

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

М.О.Карпаш, Є.Р.Доценко, О.М.Карпаш, В.Я.Попович

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504708,
e-mail: m k a r p a s h @ n u n g . e d u . u a*

Рассмотрена возможность определения напряжений, что возникают в стенке металлоконструкций продолжительной эксплуатации на примере шатуна станка-качалки на основании комплексного учета нескольких параметров – коэрцитивной силы и остаточной индукции.

Приведены результаты обработки экспериментальных данных из исследований образца шатуна на статичное растяжение.

Путем анализа характера зависимости коэрцитивной силы и остаточной индукции от напряжений было обнаружено явление деградации упругих свойств материала шатуна станка-качалки после каждого этапа исследований.

В процесі експлуатації металокопструкції нафтогазової промисловості зазнають значних статичних, циклічних та динамічних навантажень розтягу, стиску та згину. Це призводить до зміни напружено-деформованого стану (НДС), у тому числі і до незворотних змін у структурі металу. Вказані чинники негативно впливають на залишковий ресурс об'єкта і можуть стати причиною виникнення втомних дефектів та руйнування копструкції [1]. Одним із завдань Державної науково-технічної програми „Ресурс”, у рамках якої виконувались описані в статті дослідження, є розроблення методів визначення залишкового ресурсу металокопструкцій в основних галузях промисловості [2].

З літератури відомо, що згадані зміни в структурі металу можуть бути виявлені та оцінені з допомогою магнітних властивостей сталі, зокрема коерцитивної сили [3] та залишкової індукції [4].

Оцінка напружено-деформованого стану матеріалу металокопструкцій є важливим науково-технічним завданням, розв'язання якого дасть змогу оцінити фактичний технічний стан та продовжити термін їх експлуатації. Найбільш економічно та технічно доцільно в даному випадку використати методи неруйнівного контролю [5].

Метою даної роботи є встановлення експериментальним шляхом залежності між величиною напружень, що виникають у матеріалі шатуна верстата-гойдалки та структурно чутливими характеристиками матеріалу.

Шатуни є трубними елементами верстатів-гойдалок типу 7 СК8, які використовуються в процесі насосної експлуатації нафтогазових свердловин. Обраний зразок уже перебував в експлуатації на одному з родовищ Надвірнянського нафтогазовидобувного управління про-

The possibility of stress evaluation which induces in metallic construction materials during its long term use was considered. The sample of piston rod of a pumping unit is used for experimental investigations. Several informative parameters should be taken into account for the evaluation of stresses – coercivity and remanent magnetization.

The results of experimental investigations during tensile tests of piston rod sample are given and described.

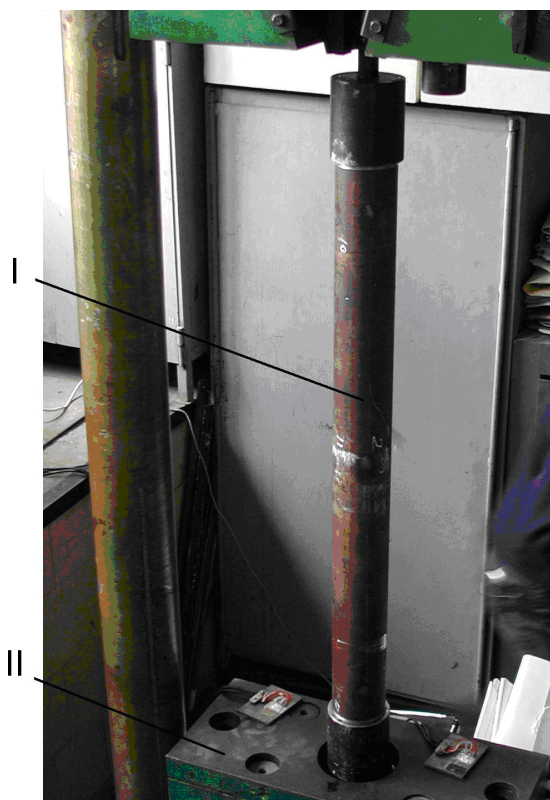
The phenomenon of elastic properties degradations after each cycle of loading at tensile test was found by analysis of dependencies of stress on coercivity and remanent magnetization.

