

УДК 624.014:620.111.3

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.5.77378

Г.С. Тимчик, М.В. Філіппова, М.О. Демченко

НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

### ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ФАСОННИХ ПРОФІЛІВ

**Background.** Article is dedicated to the problem of the state quantity value pressure to the structural shape constructions during the process of exploitation without method of acoustic control testing.

**Objective.** The aim of the paper is the improvement of the acoustic diagnostics of the shape constructions using the acoustic method of control.

**Methods.** The echo reflection-shadow method for the achievement of the aim of research was proposed.

**Results.** The acoustic spring connective coefficient was defined for the structural shape of metal constructions, that includes the density and fatness of the contact liquid, the force of pressure to the object of control, angle of the introduction of ultrasonic wave and the material of the control object with the usage the distance of neutral line of the structural shape construction, which allows improving the accurate diagnostics.

**Conclusions.** The experimental research on the metal with this known chemical state allows defining the acoustic pressure coefficients of the connections of the structural shape of the metal constructions. Comparative analysis was carried out theoretically due to the proposed method of the acoustic diagnostics. It showed the absolutely fault for the pressures of 10 Amp, which is not higher than 3 % from the state of material.

**Keywords:** structural shape construction; echo reflection shadows method; metal construction.

#### Вступ

У сучасному будівництві зростає попит на використання металевих конструкцій (МК) як основних конструктивних елементів. Спорудами, в яких основними конструктивними елементами є МК, можуть бути торговельні центри, магазини, автосалони, технічні центри, складські приміщення, заводи, цехи, спорткомплекси, автостоянки тощо. Металеві конструкції виготовляють з прокатних чи зварних фасонних профілів (ФП), що дає змогу забезпечити цілісність, надійність та довговічність промислової споруди.

Всі конструктивні елементи сталевих ФП МК працюють на згин. У місцях найбільшого прогину виникають максимальні значення напружень. Для забезпечення надійності при проектуванні МК розраховують допустимі значення навантажень, що не призведуть до виникнення критичних напружень у зонах максимальної їх концентрації. Однак зміну напруженого стану (НС) МК споруди спричиняє низка факторів: зміна призначення споруди; реорганізація технологічного процесу зі зміною обладнання технологічних ліній у самій будівлі; експлуатація споруди за межами проектних режимів; природні катаклізми; зміна нормативних вимог до споруди.

Для забезпечення цілісності споруди необхідно проводити контроль технічного стану через визначення дійсних значень напружень у місцях їх концентрації. Тому особливе значен-

ня має розробка оперативних методів неруйнівного контролю, що дадуть змогу діагностувати значення НС ФП з високою достовірністю протягом усього життєвого циклу споруди.

Широкого застосування в діагностиці напружень елементів, таких як труби, рейки, ободи залізничних коліс, нафтопроводи тощо, набули акустичні методи діагностики, які не потребують складного методичного забезпечення і дають змогу визначати НС металу за прямопропорційною залежністю від зміни швидкості поширення ультразвукових хвиль [1–8].

Реалізація акустичного методу діагностики НС МК полягає у встановленні функціональної залежності між затримкою поширення акустичної хвилі та тензорами напружень, оскільки механічні напруження призводять до зміни швидкості поширення звуку в середовищі. Перевагами акустичного методу є відносна простота, компактність вимірювальної апаратури та універсальність підходу до всіх матеріалів [5].

Однією з основних складностей цього методу є забезпечення точності вимірювання відносної зміни швидкості ультразвукової хвилі (УЗХ) у конкретному об'єкті контролю (ОК) у зв'язку з тим, що навіть на межі текучості її зміна, як правило, не перевищує декількох відсотків. Тому необхідним є удосконалення існуючих методів акустичної діагностики для ФП МК, що дасть змогу проводити вимірювання в локальних зонах полиць ФП, які мають похилі та паралельні грані.

### Постановка задачі

У роботі поставлена задача кількісної оцінки дійсних значень напружень у полицях ФП МК за зміною швидкості поширення УЗХ. Для розв'язання поставленої задачі пропонується використовувати дзеркально-тіньове прозвучування.

