

ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТАНУ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ, МЕХАНІЧНИХ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ТУРБОНАГНІТАЧАХ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Шарко О. В., д.т.н., професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: avsharko@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6400-8528;

Клевцов К. М., д.т.н., професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, ORCID: 0000-0001-9836-3296;

Акімов О. В., к.т.н., доцент, декан факультету суднової енергетики, доцент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: akimoffsasha@hotmail.com, ORCID: 0000-0001-8613-2837;

Степанчиков Д. М., к.ф.-м.н., доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: dmitro_step75@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5027-2213;

Шарко А. О., к.т.н., аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: sharko_artem@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6350-7189.

Представлено методологію та результати визначення залишкового ресурсу турбонагнітачів методами неруйнівних випробувань. На основі синтезу результатів взаємозв'язку акустичних та механічних властивостей матеріалів та узагальнення досвіду експлуатації турбонагнітачів розроблено систему діагностики технічного стану матеріалів турбонагнітачів. Отримано граничну криву області працездатності матеріалу конструкції турбонагнітача у координатах відносної деформації аж до руйнування. Виконавши вимірювання щільності сигналів акустичної емісії та користуючись граничними кривими можна визначити відповідні значення залишкового ресурсу. Умовою працездатності є невихід траєкторії навантаження за межі області визначення стану працездатності конструкції. Користуючись представленими залежностями можна визначити значення деформаційних характеристик матеріалу за даними АЕ вимірювань. Показано, що щільність акустико-емісійного сигналу при вимірюваннях залишкової деформації при розтягу та згині відрізняються на порядок. Це дає можливість за допомогою частотної фільтрації окремо виділити низько та високочастотні складові акустико-емісійного сигналу та визначити таким чином відносні деформації згину та розтягу на основі єдиного інформаційного сигналу. Запропоновано схему розміщення датчиків акустичної емісії при контролі залишкового ресурсу підшипників і валопроводів турбонагнітачів NR34/S 102 головного двигуна MAN B&W9L 32/40. Висока інформативність та точність визначення залишкового ресурсу матеріалів за результатами акустичних вимірювань дозволяє підвищити рівень ідентифікації стану матеріалів. Для збудження та прийому акустичних хвиль можуть бути використані безконтактні електромагнітно-акустичні перетворювачі або перетворювачі з сухим точковим контактом. Це дозволяє проводити аналіз та інтерпретацію даних або безпосередньо на судні, або шляхом передачі даних до центру віддаленої діагностики каналами радіозв'язку. Отримані результати можуть служити модельним представленням вивчення властивостей та прогнозування залишкового ресурсу конструкцій.

Ключові слова: акустична емісія, турбонагнітач, залишковий ресурс, ідентифікація стану.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.059-073

Постановка проблеми. Вартість морських транспортних суден досягає десятків мільйонів доларів США. На суднові енергетичні установки припадає до 10...30% цієї вартості. Період будівництва одного судна триває близько року, а нормативний термін служби – 20...25 років. Протягом терміну служби енергетичну установку зазвичай не змінюють, а здійснюють її безперервне технічне обслуговування і періодичні ремонти.

Надійність та працездатність експлуатації металевих конструкцій залежить від якості моніторингу технічного стану механічних властивостей матеріалів відповідно до

вимог міжнародних стандартів. Разом з тим, у процесі експлуатації в умовах невизначеності характеру та величини навантажень відбувається відхилення властивостей матеріалів від їх нормативних значень, що потребує періодичних зупинок обладнання та проведення діагностичних робіт.

Необхідність оцінки залишкового ресурсу визначається, якщо відпрацьовано розрахунковий термін служби устаткування, при наближенні термінів нормативної технічної діагностики, при відхиленнях у режимах експлуатації, при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт.

Відмова обладнання в період його експлуатації є наслідком погіршення його міцнісних та функціональних параметрів, що відбувається внаслідок природних, фізичних та фізико-хімічних процесів у матеріалах. Відхилення від цих станів знижує безпеку експлуатації та ресурс, що робить завдання контролю, діагностики та прогнозування параметрів міцності експлуатаційного обладнання у реальному масштабі часу особливо актуальним.

Метою роботи є дослідження методів діагностування залишкового ресурсу турбонагнітача головного двигуна судна в процесі його експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій по визначеній проблемі показує, що серед засобів технічної діагностики особливе місце відводиться акустичним методам і зокрема методам акустичної емісії. Визначення залишкового ресурсу металевих конструкцій з використанням явища акустичної емісії (АЕ) представлено у [1]. В [2–4] АЕ метод використаний для оцінки деградації механічних властивостей при складних деформаційних впливах, у [5–7] для оцінки запасу міцності за допомогою АЕ і фрактального аналізу даних, у [8–10] для визначення залишкового ресурсу пускових будівельних конструкцій космічних ракет-носіїв, у [11–13] для визначення запасу міцності конструкцій при навантаженні.

Інтерес до визначення залишкового ресурсу конструкцій у процесі їх експлуатації стимулював розробку сучасних інструментальних засобів і різноманітних технічних застосувань [14–18]. Так у [15] показано, що залишкові напруги в оброблюваних деталях мають великий вплив на втомну довговічність. Вивчено вплив залишкових напружень під час ультразвукового токарного оброблення в зоні різання. У [16] представлені результати досліджень з втомленості при високому багатоцикловому навантаженні. У [17] представлені оцінки напружено-деформованого стану пористого заліза.

Метод оцінки залишкових напруг і визначення на їх основі залишкового ресурсу використаний для оцінки якості при циклічних навантаженнях [18]. В [19] оцінка залишкових напруг використана для прогнозування динамічного модуля гарячої суміші асфальту при дослідженні автомобільних доріг і проектуванні дорожніх покриттів. В [20] отримано рівняння для прогнозу максимального напруження бетонних дренажних трубопроводів, схильних до різних ушкоджень і складних умов експлуатації. У [21] методи оцінки залишкового ресурсу використані при дослідженні міцності на стиск для цементних композитів з фазовим переходом, у [22] – для прогнозування енергоефективності та продуктивності сонячного дистилятора. У [23] представлений моніторинг стану конструкцій при проникненні металу в скло і кераміку під час термоциклічного старіння за допомогою фемтолазерного датчика на волоконній бреггівській решітці.

За останні роки значно зросла кількість робіт, що демонструють можливості акустичної емісії в неруйнівному контролі, моніторингу, виявленні несправностей зносу і відмов станів конструкцій. Аналіз різних принципів акустичної емісії і їх застосовності до оцінки залишкових напруг викладено в [24]. У [25] представлено моделювання акустичної емісії, викликаной динамічним зрушенням рідини в режимі мастила і впливом нерівностей поверхонь в умовах експлуатації. У [26] представлена онлайн-локалізація джерела акустичної емісії в бетонних конструкціях з використанням ітераційних і еволюційних алгоритмів. В [27] описана діагностика і прогноз несправностей підшипників колісних пар

високошвидкісних поїздів з використанням методів вібрації і акустичної емісії при безперервному моніторингу стану підшипників. Складена класифікація несправностей при низьких, середніх і високих швидкостях для створення відповідної бази даних і бази знань.

