається збільшення темпу зростання швидкості сумарного рахунку АЕ. Але при цьому змінюється співвідношення тривалості зазначених стадій для матеріалів у різному технічному стані: у зразків після УЗЗ стадія мікроплинності продовжується, а стадія деформаційного зміцнення – скорочується.

Висновки. Показано, що ультразвукове зміцнення поверхні виробів позитивно впливає на характеристики опору втомі як нікелевого, так і титанового сплавів.

Установлено особливості циклічних АЕ характеристик, які є ідентичними для різних класів матеріалів з різною технологічною спадковістю.

Запропоновано емпіричну формулу, яка пов'язує напруження, що відповідає точці зламу циклічної АЕ характеристики модельного зразка матеріалу в певному технічному стані з границею витривалості.

Одержані результати свідчать про адекватність запропонованої раніше акустоemisійної моделі циклічного деградування конструкційних металевих матеріалів. Її застосування дає можливість оцінювати критерії граничного стану конструкційних матеріалів за даними неруйнівного АЕ контролю і приймати оперативні рішення про ефективність видів і режимів технологічних операцій, спрямованих на підвищення ресурсу деталей ГТД.

Таблиця 1

Механічні характеристики й характеристики опору втомі досліджуваних матеріалів

Сплав	Стан поверхні	σ_0 , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{-1} , МПа	m
ХН77ТЮР-ВД	СТП	1200	815	530	13,14
	УЗЗ			690	25,13
ВТ8	СТП	980	690	485	8,123
	УЗЗ			630	14,44

Таблиця 2

Параметри циклічних АЕ характеристик зразків досліджуваних матеріалів

Сплав	Стан поверхні	$n_{AE(II)}$	$n_{AE(III)}$	σ_{AE}^{**} , МПа	γ
ХН77ТЮР-ВД	СТП	5,127	15,38	455	1,165
	УЗЗ	8,773	26,32	635	1,087
ВТ8	СТП	2,444	7,113	415	1,169
	УЗЗ	3,890	11,32	580	1,086

Література

1. Петухов А.Н. Особенности формирования свойств поверхностного слоя основных деталей ГТД при применении традиционных и современных методов упрочнения. *Вестник двигателестроения*. 2006. № 2. С. 20–24.
2. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. Москва : Наука, 2002. 248 с.
3. Прочность материалов и конструкций. Киев : Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2009. Т. 2 : Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия / В.Т. Трощенко, Г.В. Цыбанев, Б.А. Грязнов, Ю.С. Налимов. 664 с.
4. Мак-Ивили А.Дж. Анализ аварийных разрушений. Москва : Техносфера, 2010. 416 с.
5. Прогнозування характеристик опору утомі конструкційних матеріалів на великих базах навантажування / Г.Г. Писаренко, Л.Є. Матохнюк, О.В. Войналович, Д.Г. Кофто. *Проблеми міцності*. 2014. № 5. С. 48–53.
6. Скальський В.Р., Андрійків О.Є. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. 330 с.
7. Гудрамович В.С., Скальський В.Р., Селіванов Ю.М. Голографічне та акустико-емісійне діагностування неоднорідних конструкцій і матеріалів. Львів : Простір-М, 2017. 492 с.
8. Беженев С.О. Акустоемісійна модель циклічного деградування виробів з конструкційних металевих матеріалів. *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції*. Тернопіль : Вид-во ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. С. 64–67.
9. Беженев С.А. Модель механического поведения металлических материалов в условиях многоциклового усталости. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. Дніпропетровськ : Ліра, 2012. Вип. 20. С. 66–73.
10. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов. Киев : Наукова думка, 1978. 352 с.
11. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. Москва : Металлургия, 1975. 456 с.
12. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А. Условия перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению металлов и сплавов. Сообщение 2. Продолжительность стадий зарождения и развития усталостных трещин. *Проблемы прочности*. 2014. № 4. С. 5–20.
13. Беженев С.А. Оценка циклической деградации конструкционных материалов с применением метода АЭ. *Вісник Запорізького національного університету: фізико-математичні науки*. 2015. № 3. С. 28–35.
14. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. Москва : Интернет Инжиниринг, 2002. 288 с.
15. Беженев С.О. Методика дослідження поверхневого шару конструкційних матеріалів методом акустичної емісії. *Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні*. 1999. № 1. С. 16–19.
16. Bezhenov S.O., Byalik H.A., Bezhenov O.I. Mechanism of surface hardening of structural carbon steels. *Materials Science*. 2009. Vol. 45. Issue 1. P. 89–96.
17. Беженев С. Застосування методу акустичної емісії для оцінювання впливу поверхневого зміцнення на характеристики опору багаточисловій втомі залізобуглецевих сплавів. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2013. № 3 (71). С. 204–214.
18. Андрійків О.Є., Скальський В.Р., Сулим І.Т. Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування : монографія. Львів : СПОЛІОМ, 2007. 480 с.