### Використання акустичного методу для діагностики напруженого стану фасонних профілів

Основним фактором, який впливає на зміну характеристик поширення УЗХ, є напруження, що супроводжується зміною міжатомних відстаней і пружних модулів, тобто деформація внутрішньої структури ОК [5]. Окрім деформації, на поширення УЗХ впливає низка факторів, які пов'язані з фізичними полями (тепловими, електромагнітними, акустичними), та фізичний стан металу, з якого виготовлений ОК (структурна анізотропія, геометрія, наявність обмежувальних поверхонь, якість поверхні ОК, залишкові напруження тощо). Особливу увагу необхідно приділяти розгляду факторів впливу стосовно конкретного методу прозвучування.

Запропоновано, виходячи з існуючої геометрії ФП, де в половині номенклатурного ряду полиці мають ухили внутрішніх граней, використовувати дзеркально-тіньовий метод, згідно з яким УЗХ мають поширюватися під кутом до напрямку дії вектора напруження. Це дасть змогу за рахунок збільшення бази прозвучування комплексно оцінити значення напруження в металі полиць ФП як з паралельними, так і з перпендикулярними гранями.

Дослідження [1–8] показали, що спостерігається лінійна залежність швидкості поширення УЗХ від напружень у металі, викликаних навантаженнями стиснення та розтягу. Вона визначається як відношення швидкості поширення УЗХ для ненавантаженого стану до швидкості поширення для навантаженого стану. Виходячи з конструктивних та експлуатаційних особливостей ФП, запропоновано визначити швидкість поширення УЗХ у ненавантаженому стані ФП по нейтральній лінії, де напруження є незалежними від величини навантажень.

Методи вимірювання швидкості УЗХ належать до непрямих вимірювань, тому що дефектоскопом безпосередньо вимірюється час проходження УЗХ в ОК уздовж бази прозвучування. Доцільно вимірювати час проходження УЗХ. Це підвищить точність отриманих результатів [9].

Відносну зміну швидкості УЗХ  $\delta v$  можна розглядати як функцію

$$\delta v = f(a_0, \sigma_{\text{зал}}, N_K, T_B, a_T, \sigma_d), \quad (1)$$

де  $a_0$  – структурна анізотропія металу ФП;  $\sigma_{\text{зал}}$  – залишкові напруження у ФП;  $N_K$  – кількісний склад сировинних компонентів, що використовуються для виготовлення ФП, хімічний склад;  $T_B$  – технологія виготовлення ФП;  $a_T$  – текстурна анізотропія;  $\sigma_d$  – дійсні напруження в металі ФП.

Залежно від структурної реалізації методу діагностики напруженого стану внесок кожного з факторів (1) різний. По-перше, швидкість поширення УЗХ для кожного матеріалу є різною, оскільки різними є хімічний склад металу та кількісний вміст окремих компонентів  $N_K$ . По-друге, залежно від технології виготовлення  $T_B$  і застосування термічної обробки змінюються структурна  $a_0$  і текстурна анізотропія  $a_T$ , що призводить до виникнення залишкових напружень  $\sigma_{\text{зал}}$ , які неоднорідні.

Так, виготовлені МК, у вигляді прокатних чи зварних профілів, мають залишкові напруження  $\sigma_{\text{зал}}$  з різними значеннями величини та розсіюванням. У тілі ФП МК також спостерігається зміна модуля пружності та коефіцієнта температурного подовження, що пов'язано з технологією їх виготовлення  $T_B$ , транспортування та монтажу [10, 11]. При експлуатації МК у металі відбувається накладання залишкових напружень  $\sigma_{\text{зал}}$  і напружень, що викликані дією зовнішніх навантажень. Для нейтральної лінії профілю також характерна наявність залишкових напружень  $\sigma_{\text{зал}}$ . У поставленій задачі вдосконалення методу оцінювання дійсних напружень покладено оцінку відносного значення абсолютних швидкостей поширення УЗХ у полиці та в її стінці на нейтральній лінії, без розділення їх дійсних напружень на залишкові та експлуатаційні [3]. Тому вважаємо, що значення залишкових напружень враховуються при контролі разом з експлуатаційними як дійсні. Це допущення вводиться для встановлення значення напруження  $\sigma_d$  як комплексного та порівняння його з допустимим.