Проведений аналіз існуючих методів і засобів визначення залишкового ресурсу в реальному масштабі часу без зупинок устаткування показав, що оскільки величина навантаження є невизначеною, при інтенсивній експлуатації обладнання в умовах пікових навантажень, цілком використовувати наявний досвід для технології визначення залишкового ресурсу металевих конструкцій в умовах комбінованого навантаження за даними акустико-емісійних вимірювань не представляється можливим [2].

Однією з проблем, що обмежує впровадження акустико-емісійного методу для контролю залишкового ресурсу обладнання є відсутність кількісного зв'язку результатів діагностики з залишковим ресурсом виробів, крім того, більшість робіт присвячено впливу на матеріал одного виду деформацій у той час як при експлуатації конструкції матеріал піддається комплексному впливу складних навантажень.

Матеріали та методика дослідження. Найбільш ефективним і раціональним засобом підвищення потужності двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) є використання газотурбінного наддуву, під яким розуміється подача повітря в циліндри під тиском (у результаті чого підвищується ваговий заряд повітря) за рахунок використання енергії відпрацьованих газів. У всіх чотиритактних судових ДВЗ попереднє стиснення повітря відбувається за допомогою відцентрового компресора, який приводиться в дію газовою турбіною, що працює на відпрацьованих газах дизеля. Сукупність компресора та газової турбіни є турбонагнітачем.

Компресор турбонагнітача являє собою одноступеневий відцентровий компресор із лопатевим дифузором. Вихлопний газ від головного двигуна надходить на робоче колесо турбіни через сопловий апарат. Робочі лопатки закручені, мають бандаж та ялинкове кріплення на колесі. Колінчастий вал захищається від гарячих газів кожухом, а робоче колесо компресора – шаром ізоляції та діафрагмою.

Газова частина турбокомпресору, складається із радіально-осьового колеса, яке розташовано у корпусі. Вихлопні гази від двигуна поступають до робочого простору газової турбіни по газопроводу, після чого за допомогою соплового апарату, зменшується тиск і збільшується швидкість газу, також газам надається кут подачі на колесо турбіни. Колесо турбіни посаджене на одному валу із колесом компресору.

Ущільнення валу газової частини турбонагнітача лабіринтового типу. Функція лабіринтового ущільнення полягає у тому, щоб запобігти прориву газів із робочої камери газової частини, що призведе до втрати тиску та забруднення мастила, яке подається до опорних підшипників. Для покращення роботи ущільнень по каналу, подається повітря під тиском із камери компресору.

Для оцінки стану працездатності конструкцій, що експлуатуються в даний момент часу необхідне не тільки визначення механічних властивостей, але і визначення властивостей, чутливих до локальних структурних змін, що проявляються в мікропластичній деформації та змінах локальних мікронапруг. Міцні властивості знижуються не тільки зі зростанням терміну експлуатації, але і при посиленні силових умов.

Безаварійна експлуатація елементів турбонагнітачів залежить від якості моніторингу їх технічного стану і реалізації фізичних методів діагностики. Аналіз ризику аварій на небезпечних виробничих об'єктах полягає в систематичному використанні всієї доступної інформації для ідентифікації небезпек і небажаних подій.

Як показує досвід, експлуатації морських суден основним завданням діагностування є визначення технічного стану головних двигунів і енергетичних установок. У табл. 1 наведено дані щодо відносної частоти відмов елементів судових двигунів внутрішнього згоряння.

Таблиця 1 – Статистика розподілу відмов за підсистемами ДВЗ

<i>Вузол ДВЗ</i>	<i>Відносна частота відмови</i>
Втулка циліндра	0,042
Кришка циліндрів	0,017
Клапанний механізм	0,072
Привід механізму газорозподілу	0,032
Паливний насос	0,090
Форсунка	0,105
Турбокомпресор	0,054
Трубопровід високого тиску	0,096
Кривошипно шатунний механізм	0,096
Колінвал та підшипники	0,021
Повітророзподільник	0,014
Навісні механізми	0,121
Інші	0,240

Нормальна робота головного двигуна залежить від правильного функціонування його основних підсистем та елементів циліндропоршневої групи, паливної апаратури, газотурбонагнітача, підшипників тощо. Наведені дані підтверджують потребу впровадження нових технічних засобів діагностування. Відмовлення елементів суднової енергетичної установки (СЕУ) можна класифікувати на випадкові та закономірні. На ефективність роботи двигуна впливає робота його вузлів, агрегатів та систем, у тому числі системи турбонаддуву. На систему наддуву припадає найбільша кількість відмов, що впливає на питому витрату палива, вартість ремонту та технічного обслуговування, а також на готовність дизеля до роботи. Статистика показує, що на кожні 1000 годин роботи в середньому припадає приблизно 3,5 % від загальної кількості їх зупинок через відмови газотурбонагнітачів. Розподіл відмов по різних вузлах турбокомпресорів представлено в табл. 2. Основними вузлами та елементами турбокомпресорів, що виходять з ладу, є: підшипники, ущільнення, ротор та корпус.

У практиці ідентифікації стану елементів суднового устаткування використовують візуальний огляд, гідравлічні випробування, методи дефектоскопії, технологічні і механічні випробування. Візуальний огляд і гідравлічні випробування використовуються для визначення причин пошкоджень. Дефектоскопію проводять, як на судні так і під час ремонту.

Залишковий ресурс обладнання – це сумарне напрацювання обладнання від моменту проведення контролю технічного стану до переходу в граничний стан. Завдання ідентифікації стану та визначення залишкового ресурсу металевих конструкцій у процесі експлуатації передбачає спостереження за зміною механічних властивостей матеріалів при накопиченні пошкоджень.

Таблиця 2 – Розподіл (у %) відмов по різних вузлах турбокомпресорів

<i>Деталь турбокомпресора</i>	<i>Відсоток відмов</i>
Корпус	9,0
Компресор	0,5
Турбіна	4,8
Ущільнення	16,7
Ротор	15,2
Підшипники	43,8
Масляні насоси	10,0

Теорія визначення механічних властивостей матеріалів заснована на вивченні напружено-деформованого стану. Механічні властивості структурно-чутливі. Їх визначають, піддаючи тіло руйнуванню або необоротної деформації.

