

Проведено теоретичні дослідження по моделюванню напружено-деформованого стану фасонних профілів та його впливу на зміну акустичної бази вимірювання при використанні дзеркально-тіньового методу. Встановлені лінійні та кутові зміщення центральної лінії акустичного променя ультразвукової хвилі, що є передумовою розробки конструкції блоку п'єзоелектричних перетворювачів для акустичної діагностики напруженого стану фасонних профілів

Ключові слова: акустичний контроль, напружено-деформований стан, фасонні профілі

Проведены теоретические исследования по моделированию напряженно-деформированного состояния фасонных профилей и его влияния на изменение акустической базы измерения при использовании зеркально-теневого метода. Установлены линейные и угловые смещения центральной линии акустического луча ультразвуковой волны, что является предпосылкой для разработки конструкции блока пьезоэлектрических преобразователей для акустической диагностики напряженного состояния фасонных профилей

Ключевые слова: акустический контроль, напряженно-деформированное состояние, фасонные профили

КОРЕКЦІЯ ПОЛОЖЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИ АКУСТИЧНОМУ КОНТРОЛІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ ПРОКАТНИХ ПРОФІЛІВ

Г. С. Тимчик

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: deanpb@kpi.ua

М. В. Філіппова

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: m.filippova@kpi.ua

М. О. Демченко

Аспірант*

E-mail: amd.8@meta.ua

*Кафедра виробництва приладів

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Зі збільшенням темпів будівництва зростає необхідність розробки та використання нових методів й засобів для забезпечення їх цілісності, надійності, працездатності, безпеки, що дозволять в короткий час проводити діагностику відповідальних елементів конструкцій. Основним показником технічного стану споруди, що відповідає за його працездатність, є напружено-деформований стан (НДС) конструктивних елементів. В якості несучих елементів сучасних споруд цивільного та промислового призначення використовуються металеві конструкції (МК), виконані з зварних і прокатних фасонних профілів (ФП) [1–4].

Всі конструктивні елементи сталевих ФП МК працюють на згин. В місцях найбільшого прогину виникають максимальні значення напружень. Для забезпечення надійності при проектуванні МК розраховують допустимі значення навантажень, що не призведуть до виникнення критичних напружень в зонах максимальної концентрації. Однак, зміну НДС МК споруди спричиняють ряд факторів: зміна призначення споруди, реорганізація технологічного процесу зі зміною обладнання технологічних ліній в самій будівлі, експлуатація споруди за межами проектних режимів, природні катаклізми, зміна нормативних вимог до споруди.

Для забезпечення цілісності споруди необхідно проводити поточний контроль технічного стану шляхом визначення дійсних значень напружень в місцях їх концентрації [5, 6]. Тому особливе значення має розробка оперативних методів неруйнівного контролю, що дозволять діагностувати значення НДС ФП з високою достовірністю.

Актуальність роботи полягає у всебічному дослідженні впливу НДС та геометрії ФП на зміну бази вимірювання для всього номенклатурного ряду ФП, що дозволить розробити засоби для діагностики НДС ФП в процесі експлуатації.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Функціонування споруди в умовах, які виходять за межі експлуатаційних вимог, спричиняє виникнення критичних ситуацій, що пов'язані зі зміною НДС МК. Для діагностики дійсних напружень металевих конструкцій в умовах експлуатації застосовують акустичні методи, основою яких є акустопружний ефект [7, 8], тобто встановлення функціональної залежності між затримкою розповсюдження акустичної хвилі та тензорами напружень [9]. Це викликано тим, що механічні напруження призводять до зміни швидкості розповсюдження звуку в середовищі.

Методи визначення напруження в навантажених елементах коліс, баків, труб, цистерн та рейок досить добре розроблені та використовуються для діагностики в суднобудівній, атомній, нафтогазовій, хімічній та енергетичній галузях. До переваг акустичного методу відносять відносно простоту, компактність вимірювальної апаратури та універсальність застосування для всіх матеріалів [10].

Дослідження авторів [9, 10] в більшій степені направлені на використання луно-методу. Це метод дозволяє визначати одновісні та двовісні напруження, що усереднені по об'єму прозвучування. Цей метод використовується для діагностики труб, рейок [9, 11]. Авторами [10, 12] запропоновано використання даного методу для визначення пружних сталей металу. В цьому методі зміною геометричних розмірів об'єкту контролю нехтують і приймають її незмінною. В приведених роботах автори зазначають можливість розширення поля використання цих методів [8, 9] для значно більшого ряду металевих конструкцій. Однак, при використанні луно-методу для ФП, що мають ухили внутрішніх граней полиць, виникає зміщення променя за приймаючий-випромінюючий перетворювач. Таким чином, використання одного перетворювача для контролю ФП є неможливим.