тягом невизначеного часу. Під час роботи шатуни зазнають деформації поздовжнього розтягу: діапазон навантажень 20...60 kN [6]; тип навантаження – циклічний; частота коливань шатунів під час роботи становить 5,5...6,5 коливань/хвилину; типові напруження в стінці металу шатунів за нормальних умов роботи не перевищують 12...18 МПа. Шатуни вказаного типу виготовляються зі сталі марки Ст4 (межа текучості – 240...265 МПа, межа міцності 420...520 МПа). Проведення експериментальних досліджень на статичний розтяг на розривній машині з максимальним навантаженням 50 тон є адекватний умовам експлуатації шатунів, а напруження в зразку не перевищують межі текучості. Зразок шатуна було обрано з такими параметрами: загальна довжина – 960 mm, довжина гладкої (без різьбової) частини – 785 mm, діаметр труби – 76 mm, товщина стінки – 10 mm.

Вказані відомості дали змогу провести експериментальні дослідження на базі лабораторії неруйнівного контролю та технічної діагностики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу згідно з розробленою методикою, суть якої полягає в наступному.

Досліджуваний зразок попередньо був обстежений за стандартною методикою [7] ультразвуковим методом контролю на предмет виявлення в ньому дефектів типу порушення суцільності матеріалу та перевірки відповідності фактичних геометричних розмірів до його номінальних значень.

Закріплений зразок шатуна (рис. 1) піддався статичному розтягу на розривній машині Р-50 (№ 3742, 1985 року випуску, ГОСТ 7855-74).



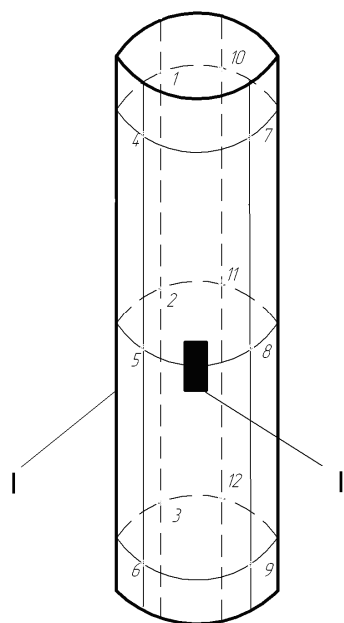
I – закріплений зразок шатуна;
II – розривна машина

Рисунок 1 – Загальний вигляд розривної машини Р-50 із закріпленням зразком

Експериментальні дослідження проводились у три етапи, детальні умови реалізації яких наведено в таблиці 1.

У ході виконання двох останніх етапів експерименту проводилась сумісна реєстрація показів тензодавача меандрового типу, закріпленого посередині зразка (рис. 2). Тензодавач після встановлення на зразку перед початком експерименту не демонтувався протягом усіх етапів досліджень.

Зауважимо, що, після здійснення кожного наступного кроку, навантаження на розривній машині витримувалось протягом 2-3 хвилин, достатніх для виконання вимірювань інформаційних параметрів (коерцитивної сили, індуктивного параметра, твердості).



I – зразок шатуна; II – тензометричний давач

Рисунок 2 – Схема розміщення точок вимірювання на зразку шатуна

Для врахування можливої анізотропії фізичних та механічних властивостей матеріалу шатуна на зразку було вибрано 12 точок вимірювання (рис.2).

Однократні вимірювання обраних інформаційних параметрів у вказаних точках проводились наступним чином на приладах:

- 1) з допомогою 16-ти розрядного аналогоцифрового перетворювача *MCP 3550*;
- 2) коерцитиметром *KPM-Ц-КЗ* (зав. № 3006, НВФ „Спеціальні наукові розробки”, м.Харків);
- 3) індуктометром *I-1* (НВФ “Зонд”, м. Івано-Франківськ);
- 4) твердоміром динамічним типу *ТДМ-1* (зав. № 690, НВФ „Ультракон-Сервіс”, м. Київ).

Після реалізації описаної методики експериментальних досліджень було здійснено математичне оброблення результатів вимірювань з допомогою кореляційного та графічного аналізу, використовуючи програмний пакет *Matlab 7.3*.