За відсутності механічної напруги пружні властивості конкретного матеріалу залежать від його структурного стану: фазового складу, щільності мікродефектів, текстури, розміру зерен та інших факторів [1].

При проведенні діагностики ФП база прозвучування має величину від 10 до 100 мм. Тому структура матеріалу значно впливає на характеристику акустичного сигналу. Необхідно відзначити зв'язок структурного стану матеріалу з величиною акустичної анізотропії, що своєю чергою впливає на час проходження акустичної хвилі.

Величина первинної анізотропії прямопропорційно залежить від способу отримання ОК, термічної обробки, наплавки, фізико-механічних характеристик матеріалу. У пластично деформованому матеріалі акустична анізотропія змінюється внаслідок формування кристалографічної текстури деформації [8].

Проведено оцінку зміни акустичної анізотропії вздовж бази прозвучування і встановлено, що її розмір становить приблизно 0,8 % для максимально допустимого значення напруження в матеріалі ОК, що дає змогу дещо знехтувати окремо оцінкою розподілення анізотропії в зоні прозвучування і не враховувати її при визначенні часових інтервалів проходження УЗХ [8].

Урахування відносної зміни швидкості проходження УЗХ дає змогу компенсувати сумарний вплив структури й анізотропії матеріалу на визначення НС. Це спрощує процес проведення діагностики та не вносить похибки в її результати.

Таким чином, при використанні дзеркально-тіньового методу діагностики параметри фізико-механічного ( $\sigma_{\text{ост}}, T_B$ ), хімічного ( $N_K$ ) станів, текстурної та структурної анізотропії ( $a_T, a_0$ ) безпосередньо враховуються комплексним показником дійсних напружень  $\sigma_d$ :

$$\delta v = f(\sigma_d). \quad (2)$$

Залежність (2) дає змогу спростити аналіз процесу зміни швидкості поширення УЗХ  $\delta v$  при розгляді її відносного значення залежно від значення одновісних напружень у металі прозвучування. Фактори (1) при використанні дзеркально-тіньового методу прозвучування компенсуються за рахунок використання для значень ненапруженого стану ділянок ФП, що виготовлені з одного замісу сталі.

### Інтерпретація акустичного методу діагностики напруженого стану фасонних профілів

Розглянемо модель просторового розподілення нормальних напружень  $\sigma$  у поперечному перерізі ФП типу двотавр при чистому плоскому вигині. Найбільші за величиною напруження

виникають у волокнах, найвіддаленіших від осі симетрії профілю, тобто нейтральної лінії. Завдяки чистому вигину в полицях профілю мають місце лише плоскі напруження, паралельні осі  $x$ , тобто нейтральній лінії. Плоский напружений стан запишемо у векторному вигляді системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \sigma &= \int_{x_1}^{x_2} \sigma_{xx}(x) dx \neq 0, \\ \sigma &= \int_{y_1}^{y_2} \sigma_{yy}(y) dy = 0, \\ \sigma &= \int_{z_1}^{z_2} \sigma_{zz}(z) dz = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Використання контактної методу прозвучування супроводжується чинниками, які можуть суттєво вплинути на результат діагностики, такими як нестабільність акустичного контакту, сила притискання перетворювача, контактна рідина, акустичні властивості матеріалу ОК, що впливає на точність контролю. На основі залежності відносної зміни швидкості УЗХ  $\delta v$  від одновісних механічних напружень  $\sigma$  (3) запропоновано представити для дзеркально-тіньового методу прозвучування з комплексним урахуванням умов, що супроводжують процес діагностики:

$$\delta v = k_K \sigma,$$

де  $k_K$  – комплексний акустопружний коефіцієнт зв'язку.

Для визначення відносної швидкості поширення УЗХ  $\delta v$  як значення швидкості для ненапруженого стану металу використовуємо швидкості УЗХ у стінці на нейтральній лінії, де відсутні напруження  $v_{02} = v_1 = \frac{2s}{\cos \theta \cdot t_1}$ .