Автором [13] розглядається можливість використання поверхневих хвиль для визначення двовісних та одновісних напружень. Для збудження поверхневих хвиль автором [14] розглядається питання використання лазерного оптико-акустичного збудження. Для реалізації цього методу необхідним є забезпечення відповідної якості поверхні, що ускладнює процес діагностики. Особливо увагу при цьому необхідно звернути на технологію виготовлення матеріалу об'єкту контролю. Це може вплинути на результат діагностики за рахунок наявності анізотропії металу.

В [15, 16] аналізується питання використання поверхневих хвиль для визначення повздовжніх та поперечних напружень зварних елементів в умовах нестабільності акустопружнього ефекту та похибка вимірювання даним методом. Приклади оцінки складових загальної похибки, що впливає на результат контролю фізико-механічних характеристик різних об'єктів, наведені в [17]. Добре розроблено питання використання поверхневих хвиль для труб та залізничних рейок [18, 19]. Дані дослідження направлені на встановлення значень залишкових та дійсних напружень, за рахунок різниці швидкостей для напруженого та не напруженого станів. Характер розподілення напружень в прокатних ФП на пряму залежить від наявності залишкових напружень та якості поверхні після прокату. Конструктивні особливості та дія навантажень ФП, що використовуються в МК споруд, відмінні від труб, рейок, нафтопроводів, баків. Тобто застосування даного методу дає високу похибку результатів діагностики. Також даний метод потребує збільшення зони прозвучування. Напружень в балочних металевих конструкцій виконаних з ФП розподіляється таким чином, що для збільшення достовірності необхідно зменшувати зону прозвучування для роботи в передній зоні.

В роботі [20] запропоновано використання дзеркально-тінювого методу для визначення механічних напружень в полицях ФП. Зокрема з врахування

швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в ненапружених ділянках ФП. Це дозволяє проводити вимірювання дійсних напружень без використання зразків металу з нульовими напруженнями. Для реалізації даного методу необхідно встановити вплив геометрії полиці та її зміни при дії максимально-допустимих напружень на зміщення бази вимірювання. Дане дослідження дозволить встановити ступінь впливу геометрії ФП на сумарну похибку результату діагностики та розробити рекомендації по її зменшенню за рахунок введення корекції положення п'єзоелектричних перетворювачів.

3. Мета и задачі дослідження

Метою дослідження є визначення можливості реалізації дзеркально-тінювого методу прозвучування полиці фасонних профілів для діагностики НДС металевих конструкцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- провести аналіз факторів, які виникають при реалізації дзеркально-тінювого методу акустичної діагностики НДС ФП МК;
- оцінити внесок кожного фактору в результат акустичної діагностики НДС ФП МК;
- розробити рекомендації по зменшенню впливу кожного з факторів на результат акустичної діагностики НДС ФП МК.

4. Аналіз факторів, що виникає при реалізації дзеркально-тінювого методу діагностики фасонних профілів

При вигині під дією навантаження в перерізі ФП, що виступає в якості елемента балки, спостерігається концентрація максимальних напружень на полицях профілів. Розподілення напружень відбувається таким чином, що одна полиця розтягується, а інша стискається. Це дає змогу використовувати їх для встановлення зв'язку окремого роду напружень з відносною зміною швидкості розповсюдження УЗХ. Однак внаслідок навантаження відбувається деформація полиць, а саме зміна їх товщини. При кутовому прозвучуванні зміна товщини ОК може призвести до зміщення точки приходу УЗХ за межі приймаючого перетворювача та суттєво вплинути на результат діагностики. Тому необхідно оцінити величину зміщення променя при деформації ОК під дією навантаження при максимально допустимих значеннях. Також особливе значення мають геометрія полиць ФП, які в половині номенклатурного ряду має ухили внутрішніх граней, що призводить до зміщення променя акустичної хвилі в сторону від центру приймаючого перетворювача.

4.1. Вплив зміни геометричних розмірів об'єкту контролю на положення точки приходу ультразвукової хвилі

Розглянемо ФП, що має консольне закріплення та піддається навантаженню, яке зосереджене в точці на її кінці. Для ділянки профілю $\delta_0=AB$ (рис. 1), що відповідає відстані між приймаючим та випромінюючими