Таблиця 1 – Умови проведення експерименту

| Умови проведення експерименту | Етап експерименту | | | |
|------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|---------|
| | 1-ий етап | 2-ий етап | 3-ій етап | |
| Діапазон навантаження, т | 0 - 10 | 0 - 10 | 0 - 9 | 10 - 24 |
| Крок збільшення навантаження, т | 1 | 1 | 1 | 2 |
| Діапазон напружень, МПа | 0 - 48 | 0 - 48 | 0 - 115,2 | |
| Тензометричні вимірювання | Ні | Так | Так | |
| Вимірювання коерцитивної сили | Так | Так | Так | |
| Вимірювання індуктивного параметра | Так | Так | Так | |
| Вимірювання твердості | Ні | Так | Так | |

Таблиця 2 – Коефіцієнти кореляції між напруженнями та інформативними параметрами

| Кореляційна пара | № експерименту | | |
|---------------------------------|----------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| напруження-індуктивний параметр | 0,278 | 0,669 | 0,570 |
| напруження-коерцитивна сила | 0,827 | 0,955 | 0,877 |
| напруження-твердість | - | 0,500 | 0,824 |

Таблиця 3 – Коефіцієнти кореляції між сигналом тензодавача та інформативними параметрами

| Кореляційна пара | № експерименту | |
|---|----------------|-------|
| | 2 | 3 |
| сигнал від тензодавача-індукція | 0,633 | 0,570 |
| сигнал від тензодавача-коерцитивна сила | 0,941 | 0,859 |
| сигнал від тензодавача-твердість | 0,490 | 0,830 |

Для оцінки взаємозв'язку напружень у зразку шатуна з коерцитивною силою, індуктивним параметром та твердістю було розраховано коефіцієнти кореляції між напруженнями та усередненими за 12 точками значеннями показів вказаних вище приладів (табл.2). Значення коефіцієнтів кореляції отримано в середовищі *Matlab 7.3* із застосуванням стандартної функції *corrcoef (X, Y)*, де X та Y – змінні, між якими встановлюється взаємозв'язок.

З табл.2 бачимо, що взаємозв'язок напружень у стінці шатуна з індуктивним параметром та твердістю характеризується невисокими значеннями коефіцієнтів кореляції, що може вказувати на нелінійність такого зв'язку.

Чіткий взаємозв'язок між величиною напружень та коерцитивною силою, яка є структурно чутливим параметром [8], підтверджується високими значеннями коефіцієнтів кореляції для трьох послідовних етапів експериментальних досліджень. Залежність коерцитивної сили від напружень підтверджується дослідженнями інших вчених [9].

Графічні залежності осереднених значень коерцитивної сили (рис. 3) та індуктивного параметра (рис. 4) від механічних напружень підтверджують висновки, зроблені за результатами кореляційного аналізу. Для апроксимації результатів експерименту вирішено вибрати лінійну залежність, яка найкраще піддається опису.

Додатково згідно з графіками на рис. 3, 4 видно, що з кожним наступним етапом експерименту абсолютні значення коерцитивної сили та індуктивного параметра знижувалися. Така сумісна тенденція поступового деградування структурно чутливих параметрів може свідчити про зміни структурного стану матеріалу шатуна. Очевидно, що середня величина сил, які затримують незворотне зміщення меж між доменами, знижується за кожним циклом навантаження. Згідно теорії процесів намагнічення та перемагнічення, факторами, що затримують таке зміщення, можуть бути напруження, зумо-

влені дислокаціями та іншими причинами, градієнти напружень, межі фаз та зерен.

З огляду на це було вирішено проаналізувати залежності величини сигналу тензометричного давача від напружень в стінці металу шатуна для 2-го та 3-го етапів експерименту, зображених на рис. 5.

Згідно з рисунком 5 залежності мають лінійний характер, оскільки напруження в стінці металу не перевищують 120 МПа (межа текучості матеріалу шатуна не менше 240 МПа). Також згідно з рис. 5 кут нахилу прямої для 3-го експерименту є меншим від кута нахилу прямої для 2-го експерименту. Отже, пружні характеристики суттєво знизилась (~20%).