Недоліками існуючих комплексів діагностики і визначення остаточного ресурсу є:

- статичність;
- необхідність обліку великої кількості різноманітних показників;
- обмеження в часі і просторі, на яких розповсюджується рішення;
- неповнота і неадекватність інформації;
- низька якість прогнозних оцінок;
- неоднозначність причинно-наслідкових зв'язків;
- низька продуктивність діагностики;
- необхідність сканування і підготовки поверхні для контролю.

Боротьба з цими недоліками може бути проведена за рахунок вимірювань, створення методик ідентифікації та моделювання, програмного та математичного забезпечення.

Існує неослабний інтерес до процесу визначення стану металевих конструкцій в умовах невизначеності. Однак існуючі методики та алгоритми призначені для вирішення часткових питань діагностики і мають ряд обмежень, так як не враховують великого різноманіття параметрів і умов, які мають місце в процесі експлуатації обладнання.

Інтерес до визначення залишкового ресурсу конструкцій у процесі їх експлуатації стимулював розробку сучасних інструментальних засобів і багатий перелік технічних застосувань.

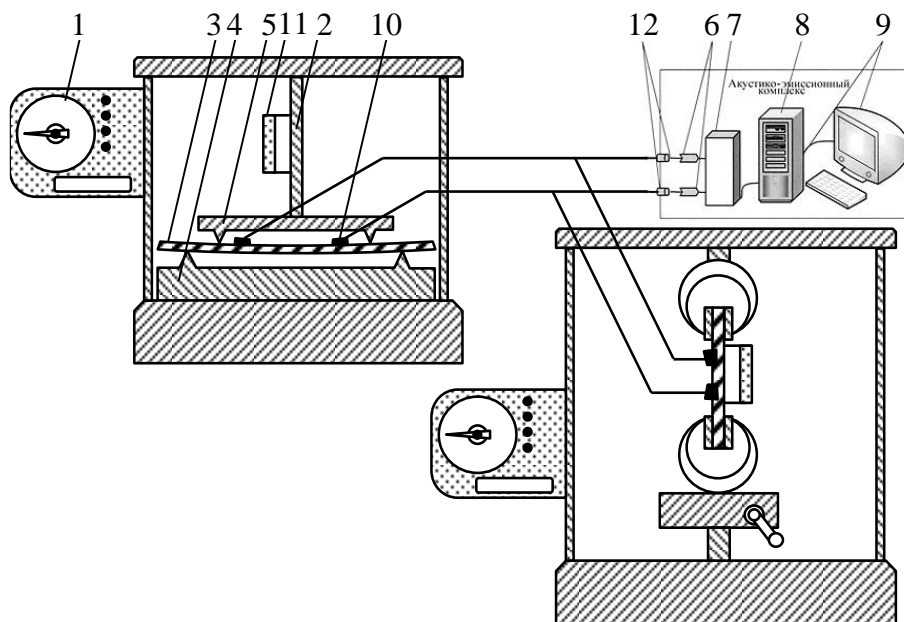


Рисунок 1 – Блок-схема експериментальної установки для АЕ вимірювань при випробуваннях на розтяг і чотириточковий згин:

1 – механізм силівимірювача, 2 – механізм деформування, 3 – контрольований зразок, 4 – опора, 5 – індентор, 6 – блок фільтрів, 7 – аналого-цифровий перетворювач, 8 – блок накопичення та обробки інформації, 9 – реєструючий пристрій, 10 – п'єзоелектричний датчик, 11 – тензомер, 12 – блоки попереднього посилення.

Можливості, які пов'язані з дистанційним використанням методу АЕ, дають великі переваги порівняно з іншими методами неруйнівного контролю, що вимагають, наприклад, відсутності необхідності видалення ізоляційних оболонок, звільнення контейнерів для контролю від внутрішнього змісту для діагностики або сканування великих контрольованих поверхонь без зупинки обладнання для проведення діагностики.

Однією з проблем, що обмежують ефективність технічної діагностики, та визначення залишкового ресурсу турбоагнітачів у процесі їх експлуатації в умовах

складних динамічних навантажень є відсутність кількісних результатів діагностики з залишковим ресурсом виробів.

Для діагностики залишкового ресурсу турбонагнітачів була зібрана експериментальна установка, в якій ідентифікація структурних особливостей накопичення пошкоджень і руйнувань матеріалів по даним АЕ здійснювалась на основі аналізу ступеня деформування зразків, отриманих при дослідженні на розривній машині УМ5 і машині для випробувань на згин МПП-10 [28, 29]. Основною вимогою до експерименту є рівність значень середньоквадратичних похибок при вимірюваннях на розтяг та згин. У цій роботі ця умова дотримується за рахунок єдиного реєструючого блоку з цифровою індикацією АЕ сигналів (рис. 1).

У вимірювальній установці використовувалися широкосмугові акустичні датчики до акустико-емісійного приладу АФ15. Реєстрація сигналів після посилення до 90 Дб виконувалася запам'ятовуючим осцилографом RIGOL DS1052E Digital oscilloscope. При цьому проводився запис сигналів у цифровому форматі. Вимірювання деформації визначалося шляхом фіксації видовження за допомогою мікрометричного електронного індикатора переміщення Micron digital indicator DT-7011. Синхронно реєструвалося параметри деформування і моменти виникнення сигналів АЕ.

Результати досліджень та їх обговорення. Результати експерименту представлені у табл. 3 [28, 29].

Таблиця 3 – Експериментальні значення фізико-механічних характеристик при розтягу та згині

<i>Сила навантаження F, Н</i>	<i>Щільність АЕ сигналу N, 10⁸ с⁻¹</i>	<i>Напруження σ, МПа</i>	<i>Видовження (прогин) l, мм</i>	<i>Відносна деформація ε, %</i>
Розтяг				
16867,44	0,47	281,1	0,375	0,17
18436,50	0,40	307,3	0,463	0,20
18828,77	0,19	313,8	0,477	0,21
19711,37	0,16	328,5	0,577	0,26
20103,63	0,55	335,1	0,591	0,27
20495,90	0,41	341,6	0,705	0,32
20888,16	0,33	348,1	0,737	0,33
21182,36	0,65	353,0	1,923	0,86
21280,43	0,44	354,7	4,189	1,88
23535,96	0,29	392,3	11,022	4,94
25497,29	0,25	424,9	13,330	5,98
29419,95	0,22	490,3	17,390	7,80
Згин				
166,71	1,39	93,8	6,511	1,13
196,13	1,02	110,4	6,815	1,19
264,78	1,37	149,0	8,011	1,39
372,65	1,92	209,7	14,011	2,44
377,56	1,88	212,4	14,312	2,49
386,38	1,86	217,4	14,823	2,59
392,27	1,54	218,7	15,418	2,69
460,91	1,66	234,5	23,901	4,17
465,82	1,73	235,3	24,030	4,19

Моменти виникнення сигналів АЕ представлені не у вигляді часових відліків, що є похибкою експериментальної установки, а у вигляді стрибків амплітуди АЕ сигналу на діаграмі навантаження, фіксованих за шкалою силового пристрою, що є реакцією матеріалу на навантаження.