REFERENCES

1. Petukhov A.N. (2006) *Osobennosti formirovaniya svoystv poverkhnostnogo sloya osnovnykh detaley GTD pri primenenii traditsionnykh i sovremennykh metodov uprochneniya* [Features of the formation of the properties of the surface layer of the main components of a gas turbine engine using traditional and modern hardening methods]. *Herald of aeroenginebuilding*, no. 2, pp. 20–24.
2. Terent'yev V.F. (2002) *Ustalost' metallicheskih materialov* [Fatigue of the metallic materials]. Moscow: Nauka (in Russian).
3. Prochnost' materialov i konstruktsiy: *Ustalost' metallov. Vliyaniye sostoyaniya poverkhnosti i kontaktnogo vzaimodeystviya* [Strength of the materials and structures: Fatigue of metals. Influence of the surface condition and contact interaction] (2009) / Troshchenko V.T., Tsybanev G.V., Gryaznov B.A., Nalimov Yu.S. vol. 2. Kyiv: Institute of the problems of strength (in Russian).
4. McEvily A.J. (2010) *Analiz aviariynikh razrusheniy* [The analysis of the emergency failures]. Moscow: Technosfera (in Russian).

5. Pisarenko G.G., Matokhnjuck L.E., Vojnalovich O.V., Kofto D.G. (2014) *Prohnozuvannia kharakterystyk oporu utomi konstruktsiinykh materialiv na velykykh bazakh navantazhuvannia* [Prediction of fatigue resistance characteristics of structural materials on large load bases]. *Probl. Prochn.*, no. 5, pp. 48–53.
6. Skalskiy V.R., Andreykiv O.E. (2006) *Otsinka obiemnoi poshkodzhenosti materialiv metodom akustychnoi emisii* [Evaluation of the volume damage of materials by means of the acoustic emission method]. Lviv: Vydavnytchiiy tsentr LNU im. Ivana Franka (in Ukrainian)
7. Hudramovich V.S., Skalskiy V.R., Selivanov Yu.M. (2017) *Holohrafichne ta akustiko-emisiine diahnozuvannia neodnorodnykh konstruktsii i materialiv* [Holographic and acoustic emission diagnostics of inhomogeneous structures and materials]. Lviv: Prostir-M (in Ukrainian).
8. Bezhenov S.O. (2015) *Akustoemisiina model tsyklichnoho dehraduvannia vyrobiv z konstruktsiinykh metalnykh materialiv* [Acoustic emission model of cyclic degradation product of structural metallic materials]. Proceedings of the *In-service Damage of Materials, its Diagnostics and Prediction: IV Int. Conf. (Ukraine, Ternopil, September 21-25, 2015)*, Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, pp. 64–67.
9. Bezhenov S.A. (2012) *Model' mekhanicheskogo povedeniya metallicheskih materialov v usloviyakh mnogotsiklovoi ustalosti* [The mechanical behaviour model of the metallic materials under the high-cyclic fatigue conditions]. *Problemy vychislitel'noy mekhaniki i prochnosti konstruktsiy*, Lira, Dnipropetrovsk, iss. 20, pp. 66–73.
10. Yokobori T. (1978) *Nauchniye osnovy prochnosti i razrusheniya materialov* [Scientific backgrounds of the strength and fracture of the materials]. Kiyev: Naukova dumka (in Russian).
11. Ivanova V.S., Terent'yev V.F. (1975) *Priroda ustalosti metallov* [The nature of the fatigue of metals]. Moscow: Metallurgy (in Russian).
12. Troshchenko V.T., Khamaza L.A. (2014) *Usloviya perekhoda ot rasseyannogo k lokalizovannomu ustalostnomu povrezhdeniyu metallov i splavov. Soobshcheniye 2. Prodolzhitel'nost' stadiy zarozhdeniya i razvitiya ustalostnykh treshchin* [Conditions for the Transition from Nonlocalized to Localized Damage in Metals and Alloys. Part 2. Duration Fatigue Crack Initiation and Propagation Stages]. *Probl. Prochn.*, no. 4, pp. 5–20.
13. Bezhenov S.A. (2015) *Otsenka tsiklicheskoj degradatsii konstruktsionnykh materialov s primeneniem metoda AE* [Estimating the cyclic degradation of the structural materials via AE method]. *Visnyk of Zaporizhzhya National University. Physical and Mathematical Sciences*, no. 3, pp. 28–35.
14. Terent'yev V.F. (2002) *Ustalostnaya prochnost' metallov i splavov* [The fatigue strength of the metals and alloys]. Moscow : Internet Engineering (in Russian).
15. Bezhenov S.A. (1999) *Metodyka doslidzhennya poverkhnevoho sharu konstruktsiinykh materialiv metodom akustichnoyi emisiiyi* [The methods of investigation of surface layer of structure materials via acoustic emission method]. *New Material and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, no. 1, pp. 16–19.
16. Bezhenov S.O., Byalik H.A., Bezhenov O.I. (2009) Mechanism of surface hardening of structural carbon steels. *Materials Science*, vol. 45, iss. 1, pp. 89–96.
17. Bezhenov S. (2013) *Zastosuvannia metodu akustychnoi emisii dlia otsiniuvannia vplyvu poverkhnevoho zmitsnennia na kharakterystyky oporu bahatotsyklovii vtomi zalizovuhletsevykh splaviv* [Use of the AE method for estimation of the surface hard facing influence on the high cycle fatigue resistance characteristics of the iron-carbon alloys]. *Visnyk of Ternopil Ivan Puluj National Technical University*, no. 3 (71), pp. 204–214.
18. Andreykiv O.E., Skalskiy V.R., Sulym G.T. (2007) *Teoretychni osnovy metodu akustichnoyi emisiiyi v mekhanitsi ruynuvannia* [The theoretical backgrounds of the acoustic emission method in the field of the fracture mechanics]. Lviv: SPOLOM (in Ukrainian).