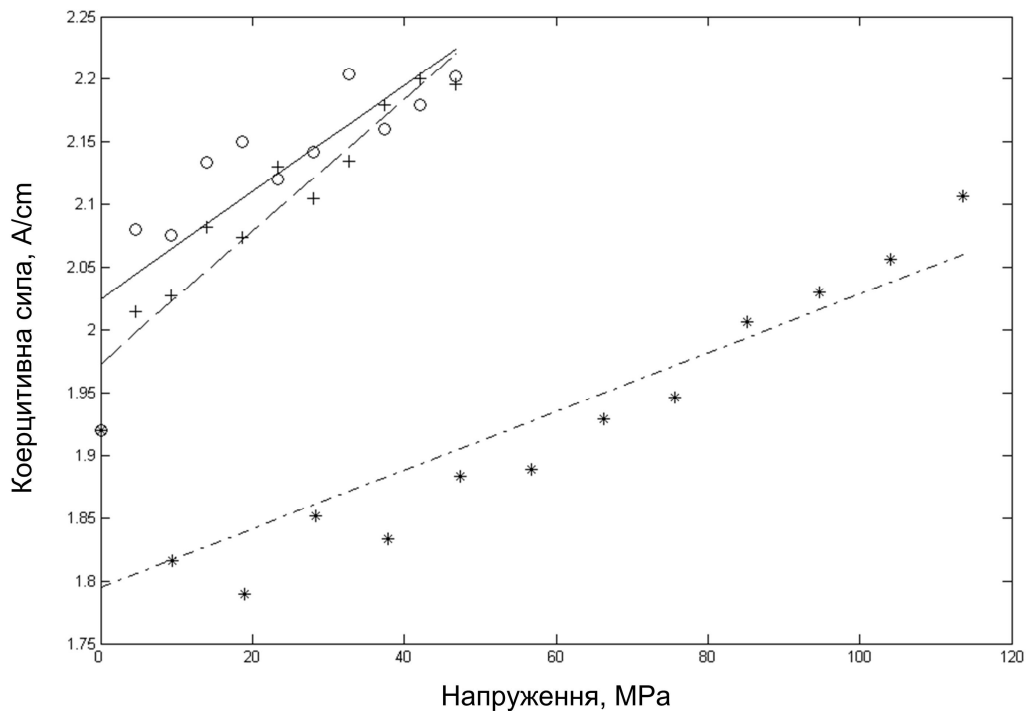
Результати, зроблені на основі аналізу взаємозв'язку напружень з коерцитивною силою та індуктивним параметром, підтверджують висновки щодо можливих змін у структурі металу шатуна.

Узгодженість результатів аналізу взаємозв'язку напружень у металі шатуна із інформативними параметрами та показами тензометричного давача стали підставою для оцінювання зв'язку сигналу від тензодавача з коерцитивною силою та індуктивним параметром. На основі цього були розраховані коефіцієнти кореляції між величиною сигналу та осередненими значеннями показів приладів (табл. 3).

Результати кореляційного аналізу (табл.3) вказують на чіткий взаємозв'язок між показами тензометричного давача та інформативними параметрами (твердістю, коерцитивною силою та індуктивним параметром).