Як аналізована акустична характеристика була обрана щільність АЕ сигналу N, яка обчислювалася за формулою:

$$N = \frac{N_{\Sigma}}{t_n}, \quad (1)$$

де N_{Σ} – кількість перетинів граничного рівня сигналу АЕ, t – час індикації сигналу.

Цей параметр для сталі при деформації розтягу на порядок відрізняється від такого при деформації згину. При комплексному характері поздовжнього розтягу та поперечного згину ця властивість дозволить чітко визначити тип деформації у зразку ε_p або ε_z для розтягу та згину. Вид таких залежностей наведено на рис. 2 [1, 2].

Завдання ідентифікації стану та визначення залишкового ресурсу металевих конструкцій у процесі експлуатації передбачає спостереження за зміною механічних властивостей матеріалів при накопиченні пошкоджень, в якості яких обрана деформація поверхонь виробу при навантаженні.

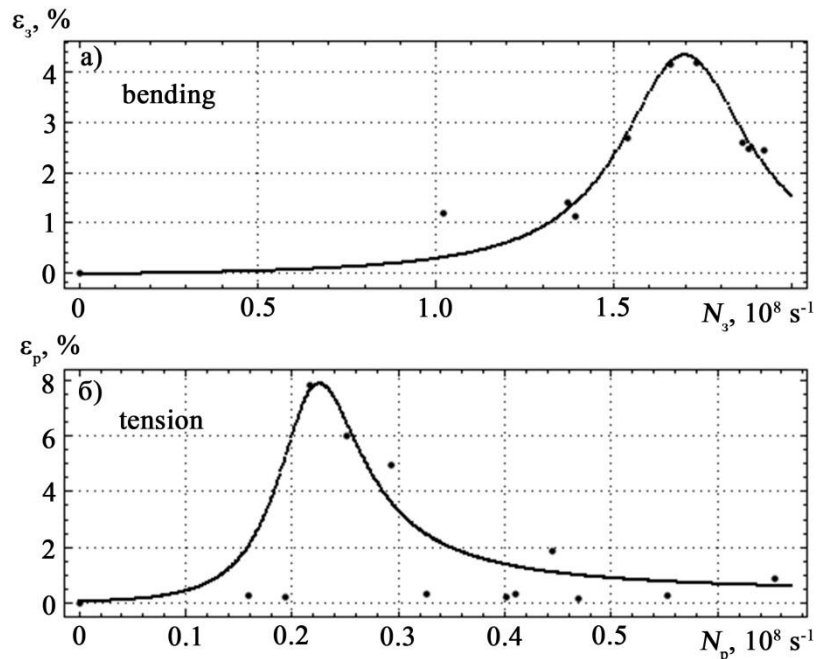


Рисунок 2 – Залежності відносної деформації (ε) від щільності АЕ сигналів (N) для згину (а) і розтягу (б)

При оцінці працездатності металевих конструкцій методами АЕ доводиться вирішувати обернену задачу за значеннями АЕ сигналів у моменти реєстрації виникнення явища АЕ визначити величини навантажень на виріб. Це може бути виконано з використанням апроксимаційних поліномів.

Апроксимаційні поліноми залежностей відносної деформації від густини АЕ сигналів $\varepsilon_p(N)$ або $\varepsilon_z(N)$ для розтягу та згину мають вигляд:

$$\varepsilon_p(N) = \frac{-0.094N^2 + 0.348N - 0.108}{N^2 - 3.394N + 2.929}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_z(N) = \frac{0.238N^2 + 0.022N + 0.002}{N^2 - 0.436N + 0.049}. \quad (3)$$

При апроксимації отримана крива, що згладжує, зовсім не обов'язково проходить через всі вузлові точки і являє собою загальну тенденцію і закономірність.

Значення коефіцієнтів детермінації апроксимаційних поліномів дорівнюють 0,9799 для розтягу та 0,9683 для згину. Значення середньоквадратичних похибок становлять 0,2762 для розтягу та 0,9683 для згину. При отриманні цих значень використовувався пакет програм Matematica 9.0.

Очікуваний ефект від впровадження процесу визначення стану металевих конструкцій полягає в:

- збільшенні міжремонтного періоду роботи;
- підвищенні експлуатаційного ККД обладнання;
- забезпеченні надійності устаткування;
- зменшенні затрат на технічне обслуговування;
- спостереженні за станом безперервного працюючого обладнання.

При багатопараметричному навантаженні для визначення запасу міцності слід враховувати як змінюються параметри деформації при зміні параметрів навантаження щодо граничного стану. Гранична крива області працездатності конструкцій у складних умовах представлена на рис. 3.

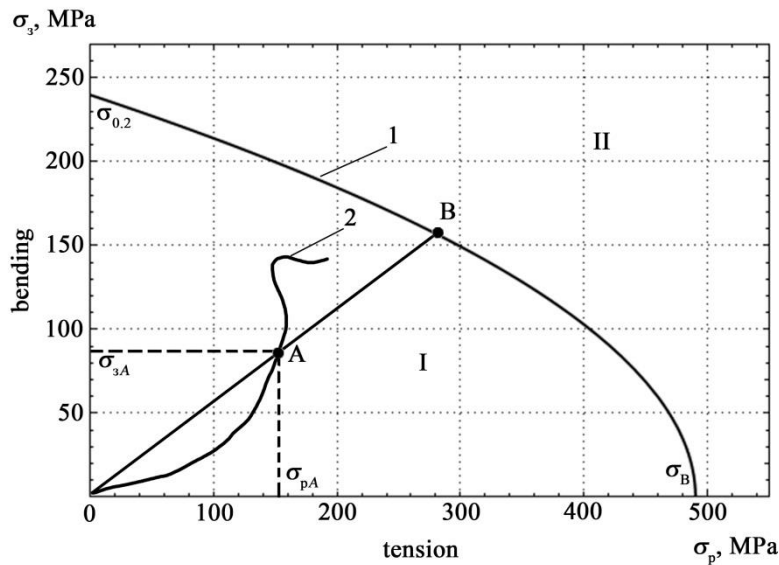


Рисунок 3 – Гранична крива 1 та траєкторія навантаження 2 в координатах механічної напруги (I – область працездатності, II – область руйнування)

Для довільної точки *A* геометрично коефіцієнт залишкового ресурсу дорівнює відношенню відрізка *OB* до відрізка *OA*:

$$\lambda = \frac{OB}{OA} \geq 1. \tag{4}$$

В області існування закону Гука напруга пропорційна деформації, однак у періоди експлуатації, коли можлива наявність пікових навантажень та відхилень від нормативних технологічних параметрів використання обладнання, крива напруга-деформація виходить за область закону Гука. Тому рис. 3 має бути перебудований у координатах $\varepsilon_s = f(\varepsilon_p)$ аж до руйнування. Такий графік представлений на рис. 4 у вигляді граничної кривої, що відокремлює область працездатності від руйнування.