Узагальнивши сказане вище та врахувавши швидкість поширення УЗХ у полиці  $v_2 = \frac{2t}{\cos \theta \cdot t_2}$ , отримаємо

$$\delta v = \frac{t}{s} \frac{t_1}{t_2} - 1, \quad (4)$$

де  $t_1$  – час проходження хвилі в стінці на нейтральній лінії, що відповідає ненапруженому стану металу;  $t_2$  – час проходження хвилі в полиці при дії напруження  $\sigma$ .

При прозвучуванні дзеркально-тіньовим методом усереднене значення одновісного напру-

ження  $\sigma = \sigma_{yc}$  по базі прозвучування з рівняння (4) подамо як

$$\sigma_{yc} = \frac{1}{k_K} \left( \frac{t}{s} \cdot \frac{t_1}{t_2} - 1 \right). \quad (5)$$

У ході проведеного аналізу встановлено, що залежно від співвідношення геометричних параметрів МК, таких як довжина прогону  $L$ , база прозвучування  $d$ , висота полиці  $t$  та профілю  $h$ , спостерігається відхилення усередненого значення напруження по базі прозвучування від напруження в точці введення променя за 3 %. Тому дійсне значення напруження в точці введення УЗХ  $\sigma_1$  для ФП визначається як:

1) для ФП, у яких розподілення напруження відбувається за лінійним законом та  $\sigma_{yc} / \sigma_1 \geq 3 \%$ , розраховується за формулою:

$$\sigma_1 = \frac{1}{k_A k_C k_P} \left( \frac{t}{s} \cdot \frac{t_1}{t_2} - 1 \right) \frac{2}{\left( 2 - \frac{t}{h} \right) \left( 1 - \frac{d}{l} \right)}, \quad (6)$$

де  $d = t \cdot \text{tg}(\theta)$ , а  $l = L/2$  – половина величини прогону;

2) для ФП, у яких розподілення напруження відбувається за параболічним законом та  $\sigma_{yc} / \sigma_1 \geq 3 \%$ , розраховується за формулою:

$$\sigma_1 = \frac{1}{k_A k_C k_P} \left( \frac{t}{s} \cdot \frac{t_1}{t_2} - 1 \right) \frac{1}{\frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d^2}{l^2} \right) \left( 3 - \frac{t}{h} \right) - 1}; \quad (7)$$

3) для ФП з розподіленням напруження за лінійним та параболічним законами, для яких усереднене значення напруження наближається до напруження в точці введення променя  $\sigma_{yc} \approx \sigma_1$ , розраховується за формулою (5).

### Результати дослідження

Задачею експериментального дослідження було визначення акустопружних коефіцієнтів зв'язку для матеріалів МК, що на сьогодні випускаються в Україні та використовуються при будівництві, а також визначення точності розробленого методу. Дослідження проводилося у лабораторних умовах з використанням системи діагностики НС ФП МК (рис. 1) [12], до складу

якої входять: персональний комп'ютер, цифровий осцилограф SIGLENT SDS1202CNL+ зі смугою пропускання 200 МГц та частотою дискретизації в реальному часі 2 Гвиб/с, два підсилювачі, приймальний та випромінювальний перетворювачі П121-5-50-М-003, система створення навантаження – талреп, система контролю навантаження – кранові ваги, ОК – експериментальний зразок, генератор [13], блок живлення. Для збудження УЗХ використано імпульс напруги тривалістю 0,5 мкс з амплітудою до 300 В за частоти зондування 5 МГц.



Рис. 1. Структурна схема системи діагностики НС ФП МК

Як об'єкт дослідження використано розроблений експериментальний зразок зварної конструкції ФП типу двотавр № 12 та швелер № 12П з похилими та паралельними внутрішніми гранями полиць відповідно (рис. 2). За результатами вимірювань геометричних розмірів товщини стінки  $s$  профілів становили  $4,7 \pm 0,01$  і  $4,8 \pm 0,01$  мм для двотавра та швелера відповідно, на середині висоти профілю  $60 \pm 0,02$  мм. Вимірювання товщини полиць  $t$  у розрахованих місцях для прозвучування показало значення для верхньої та нижньої полиць двотавра  $7,28 \pm 0,01$ ,  $7,3 \pm 0,01$  мм та для швелера  $7,7 \pm 0,01$  мм,  $7,75 \pm 0,01$  мм.