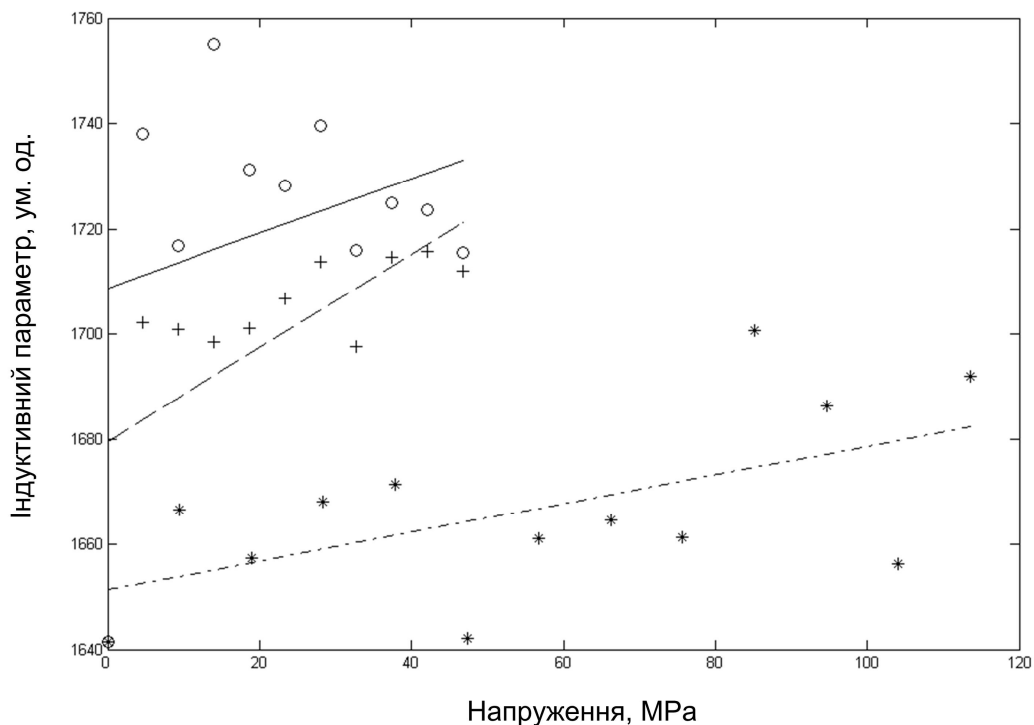
Суттєва схожість коефіцієнтів кореляції для відповідних інформативних параметрів у таблицях 2 та 3 вказує на можливість контролювання напружень у стінці металу шатуна за значеннями коерцитивної сили та індуктивного параметра.

Графіки на рисунках 6 та 7 ілюструють зроблені висновки: характер залежностей на рисунках 3 і 6 (для коерцитивної сили), а також на рисунках 4 і 7 (для індуктивного параметра) є аналогічними.



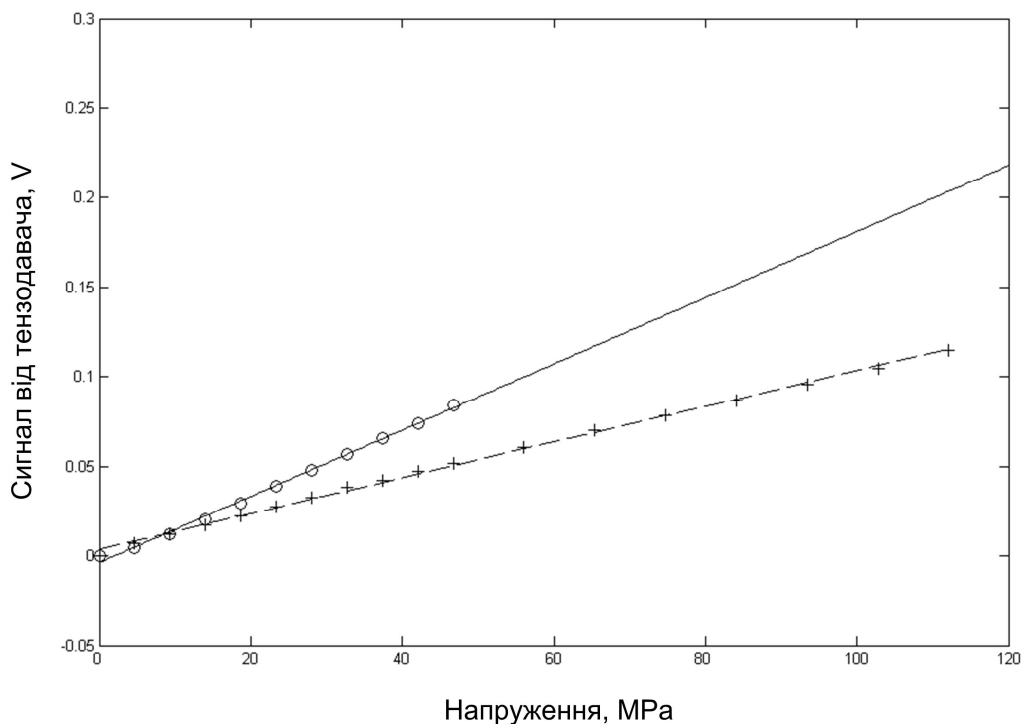
експериментальні дані: "o" – 1-й експеримент, "+" – 2-й експеримент, "*" – 3-й експеримент;
 лінійна апроксимація: "—" – 1-й експеримент, "- -" – 2-й експеримент, „- •” – 3-й експеримент