Аналіз рис. 4 показує, що на граничній кривій є дві чітко виражені ділянки з різним характером залежності $\varepsilon_s = f(\varepsilon_p)$: перша ділянка характеризується швидкою зміною деформації розтягу при незначних змінах деформації згину та відповідає значенням відносної деформації розтягу в діапазоні $\varepsilon_p \in (0; 0,34)$ та згину в діапазоні $\varepsilon_s \in (0,8; 4,19)$, друга ділянка характеризується повільною зміною деформації розтягу при великих змінах деформації згину та відповідає значенням відносної деформації розтягу в діапазоні $\varepsilon_p \in (0,34; 7,8)$ та згину в діапазоні $\varepsilon_s \in (0; 0,8)$.

Умовою працездатності є невихід траєкторії навантаження за межі області визначення стану працездатності конструкції. Користуючись представленими залежностями можна визначити значення деформаційних характеристик матеріалу за даними АЕ вимірювань.

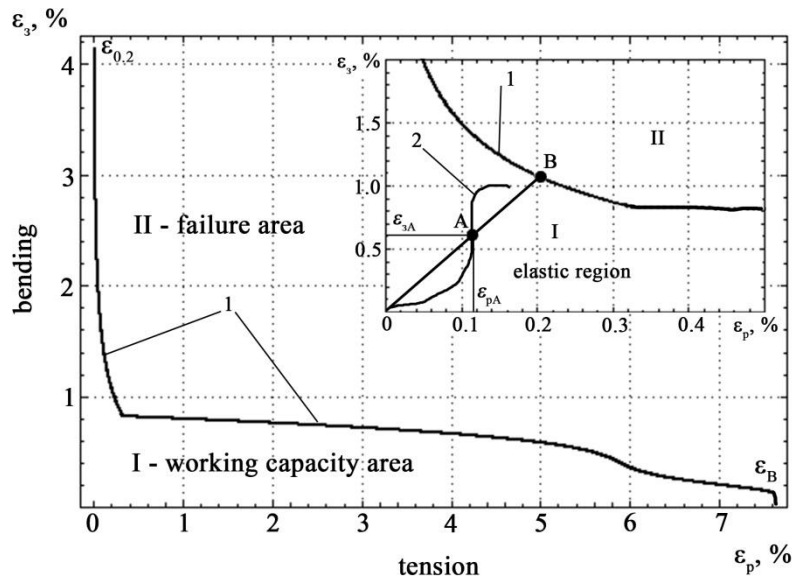


Рисунок 4 – Гранична крива 1 у координатах відносної деформації (I – область працездатності, II – область руйнування), на вставці показано ділянку граничної кривої 1, що відповідає зоні пружної деформації та траєкторія можливого навантаження 2

Виконавши вимірювання щільності АЕ сигналів, користуючись граничними кривими можна визначити відповідні значення залишкового ресурсу. Для цього необхідно нанести на графік рис. 4 координати точки *A*, які відповідають відносній деформації при навантаженні за даними АЕ вимірювань і провести через цю точку з початку координат промінь до перетину з граничною кривою. Визначивши таким чином положення точки *A* можна знайти коефіцієнт залишкового ресурсу λ через відношення відрізків *OB* до *OA*.

Оскільки АЕ вимірювання залишкової деформації при розтягу та згині відрізняються на порядок, то внесок кожної зі складових у координату точки *A*, який визначається за щільністю імпульсів АЕ сигналу, буде відрізнятися і за частотою. Використання в експериментальній установці частотного фільтра дозволяє окремо виділити низько та високочастотні складові АЕ сигналу, визначивши таким чином ε_p та ε_3 .

Розміщення АЕ датчиків при контролі залишкового ресурсу підшипників і валопроводів турбонагнітачів NR34/S 102 головного двигуна MAN B&W9L 32/40 передбачає їх встановлення у лабиринтному ущільненні компресорної частини, у притискній втулці підшипника ковзання та у лабиринтному ущільненні турбінної частини.

При оцінці залишкового ресурсу та діагностування технічного стану виробів необхідно використовувати заздалегідь призначені контрольні рівні надійності. Технічний стан валів та підшипників турбін діагностується за рівнями надійності:

- надійний рівень справного технічного стану, в якому інтервал коефіцієнта залишкового ресурсу $\lambda=1,3 \dots 1,1$;
- частково надійний рівень $\lambda=1,1 \dots 1,0$;
- аварійний рівень, який характеризує стан сухого тертя підшипників, що призводить їх до поломки, $\lambda=1$ і менше.

При створенні системи ідентифікації стану залишкового ресурсу турбонагнітачів з використанням методу акустичної емісії необхідне виконання наступних етапів:

- на основі досвіду експлуатації встановлювати причини, що призводять до відмов обладнання;
- виявляти діагностичні параметри об'єктів;
- встановлювати зв'язки діагностичних параметрів з технічним станом об'єкта;
- встановлювати граничне значення параметрів, що характеризують перехід контрольованого об'єкта в інший клас технічного стану;

- розробляти методи вимірювання діагностичних параметрів;
- визначати обсяги, періодичність та послідовність випробувань.

Збільшення діагностичних сигналів пропорційне збільшенню зносу, втрати безпеки та зменшенню залишкового ресурсу агрегату.

Для збудження та прийому акустичних хвиль можуть бути використані безконтактні електромагнітно-акустичні перетворювачі або перетворювачі з сухим точковим контактом. Це дозволяє проводити аналіз та інтерпретацію даних або безпосередньо на судні, або шляхом передачі даних до центру віддаленої діагностики каналами радіозв'язку.

Моніторинг стану за основними параметрами дозволяє полегшити підтримку працездатності суднового обладнання у морі та зменшити обсяг техобслуговування. Діагностична система моніторингу акустичних параметрів турбонагнітача може складатися зі змінної кількості інтелектуальних вимірювачів стану вузлів, центрального комп'ютера, розташованого на борту судна та віддаленого комп'ютера на березі з можливістю конфігурації та аналізу АЕ сигналів через Інтернет.

При вимірюваннях у реальних умовах роботи турбонагнітача датчик АЕ сприймає не тільки сигнал, що несе корисну інформацію, але і сторонні сигнали викликані високою віброактивністю працюючих агрегатів. Для виділення корисної інформації в експериментальній установці застосована фільтрація сигналів. Це дозволяє виділити корисний сигнал за допомогою часової селекції.