п'єзоелектричними перетворювачами при прозвучуванні під кутом Θ , де

$$AB=2t \cdot \text{tg}\Theta, \tag{1}$$

може спостерігатися зміна положення точки, в яку попаде промінь акустичного сигналу (рис. 2). Це пов'язане зі зміною товщини полиці t на деяку величину Δt , так що відстань A_1B_1 раніш названа як AB при розтягненні та стисненні змінюється:

$$A_1B_1=2(t-\Delta t)\text{tg}\Theta, \tag{2}$$

$$A_1B_{21}=2(t+\Delta t)\text{tg}\Theta. \tag{3}$$

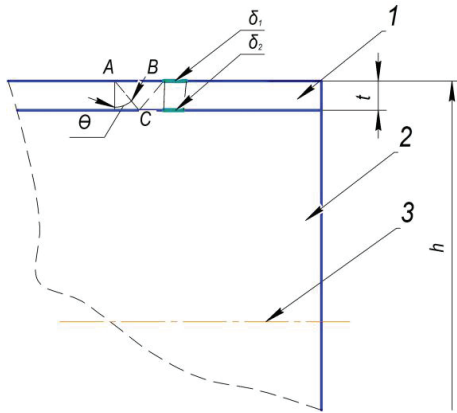


Рис. 1. Розтягнення полиці балки: 1 – полиця балки; 2 – стінка балки; 3 – нейтральна лінія балки

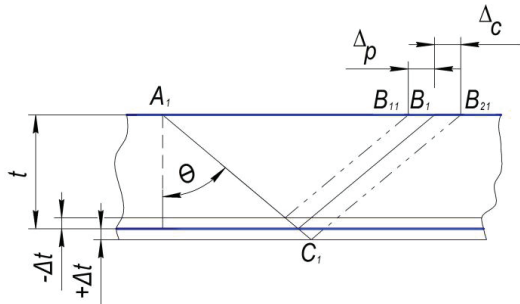


Рис. 2. Зміщення точки, в яку приходить промінь, при напруженні розтяг-стиснення

Деформація металу ФП в робочому діапазоні навантажень відбувається за законом Гука. Це дозволяє знайти абсолютне подовження полиць верхньої δ_1 та нижньої δ_2 граней (рис. 3, 4):

$$\frac{\delta_{\max} - \delta_0}{\delta_0} = \frac{\sigma_1}{E}, \tag{4}$$

$$\frac{\delta_{\min} - \delta_0}{\delta_0} = \frac{\sigma_2}{E}, \tag{5}$$

$$\frac{\delta_1}{\delta_0} = \frac{\sigma_1}{E}, \tag{6}$$

$$\frac{\delta_2}{\delta_0} = \frac{\sigma_2}{E}, \tag{7}$$

де σ_1, σ_2 – діючі напруження на гранях полиці; E – модуль пружності.

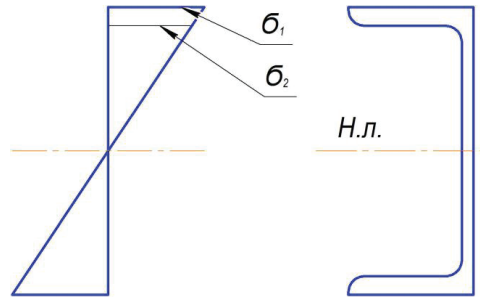


Рис. 3. Характер розподілення напружень в поперечному перерізі профілю швелер

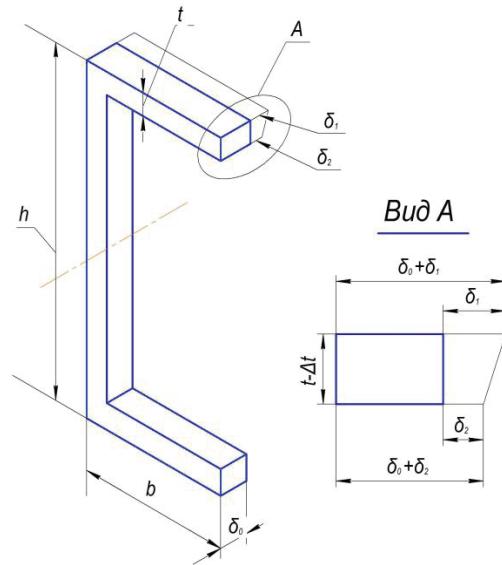


Рис. 4. Зміна геометричних параметрів полиці профілю при розтягненні

Для верхньої грані полиці з довжиною δ_1 напруження приймаємо як максимально допустиме значення $[\sigma]$, тоді

$$\delta_1 = \frac{[\sigma]}{E} \delta_0. \tag{8}$$

Для нижньої полиці, що знаходиться на відстані $\frac{h-t}{2}$ від нейтральної лінії профілю, маємо

$$\sigma_2 = \frac{M_z}{J_z} \frac{h-t}{2}, \tag{9}$$

де M_z – момент сили; J_z – момент інерції.

Момент сили M_z буде однаковий для всього перерізу профілю

$$M_z = W_z [\sigma], \tag{10}$$

де W_z – момент опору.