Рисунок 3 — Залежність значень коерцитивної сили від напружень для трьох етапів експерименту



експериментальні дані: "o" – 1-й експеримент, "+" – 2-й експеримент, "*" – 3-й експеримент;
 лінійна апроксимація: "—" – 1-й експеримент, "- -" – 2-й експеримент, „- •” – 3-й експеримент

Рисунок 4 — Залежність значень індуктивного параметра від напруження для трьох етапів експерименту



експериментальні дані: "о" – 2-й експеримент, "+" – 3-й експеримент;
лінійна апроксимація: "—" – 2-й експеримент, "- - -" – 3-й експеримент

Рисунок 5 — Залежність величини сигналу тензометричного давача від напружень

Наявність залежності показів твердоміра динамічного типу від величини напружень у стінці металу викликає сумніви щодо адекватності цих результатів, оскільки зміна міцнісних характеристик у межах дії закону Гука не знайшла поки що підтвердження в літературі.

Не надто високі значення коефіцієнтів кореляції коерцитивної сили та індуктивного параметра з напруженнями в стінці металу, що вказує на можливу нелінійність вказаних взаємозв'язків, зумовлюють комплексне врахування цих параметрів для аналізу напруженого стану металевих елементів.

Для уточнення та перевірки одержаних результатів планується провести додаткові експериментальні дослідження на використаному зразку шатуна зі сточеною на 1,5 mm товщиною стінки відповідно до розробленої методики досліджень. При цьому діаметр труби становитиме 73 mm, а напруження в стінці шатуна при навантаженні 24 тони становитиме 140 МПа.

Характер залежностей коерцитивної сили та індуктивного параметра від напружень в стінці металу для різних етапів досліджень, які вказують на можливі зміни в структурі металу, є підставою для розроблення нової методики експериментальних досліджень, яка б передбачала визначення мікроструктури сталі на різних стадіях та циклах навантаження із сумісним вимірюванням інформативних структурно чутливих параметрів.

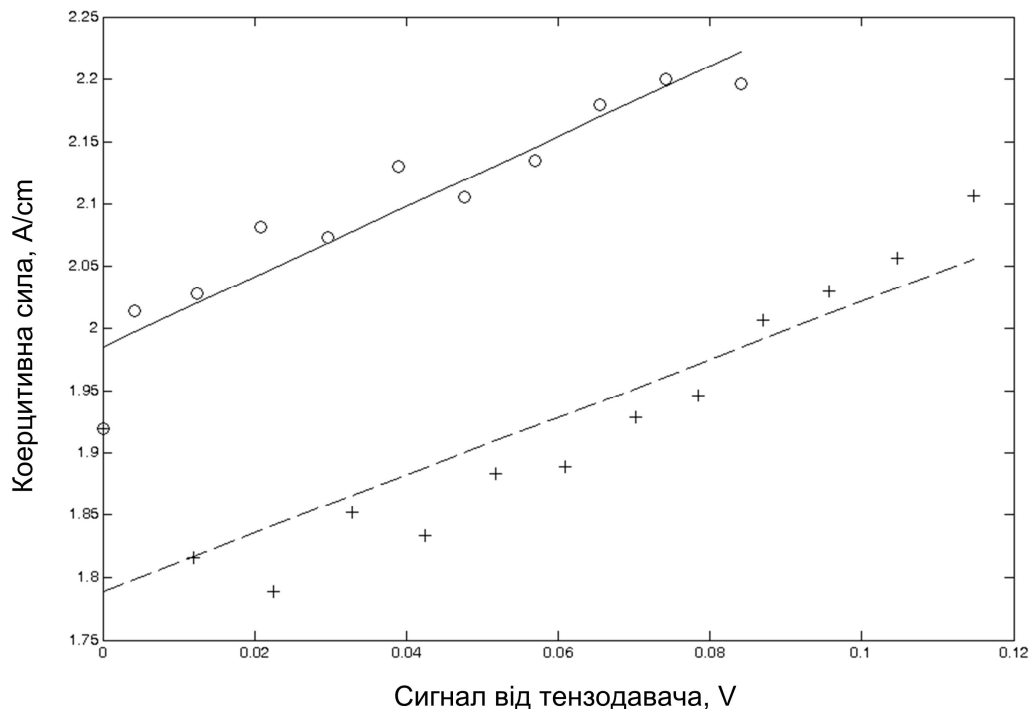
Таким чином, аналіз результатів описаних експериментальних досліджень дають підставу для формулювання таких висновків.