Встановлено, що стан матеріалів валів та підшипників турбін залежить від ударів та вібрації. При експлуатації виробів суднової енергетичної установки моменти зіткнення різних деталей і механізмів відбуваються в певні проміжки часу або при обертальному русі в певні кутові проміжки фазового стану механізму. Включаючи реєструючу апаратуру тільки в моменти виникнення корисного сигналу можна значно зменшити кількість факторів, що заважають діагностиці в процесі експлуатації.

Отримані експериментальні результати дозволяють вирішити завдання моніторингу технічного стану елементів турбонагнітачів. Для цього потрібно розробити діагностичну модель. Діагностична модель встановлює зв'язок між станом системи та її відображенням у просторі діагностичних сигналів. Діагностичними параметрами можуть бути: сила тертя, тепловиділення, інтенсивність зношування, вібрації та ін. Структурними параметрами можуть бути: фізико-механічні властивості мастильних матеріалів; фізико-механічні характеристики вузлів тертя та ін.

Висновки

1. Отримані експериментальні результати дозволяють вирішити завдання моніторингу технічного стану елементів турбонагнітачів. Для цього необхідно виконати вимірювання щільності АЕ сигналів, за якими, користуючись залежностями $\varepsilon=f(N)$ для розтягу та згину визначити відповідні значення залишкових деформацій, за якими можна знайти величину залишкового ресурсу та запасу міцності матеріалу турбонагнітачів. Підвищення точності прогнозних оцінок величини залишкового ресурсу можна досягти використанням апроксимаційних поліномів.

2. Отримані результати можуть служити модельним уявленням вивчення властивостей і прогнозування залишкового ресурсу конструкцій. Створені засоби технологічного та інформаційного забезпечення процесів діагностики в умовах невизначеності характеру і величини навантажень дозволяють отримати деформаційні і міцнісні характеристики матеріалів не залежно від форми і виду навантаження.

3. Висока інформативність і точність визначення залишкового ресурсу матеріалів за результатами АЕ вимірювань дозволяє підвищити рівень ідентифікації стану і діагностики матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Marasanov V., Stepanchikov D., Sharko A., Sharko O. Technology for Determining the Residual Life of Metal Structures Under Conditions of Combined Loading According to Acoustic Emission Measurements. *Data Stream Mining & Processing*. 2020. V. 1158. P. 202–217.
2. Louda P., Sharko A., Stepanchikov D. An Acoustic Emission Method for Assessing the Degree of Degradation of Mechanical Properties and Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses. *Materials* 2021, V. 14, N 9. P. 2090.
3. Lyasota I., Sarniak Ł., Kustra P. Acoustic emission analysis of the plastic deformation stages of degraded low-carbon steel after long-term operation in the oil refining and petrochemical processing. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2019. V. 64, N 1. P. 143–151.
4. Nedoseka A.Ya., Nedoseka S. A., Ovsienko M. A., Yeremenko M. A., Gereb Ya., Kushnirenko S. A. Testing of pressure vessels by an international expert team. *Tech. Diagn. Non Destr. Test*. 2016. N 3. P. 3–10.
5. Porziani S., Augugliaro G., Brini F., Brutti C., Chiappa A., Groth C., Mennuti C., Quaresima P., Salvini P., Zanini A., Biancolini M.E. Structural integrity assessment of pressure equipment by Acoustic Emission and data fractal analysis. *Procedia Structural Integrity*. 2020. N 25. P. 246–253.
6. Chisari, C., Guarnaccia, C., Rizzano, G. Numerical simulation of acoustic emission activity in reinforced concrete structures by means of finite element modelling at the macroscale (2020) *Structural Health Monitoring*. 2020. V. 19, N 2. P. 537–551.
7. Nedoseka A., Nedoseka S., Markashova L., Kushnareva O. On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data. *Tech. Diagn. Nondestr. Test*. 2016. N 4. P. 9–13.
8. Thor M., Plasser H., Nagler M., Maier F., Hinterhölzl R.M., Sause M. G. R. Combining digital image correlation, passive thermography and acoustic emission to investigate damage initiation and propagation of out-of-plane fiber waviness *International Conferences on Composite Materials*. 2019.
9. Dai C., Cheng T., Zong L., Luo X. A study on spectrum characteristics of red sandstone acoustic emission signals based on improved EEMD. *Journal of Vibration and Shock*. 2018. V. 37, N 16. P. 118–123.
10. Sause M. G. R., Schmitt S., Kalafat S. Failure load prediction for fiber-reinforced composites based on acoustic emission. *Composites Science and Technology*. 2018. N. 164. P. 24–33.
11. Zou Z.-Y., Liu Z.-L., Han S.-T., Li Q., Zhao S.-Y., Guo B.-F. Safety margin analysis of elastoplastic strength for a press lower beam based on shakedown. *Journal of Plasticity Engineering*. 2020. V. 27, N 12. P. 198–202.
12. Bathurst R. J., Miyata Y., Allen T. M. Deterministic and probabilistic assessment of margins of safety for internal stability of as-built PET strap reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*. 2020. V. 48, N6. P. 780–792.
13. Liepa L., BlazeVICIUS G., MerkeVICIUTE D., Atkociunas J. Structural shakedown: a new methodology for estimating the residual displacements. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016. V. 22, N 8. P. 1055–1065.
14. NogueroL, T. M., Barousse, R., Amrhein, T. J., Royuela-Del-val, J., Montesinos, P., Luna, A. Optimizing diffusion-tensor imaging acquisition for spinal cord assessment. *Physical basis and technical adjustments Radiographics*. 2020. V. 40, N2, P. 403–427.
15. Khajehzadeh M., Boostanipour O., Reza Razfar M. Finite element simulation and experimental investigation of residual stresses in ultrasonic assisted turning. *Ultrasonics* 2020. V. 108, art. no. 106208.
16. Шибков А. А., Золотов А. Е., Желтов М. А. Акустический предвестник неустойчивой пластической деформации алюминий-магниевого сплава АМгб. *Физика твердого тела*. 2010. Т. 52, №11. С.2223–2231.
17. Поляков В. В., Егоров А. В., Свистун И. Н. Акустическая эмиссия при деформации пористого железа. *Письма в журнал технической физики*, 2001. Т.27, № 11, С.14–18.

18. Скальський В. Р., Станкевич О. М., Клим Б. П., Почапський Є. П. Особливості програмного забезпечення акустико-емісійних засобів діагностування. *Техн. діагностика та неруйн. контроль*. 2010. №3, С. 5–13.

19. Moussa, G. S., Owais, M. Pre-trained deep learning for hot-mix asphalt dynamic modulus prediction with laboratory effort reduction. *Construction and Building Materials*. 2020. N 265, art. no. 120239.

20. Li, B., Guo, X., Fang, H., Ren, J., Yang, K., Wang, F., Tan, P. Prediction equation for maximum stress of concrete drainage pipelines subjected to various damages and complex service conditions. *Construction and Building Materials*. 2020. N 264, art. no. 120238.