Встановлено, що для НС розтягу комплексний акустопружний коефіцієнт зв'язку становить  $k_K = -(14,82 \pm 0,08) \cdot 10^{-6}$  МПа<sup>-1</sup>, а для стиснення  $k_K = -(0,23 \pm 0,05)$  МПа<sup>-1</sup>. Більша відносна зміна швидкості УЗХ спостерігалась при розтягненні, ніж при стисненні матеріалу полиці. Значення комплексних коефіцієнтів зв'язку отримані для матеріалу сталь 3 С245 за ГОСТ 27772–88.



Рис. 2. Фотозображення експериментальної установки для діагностики НС ФП МК: 1 – кранові ваги промислового зразка ТОН-3; 2 – талреп вантажний вилка-вилка М22; 3 – експериментальний зразок; 4 – кріплення

На рис. 3 показано відносну зміну швидкості поширення УЗХ залежно від НС ФП МК експериментального зразка по всій його довжині для двох типів ФП швелера та двотавра.

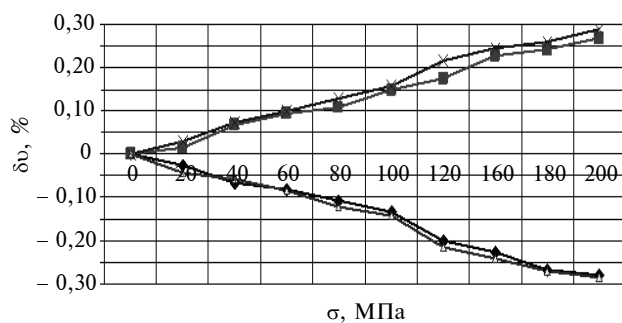


Рис. 3. Відносна зміна швидкості поширення УЗХ залежно від НС ФП МК експериментального зразка: —◆— напруження розтягу для двотавра № 12; —■— напруження стиснення для двотавра № 12; —▲— напруження розтягу для швелера №12 П; —×— напруження стиснення для швелера №12 П

Можна зробити висновок, що результати отриманих досліджень підтверджують попередні твердження (5)–(7) про лінійну залежність зміни відносної швидкості поширення поперечних

УЗХ та НС металу ФП, що змінюється в межах закону Гука.

Проведено порівняльний аналіз значень напружень, отриманих теоретично та за допомогою запропонованого методу акустичної діагностики НС ФП, і встановлено, що розбіжність для прозвучування вздовж напрямку прокату дає абсолютну похибку теоретичних значень від експериментальних 15 МПа. Розбіжність результатів дослідження при порівняльному аналізі становила близько 2,5 %. Отримані результати досліджень дають можливість використання запропонованого методу для діагностики НС ФП МК у промислових умовах для споруд, що перебувають в експлуатації.

### Висновки

Схильність металу до протидії деформації, зміни форми і його внутрішнього стану під впливом діапазону допустимих навантажень викликає низку питань щодо забезпечення умов роботи й експлуатації конкретного конструктивного елемента будівлі. Для розв'язання поставленої задачі запропоновано акустичний метод діагностики, в якому прозвучування проводиться під кутом з використанням двох п'єзоелектричних перетворювачів, що розміщуються по одну сторону від об'єкта контролю. Дійсні навантаження порівняно з конструктивно-допустимими дають змогу оцінити поточні умови роботи конструкції та зробити висновки про необхідність подальших дій щодо зміни умов експлуатації.

Застосування цього методу діагностики НС ФП МК показало високу точність отриманих результатів лабораторних досліджень на експериментальному зразку. В ході проведення дослідження встановлено акустопружні коефіцієнти зв'язку та підтверджено залежність відносної зміни швидкості акустичного сигналу від одноосових напружень у металі.