Висновки

1) Встановлено можливість контролювання напружень шатунів верстатів-гойдалок з точністю 4,8 МПа шляхом вимірювання коерцитивної сили та залишкової індукції. Даний досвід можливо поширити на інші типи металоконструкцій довготривалої експлуатації, контролювання НДС яких є важливим для визначення залишкового ресурсу та режиму експлуатації.

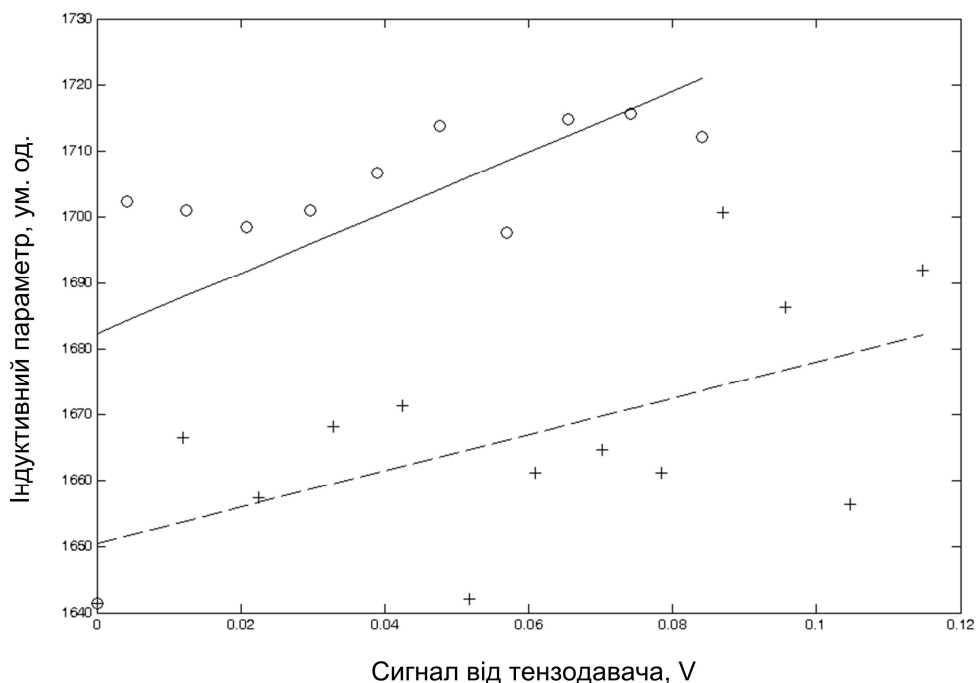
2) Шляхом аналізу характеру залежності коерцитивної сили та індуктивного параметра від напружень було виявлено явище деградації пружних властивостей матеріалу шатуна верстата-гойдалки після кожного етапу досліджень, яке підтверджується показами тензометричного давача.

3) Встановлено можливість заміни тензодавачів комплексом пристроїв для вимірювання інформативних параметрів (коерцитивної сили та індуктивного параметра) для визначення напружень, що виникають в стінці металоконструкцій.