21. Marani, A., Nehdi, M. L. Machine learning prediction of compressive strength for phase change materials integrated cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 2020. N 265, art. no. 120286.

22. Nazari, S., Bahiraei, M., Moayedi, H., Safarzadeh, H. A proper model to predict energy efficiency, exergy efficiency, and water productivity of a solar still via optimized neural network. *Journal of Cleaner Production*. 2020. N 277, art. no. 123232.

23. Fan, Z., Diao, X., Hu, K., Zhang, Y., Huang, Z., Kang, Y., Yan, H. Structural health monitoring of metal-to-glass ceramics penetration during thermal cycling aging using femto-laser inscribed FBG sensors. *Scientific Reports*. 2020. V.10, N1, art. no. 12330.

24. He, Y., Li, M., Meng, Z., Chen, S., Huang, S., Hu, Y., Zou, X. An overview of acoustic emission inspection and monitoring technology in the key components of renewable energy systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. N148, art. no. 107146.

25. Ma, J., Zhang, H., Shi, Z., Chu, F., Gu, F., Ball, A.D. Modelling Acoustic Emissions induced by dynamic fluid-asperity shearing in hydrodynamic lubrication regime. *Tribology International*. 2021. N 153, art. no. 106590.

26. Mirgal, P., Pal, J., Banerjee, S. Online acoustic emission source localization in concrete structures using iterative and evolutionary algorithms. *Ultrasonics*. 2020. N 108, art. no. 106211.

27. Xu, G., Hou, D., Qi, H., Bo, L. High-speed train wheel set bearing fault diagnosis and prognostics: A new prognostic model based on extendable useful life. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. N 146, art. no. 107050.

28. Алексенко В. Л., Шарко А. А., Сметанкин С. А., Степанчиков Д. М., Юренин К. Ю. Обнаружение акустико-эмиссионных эффектов при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп. *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. 2017. №4. С. 25–31.

29. Алексенко В. Л., Шарко А. А., Шарко А. В., Степанчиков Д. М., Юренин К. Ю. Идентификация структурных особенностей механизмов деформирования при изгибе методом акустической эмиссии. *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. 2019. №1. С. 32–39.

REFERENCES

1. Marasanov V., Stepanchikov D., Sharko A., Sharko O. (2020). Technology for Determining the Residual Life of Metal Structures Under Conditions of Combined Loading According to Acoustic Emission Measurements. *Data Stream Mining & Processing*, V. 1158. 202–217.

2. Louda P., Sharko A., Stepanchikov D. (2021). An Acoustic Emission Method for Assessing the Degree of Degradation of Mechanical Properties and Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses. *Materials*, V. 14, N 9. 2090.

3. Lyasota I., Sarniak Ł., Kustra P. (2019). Acoustic emission analysis of the plastic deformation stages of degraded low-carbon steel after long-term operation in the oil refining and petrochemical processing. *Archives of Metallurgy and Materials*, V. 64, N 1. 143–151.

4. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A., Ovsienko M. A., Yeremenko M. A., Gereb Ya., Kushnirenko S. A. (2016). Testing of pressure vessels by an international expert team. *Tech. Diagn. Non Destr. Test.*, N 3. 3–10.

5. Porziani S., Augugliaro G., Brini F., Brutti C., Chiappa A., Groth C., Mennuti C., Quaresima P., Salvini P., Zanini A., Biancolini M.E. (2020). Structural integrity assessment of pressure equipment by Acoustic Emission and data fractal analysis. *Procedia Structural Integrity*, N 25. 246–253.
6. Chisari, C., Guarnaccia, C., Rizzano, G. (2020). Numerical simulation of acoustic emission activity in reinforced concrete structures by means of finite element modelling at the macroscale (2020) *Structural Health Monitoring*, V. 19, N 2. 537–551.
7. Nedoseka A., Nedoseka S., Markashova L., Kushnareva O. (2016). On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data. *Tech. Diagn. Nondestr. Test.*, N 4. 9–13.
8. Thor M., Plasser H., Nagler M., Maier F., Hinterhölzl R. M., Sause M. G. R. (2019). Combining digital image correlation, passive thermography and acoustic emission to investigate damage initiation and propagation of out-of-plane fiber waviness *International Conferences on Composite Materials*.
9. Dai C., Cheng T., Zong L., Luo X. (2018). A study on spectrum characteristics of red sandstone acoustic emission signals based on improved EEMD. *Journal of Vibration and Shock.*, V. 37, N 16. 118–123.
10. Sause M.G.R., Schmitt S., Kalafat S. (2018). Failure load prediction for fiber-reinforced composites based on acoustic emission. *Composites Science and Technology*, N. 164. 24–33.
11. Zou Z.-Y., Liu Z.-L., Han S.-T., Li Q., Zhao S.-Y., Guo B.-F. (2020). Safety margin analysis of elastoplastic strength for a press lower beam based on shakedown. *Journal of Plasticity Engineering*, V. 27, N 12. 198–202.
12. Bathurst R. J., Miyata Y., Allen T. M. (2020). Deterministic and probabilistic assessment of margins of safety for internal stability of as-built PET strap reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, V. 48, N 6. 780–792.
13. Liepa L., BlazeVICIUS G., MerkeVICIUTE D., Atkociunas J. (2016). Structural shakedown: a new methodology for estimating the residual displacements. *Journal of Civil Engineering and Management*, V. 22, N 8. 1055–1065.
14. Noguerol, T. M., Barousse, R., Amrhein, T. J., Royuela-Del-val, J., Montesinos, P., Luna, A. (2020). Optimizing diffusion-tensor imaging acquisition for spinal cord assessment. *Physical basis and technical adjustments Radiographics*. V. 40, N2. 403–427.
15. Khajehzadeh M., Boostanipour O., Reza Razfar M. (2020). Finite element simulation and experimental investigation of residual stresses in ultrasonic assisted turning. *Ultrasonics*. V. 108, art. no. 106208.
16. Shibkov A. A., Zolotov A. E., Zheltov M. A. (2010). Acoustic precursor of unstable plastic deformation in the aluminum-magnesium alloy AMg6. *Physics of the Solid State*. V. 52, N11. 2223–2231.
17. Polyakov V. V., Egorov A. V., Svistun I. N. (2001). Deformation-induced acoustic emission from porous iron. *Technical Physics Letters* V. 27, N11. 937–939.
18. Skalskii V. R., Stankevich O. M., Klim B. P., Pochapskii E. P. (2010). Features of software of acoustic-emission diagnostic means. *Tech. Diagn. Non Destr. Test.*, N3. 5–13.
19. Moussa, G. S., Owais, M. (2020). Pre-trained deep learning for hot-mix asphalt dynamic modulus prediction with laboratory effort reduction. *Construction and Building Materials*. N 265, art. no. 120239.
20. Li, B., Guo, X., Fang, H., Ren, J., Yang, K., Wang, F., Tan, P. (2020). Prediction equation for maximum stress of concrete drainage pipelines subjected to various damages and complex service conditions. *Construction and Building Materials*. N 264, art. no. 120238.
21. Marani, A., Nehdi, M. L. (2020). Machine learning prediction of compressive strength for phase change materials integrated cementitious composites. *Construction and Building Materials*. N 265, art. no. 120286.