Подальші дослідження планується спрямувати на аналіз похибок, що виникають при встановленні значень дійсних механічних напружень, з використанням акустичного методу діагностики НС ФП МК, а також шляхів їх зменшення.

### Список літератури

1. Никитина Н.Е., Казачек С.В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 4 (32). – С.18–28.
2. Guz' A.N., Makhort F.G. The physical fundamentals of the ultrasonic nondestructive stress analysis of solids // Internat. Appl. Mech. – 2000. – № 9 (36). – P. 1119–1149.

3. Бобренко В.М., Куценко А.Н. Рудаков А.С. Акустическая тензометрия // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 4. – С. 23–39.
4. Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods / M. Ya, P. Marquette, F. Belahcene, J. Lu // Mater. Sci. Eng. – 2004. – № 1-2 (382). – P. 257–264.
5. Лазерно-ультразвуковой метод выявления продольных напряжений рельсовых плетей / А.А. Карабутов, А.Н. Жаринов, А.Ю. Ивочкин и др. // Мир измерений. – 2012. – 9. – С.10–17.
6. Курашкин К.В., Мишакин В.В. Использование ультразвуковых волн для оценки механических напряжений в материале сварных соединений // Сборник трудов XXII сессии РАО. – М.: ГЕОС. – 2010. – 2. – С.106–110.
7. Bray D.E., Tang W. Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the Lcr ultrasonic wave // Nucl. Eng. Design. – 2001. – № 2 (207). – P. 231–240.
8. Курашкин К.В., Мишакин В.В. Исследование влияния характеристик структуры материала на акустические параметры // Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. П.Е. Алексеева. – 2011. – № 2 (87). – С. 190–198.
9. Єременко В.С., Галаган Р.М. Шляхи мінімізації сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку в матеріалах з неоднорідною структурою // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 6. – С. 39–45.
10. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки. – К.: Техника, 1991. – 152 с.
11. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 248 с.
12. Demchenko M.A., Filippova M.V., Bezruchko V.M. States diagnostics of elastic waves of steelwork beam elements in metallic industrial structures // 9th European Conf. Innovations in Technical and Natural Sciences “East West”, Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. – Vienna, 2015. – P. 8–12.
13. Безвесільна О.М., Тимчик Г.С. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів. – Житомир: ЖДТУ, 2012. – 811 с.

## References

1. N.E. Nykytyna and S.V. Kazachek, “Benefits acoustoelasticity method for the nondestructive testing of mechanical stresses in machine parts”, *Vestnyk Nauchno-Tekhnicheskoho Razvytyia*, no. 4 (32), pp. 18–28, 2010 (in Russian).
2. A.N. Guz' and F.G. Makhort, “The physical fundamentals of the ultrasonic nondestructive stress analysis of solids”, *Internat. Appl. Mech.*, no. 9 (36), pp. 1119–1149, 2000.
3. V.M. Bobrenko et al., “Acoustic tensometry”, *Kontrol. Dyagnostyka*, no. 4, pp. 23–39, 2001 (in Russian).
4. M. Ya et al., “Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods”, *Mater. Sci. Eng.*, no. 1-2 (382), pp. 25–26, 2004.
5. A.A. Karabutov et al., “Laser-ultrasonic method for detecting longitudinal stresses rail lashes”, *Myr Yzmerenyi*, no. 9, pp. 10–17, 2012 (in Russian).
6. K.V. Kurashkyn and V.V. Myshakyn, “Laser-ultrasonic method for detecting longitudinal stresses rail lashes”, *Sbornyk Trudov XXII Sessyy RAO*, no. 2, pp. 106–110, 2010 (in Russian).
7. D.E. Bray and W. Tang, “Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the Lcr ultrasonic wave”, *Nucl. Eng. Design*, no. 2 (207), pp. 231–240, 2001.
8. K.V. Kurashkyn and V.V. Myshakyn, “Investigation of the effect on the structure of the material characteristics of acoustic parameters”, *Trudy Nyzhegorodskoho Hosudarstvennogo Tekhnicheskoho Unyversyteta im. P.E. Alekseeva*, no. 2 (87), pp.190–198, 2011 (in Russian).
9. V.S. Yeremenko and R.M. Halahan, “Ways to minimize the total error of measuring the speed of ultrasound in materials with heterogeneous structure”, *Elektrotekhnichni ta Kompiuterni Systemy*, no. 6. pp. 39–45, 2012 (in Ukrainian).
10. V.A. Ostafiev et al., *Diagnosis Metalworking Process*. Kyiv, Ukraine: Tekhnyka, 1991 (in Russian).
11. S.P. Burkyn et al., *Residual Stresses in the Metal*. Ekaterynburh, Russia: Ural University Publ., 2015 (in Russian).
12. M.A. Demchenko et al., “States diagnostics of elastic waves of steelwork beam elements in metallic industrial structures”, in *Proc. 9th European Conf. Innovations in Technical and Natural Sciences “East West”*, Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, Vienna, Austria, 2015, pp. 8–12 (in Russian).
13. O.M. Bezvesilna and H.S. Tymchik, *Technological Measurements and Devices. Transforming Devices Equipment*. Zhytomyr, Ukraine: Zhytomyr State Technological University, 2012 (in Ukrainian).