експериментальні дані: "o" – 2-й експеримент, "+" – 3-й експеримент;
 лінійна апроксимація: "—" - 2-й експеримент, "--" – 3-й експеримент

Рисунок 6 — Залежність значень коерцитивної сили від сигналу тензодавача для двох експериментів



експериментальні дані: "o" – 2-й експеримент, "+" – 3-й експеримент;
 лінійна апроксимація: "—" - 2-й експеримент, "--" – 3-й експеримент

Рисунок 7 — Залежність значень індуктивного параметра від сигналу тензодавача для двох експериментів

Література

- 1 Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
- 2 Постанова Кабінету Міністрів України від 8 жовтня 2004 р. № 1331 „Про затвердження Державної науково-технічної програми „Ресурс”.
- 3 Мусихин С.А., Новиков В.Ф., Борисенко В.Н. Об использовании коэрцитивной силы в качестве индикаторного параметра при неразрушающем контроле механических напряжений // Дефектоскопия. – 1987. – №9. – С.57-60.
- 4 Бида Г.В., Куплеев В.Г. Влияние упругой деформации на магнитные свойства сталей с различной структурой // Дефектоскопия. – 1998. – №11. – С.12-26.
- 5 Карпаш О. М. Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 272 с.
- 6 Малько Б.Д., Попович В.Я., Харун В.Р., Кварцяний В.О. Аналіз ефективності використання потужності електродвигунів верстатів-гойдолок // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2000. – №1. – С. 49-52.
- 7 СТП 320.00135390.069-2002 Методика технічного діагностування для продовження терміну експлуатації від амортизованого обладнання для видобутку нафти і газу, ВАТ „Укрнафта”.
- 8 Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества – физическая основа магнитного структурного анализа // Дефектоскопия. – 1981. – № 8. – С. 8-21.
- 9 Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением // Дефектоскопия. – 2001. – №1. – С.38-46.

УДК 622.24.05-004.4

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВОЇ ПЛАСТИНИ З НЕОДНОРІДНІСТЮ ПІД ДІЮ ГАРМОНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ЧАСТОТИ

В.Б.Копей, І.З.Лютак

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42127,
e-mail: acoustic.field@gmail.com

Представлена конечно-элементная модель распространения ультразвукового сигнала в пластине с трещиной, выполненная с помощью пакета программного обеспечения Ansys и дополненная математическим аппаратом использования конечных элементов. Для более полного учета физических явлений, имеющих место при взаимодействии нагрузки на пластину с трещиной, проведен модальный ее анализ. Проанализированы наиболее соответствующие для описания термоакустического эффекта вокруг трещины теории.

The finite element model of ultrasonic signal propagation in a plate with crack is presented. This model is designed with help of Ansys software package. Presented model is complemented the mathematical apparatus of the use finite elements. For more complete account of the physical phenomena which take a place at co-operation of loads on a plate with crack, its modal evaluation is conducted. The most fit theories which can describe a thermoacoustical effect in the vicinity of crack are analyzed.

Вступ

Розроблення нових методів неруйнівного контролю металевих конструкцій неможливе без розуміння механічних властивостей матеріалу із неоднорідностями. Тому розробка моделей опису механічних властивостей металевих конструкцій з неоднорідностями (зокрема, тріщинами) з метою теоретичного передбачення їх поведінки під дією різних зовнішніх збурень є основою для розробки нового неруйнівного термоакустичного методу. Він полягає у визначенні місць дислокації неоднорідностей в металевій конструкції за результатом взаємодії з нею потужного акустичного поля ультразвукової частоти та виділенням теплової енергії в її околі.

Наукові основи нового неруйнівного термоакустичного методу представлені в [1].

Найбільш близькими до цього методу можна назвати метод акустичної емісії і теплові методи. Дослідження, що ґрунтуються на реєстрації на поверхні контрольованого об'єкта температурного поля, яке виникає внаслідок вивільнення теплоти в місцях концентрації напружень (дефектів) під дією навантаження, представлені в [11, 12]. Проте, представлені дослідження недостатньо мірою пояснюють механізм утворення теплової енергії та не вказують на зв'язок між величиною навантажень і напруженням в околі неоднорідності. Науковці вказують, що можливими причинами виникнення теплоти є пластична деформація неоднорідності, пов'язана з появою, рухом і зникнен-