22. Nazari, S., Bahiraei, M., Moayedi, H., Safarzadeh, H. (2020). A proper model to predict energy efficiency, exergy efficiency, and water productivity of a solar still via optimized neural network. *Journal of Cleaner Production*. N 277, art. no. 123232.
23. Fan, Z., Diao, X., Hu, K., Zhang, Y., Huang, Z., Kang, Y., Yan, H. (2020). Structural health monitoring of metal-to-glass ceramics penetration during thermal cycling aging using femto-laser inscribed FBG sensors. *Scientific Reports*. V.10, N1, art. no. 12330.
24. He, Y., Li, M., Meng, Z., Chen, S., Huang, S., Hu, Y., Zou, X. (2021). An overview of acoustic emission inspection and monitoring technology in the key components of renewable energy systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. N148, art. no. 107146.
25. Ma, J., Zhang, H., Shi, Z., Chu, F., Gu, F., Ball, A.D. (2021). Modelling Acoustic Emissions induced by dynamic fluid-asperity shearing in hydrodynamic lubrication regime. *Tribology International*. N 153, art. no. 106590.
26. Mirgal, P., Pal, J., Banerjee, S. (2020). Online acoustic emission source localization in concrete structures using iterative and evolutionary algorithms. *Ultrasonics*. N 108, art. no. 106211.
27. Xu, G., Hou, D., Qi, H., Bo, L. (2021). High-speed train wheel set bearing fault diagnosis and prognostics: A new prognostic model based on extendable useful life. *Mechanical Systems and Signal Processing*. N 146, art. no. 107050.
28. Aleksenko V., Sharko A., Smetankin S., Stepanchikov D., Yurenin K. (2017). Detection of Acoustic-Emission Effects During Reloading of St3sp Steel Specimens. *Tech. Diagn. Non Destr. Test.*, N4. 25–31.
29. Aleksenko V.; Sharko A.; Sharko A.; Stepanchikov D.; Yurenin K. (2019). Identification by Acoustic Emission Method of Structural Features of Deformation Mechanisms at Bending. *Tech. Diagn. Non Destr. Test.*, N1. 32–39.

Шарко А. В., Клевцов К. Н., Акимов А. В., Степанчиков Д. М., Шарко А. А. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ОСТАЛЬНОГО РЕСУРСА, МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТУРБОНАГНИТАТЕЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Представлены методология и результаты определения остаточного ресурса турбонагнетателей методами неразрушающих испытаний. На основе синтеза результатов взаимосвязи акустических и механических свойств материалов и обобщения опыта эксплуатации турбонагнетателей разработана система диагностики технического состояния материалов турбонагнетателей. Получена граничная кривая области работоспособности материала конструкции турбонагнетателя в координатах относительной деформации вплоть до разрушения. Условием работоспособности является невыход траектории нагрузки за пределы области определения состояния работоспособности конструкции. Используя представленные зависимости можно определить значение деформационных характеристик материала по данным АЭ измерений. Выполнив измерение плотности сигналов акустической эмиссии, и пользуясь граничными кривыми можно определить соответствующие значения остаточного ресурса. Показано, что плотности акустико-эмиссионного сигнала при измерениях остаточной деформации при растяжении и изгибе отличаются на порядок. Это позволяет с помощью частотной фильтрации отдельно выделить низко и высокочастотные составляющие акустико-эмиссионного сигнала и определить относительные деформации изгиба и растяжения на основе единого информационного сигнала. Предложена схема размещения датчиков акустической эмиссии при контроле остаточного ресурса подшипников и валопроводов турбонагнетателей NR34/S 102 главного двигателя MAN B&W9L 32/40. Высокая информативность и точность определения остаточного ресурса материалов по результатам акустических измерений позволяет повысить уровень идентификации состояния материалов. Для возбуждения и приема акустических волн могут использоваться бесконтактные электромагнитно-акустические преобразователи или преобразователи с сухим точечным контактом. Это позволяет проводить анализ и интерпретацию данных либо непосредственно на судне, либо путем передачи данных в центр удаленной диагностики по каналам радиосвязи. Полученные результаты могут служить модельным представлением для изучения свойств и прогнозирования остаточного ресурса конструкций.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, турбонагнетатель, остаточный ресурс, идентификация состояния.

Sharko O. V., Klevtsov K. M., Akimov O. V., Stepanchikov D. M., Sharko A. O. IDENTIFICATION OF THE STATE OF THE REMAINING RESOURCE, MECHANICAL AND THERMODYNAMIC PROCESSES IN TURBOCHARGER USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

The methodology and results of determining the residual life of turbochargers by non-destructive testing methods are presented. The system of technical condition diagnostics of materials of turbochargers on the basis of synthesis of results of acoustic interrelation and mechanical properties of materials and generalization of operation experience of turbochargers is developed. The boundary curve of the efficiency region of the turbocharger construction material in the coordinates of relative deformation up to fracture is obtained. The corresponding values of the residual resource are determined by measuring the density of acoustic emission signals and using limit curves. The condition of working capacity is the failure of the load trajectory outside the area of determining the state of performance of the structure. Using the presented dependences it is possible to define values of deformation characteristics of material according to AE of measurements. It is shown that the density of the acoustic emission signal when measuring the residual strain during tension and bending differ by an order of magnitude. This makes it possible to separate the low and high frequency components of the acoustic emission signal by means of frequency filtering and to determine the relative bending and tensile deformations on the basis of a single information signal. The scheme of placement of sensors of acoustic emission at control of a residual resource of bearings and shaft lines of turbochargers NR34 / S 102 of the main engine MAN B&W9L 32/40 is offered. High informativeness and accuracy of determining the residual life of materials based on the results of acoustic measurements allows to increase the level of identification of the state of materials. Non-contact electromagnetic-acoustic transducers or dry point contact transducers can be used to excite and receive acoustic waves. This allows the analysis and interpretation of data either directly on board or by transmitting data to a remote diagnostic center via radio. The obtained results can serve as a model representation of studying the properties and forecasting the residual life of structures.

Keywords: *acoustic emission, turbocharger, residual life, state identification.*

© Шарко О. В., Клевцов К. М., Акімов О. В., Степанчиков Д. М., Шарко А. О.

Статтю прийнято
до редакції 21.10.21