Г.С. Тимчик, М.В. Філіппова, М.О. Демченко

## ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ФАСОННИХ ПРОФІЛІВ

**Проблематика.** Стаття присвячена проблемі кількісної оцінки напруженого стану фасонних профілів металевих конструкцій у процесі експлуатації без розвантаження з використанням акустичного методу контролю.

**Мета дослідження.** Удосконалення акустичної діагностики напруженого стану фасонних профілів металевих конструкцій, що досягається використанням акустичного методу контролю.

**Методика реалізації.** Для досягнення мети дослідження було запропоновано використання дзеркально-тінювого методу прозвучування.

**Результати дослідження.** Визначено акустопружні коефіцієнти зв'язку для фасонних профілів металевих конструкцій, що враховують товщину та густину контактної рідини, силу притискання перетворювачів до об'єкта контролю, кут введення ультразвукової хвилі та матеріал об'єкта контролю, з використанням ділянки нейтральної лінії фасонного профілю металевої конструкції, що дає змогу підвищити точність діагностики.

**Висновки.** Експериментальні дослідження на металі з відомим хімічним складом дали змогу встановити акустопружні коефіцієнти зв'язку для фасонних профілів металевих конструкцій. Проведений порівняльний аналіз значень напружень, отриманих теоретично та за допомогою запропонованого методу акустичної діагностики, показав абсолютну похибку для одноосних напружень 10 МПа, що не перевищує 3 % від межі текучості матеріалу.

**Ключові слова:** фасонні профілі; дзеркально-тінювий метод; металеві конструкції.

Г.С. Тымчик, М.В. Филиппова, М.А. Демченко

#### ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

**Проблематика.** Статья посвящена проблеме количественной оценки напряженного состояния фасонных профилей металлических конструкций в процессе эксплуатации без разгрузки с использованием акустического метода контроля.

**Цель исследования.** Совершенствование акустической диагностики напряженного состояния фасонных профилей металлических конструкций достигается использованием акустического метода контроля.

**Методика реализации.** Для достижения цели исследования предложено использование зеркально-теневого метода прозвучивания.

**Результаты исследования.** Определены акустоупругие коэффициенты связи для фасонных профилей металлических конструкций, учитывающие толщину и плотность контактной жидкости, силу прижима преобразователей к объекту контроля, угол ввода ультразвуковой волны и материал объекта контроля, с использованием участка нейтральной линии фасонного профиля, что позволяет повысить точность диагностики.

**Выводы.** Экспериментальные исследования на металле с известным химическим составом позволили установить акустоупругие коэффициенты связи для фасонных профилей металлических конструкций. Проведенный сравнительный анализ значений напряжений, полученных теоретически и с помощью предложенного метода акустической диагностики, показал абсолютную погрешность для одноосных напряжений 10 МПа, что не превышает 3 % от предела текучести материала.

**Ключевые слова:** фасонные профили; зеркально-теневого метод; металлические конструкции.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
НТУУ “КПІ ім. І. Сікорського”

Надійшла до редакції  
29 серпня 2016 року