Тоді отримаємо:

$$\sigma_2 = \frac{W_z [\sigma]}{J_z} \frac{h-t}{2}. \tag{11}$$

Оскільки W_z/J_z представляється для точки максимально допустимого значення напруження, то $[\sigma]$

$$\frac{W_z}{J_z} = \frac{2}{h}. \tag{12}$$

Тоді

$$\sigma_2 = [\sigma] \frac{h-t}{h}. \tag{13}$$

Продовження нижньої грані полиці δ_2 при досягненні $[\sigma]$ на зовнішній поверхні профілю визначимо

$$\delta_2 = \frac{[\sigma]}{E} \frac{h-t}{h} \delta_0. \tag{14}$$

Розглянемо процес зміни геометричних параметрів полиці профілю при навантаженні. Характерним для цього процесу є сталість об'єму, тобто V_0 та після V_i деформації:

$$V_0 = V_i, \tag{15}$$

де V_0 – об'єм полиці до деформації; V_i – об'єм полиці після деформації.

Об'єм полиці V_0 з довжиною δ_0 при ненавантаженому стані (рис. 4) складає:

$$V_0 = b \cdot t \cdot l_0, \tag{16}$$

а при навантаженні

$$V_0 = b \cdot (t - \Delta t) \cdot \frac{(\delta_0 + \delta_1) + (\delta_0 + \delta_2)}{2}. \tag{17}$$

Тоді

$$b \cdot t \cdot l_0 = b \cdot (t - \Delta t) \cdot \frac{(\delta_0 + \delta_1) + (\delta_0 + \delta_2)}{2}. \tag{18}$$

Приймаємо ширину полиці незмінною в процесі прогину балки $b = \text{const}$. Це припущення прийнято для того, щоб максимально врахувати можливе подовження полиці балки та відповідно відхилення променя при деформації балки.

Відбувається зменшення висоти полиці Δt і подовження поверхонь полиці δ_1 та δ_2 . Тоді (18) має вигляд:

$$1 - \frac{\Delta t}{t} = \frac{1}{1 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2\delta_0}}. \tag{19}$$

Зіставивши (19) та (2) отримуємо:

$$\frac{A_1 B_{11}}{2t \text{tg} \alpha} = \frac{1}{1 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2\delta_0}}. \tag{20}$$

Сума $\delta_1 + \delta_2$ матиме вигляд:

$$\delta_1 + \delta_2 = \frac{[\sigma]}{E} \delta_0 \left(2 + \frac{t}{h} \right). \tag{21}$$

Тоді,

$$\frac{A_1 B_{11}}{2t \text{tg} \alpha} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{[\sigma]}{E} \left(2 + \frac{t}{h} \right)}. \tag{22}$$

Виділимо інтегровані параметричні характеристики процесу: характеристика профілю прокату за номером профілю – $2 + \frac{t}{h} = \bar{h}$; характеристика матеріалу прокату – $\frac{[\sigma]}{E} = \bar{\sigma}$

$$\frac{A_1 B_{11}}{2t \text{tg} \alpha} = \frac{1}{1 + \bar{\sigma} \bar{h}}. \tag{23}$$

Введемо заміну $K = \bar{\sigma} \cdot \bar{h}$ в (23)

$$\frac{A_1 B_{11}}{A_1 B_1} = \frac{1}{1 + K}. \tag{24}$$

З рис. 2 $A_1 B_{11} = A_1 B_1 - \Delta_p B_{11}$, нехай $B_1 B_{11} = \Delta_p$ – дельта розтягнення, тоді

$$\frac{\Delta_p}{A_1 B_1} = \frac{K}{1 + K}. \tag{25}$$

Аналогічно отримуємо зміщення променя відносно центра перетворювача при стисканні:

$$\frac{A_1 B_{11}}{A_1 B_1} = \frac{1}{1 + K}; \tag{26}$$

$$\frac{\Delta_c}{A_1 B_1} = - \frac{K}{1 + K}. \tag{27}$$

Коефіцієнт ± 1 при $\frac{K}{1+K}$ відповідає характеру напруження, що спостерігається на ділянці полиці.

Зміщення центра променя при стисненні Δ_c та розтягненні Δ_p (рис. 5, 6) проходить в межах розмірів п'єзоелемента перетворювача. Розмір п'єзоелемента малогабаритного перетворювача складає 5x5 мм. Для профілів, що мають плоскопаралельні грані полиць, двотавр та двотавр гарячекатані, розглянуто відхилення центру променя від центру п'єзоакустичного перетворювача відхилення. При допустимому навантаженні навіть для найбільшого профілю прокату не перевищує 0,06 мм, що складає 2,4% від половини сторони контактної поверхні перетворювача.

Аналіз даних графіків по лінійному зміщенню точки приходу променя при розтягненні та стисненні показав, що при максимально допустимому значенні напруження центр ультразвукової хвилі зміщується на незначну величину для всіх типів ФП, що пов'язано з малими лінійними деформаціями полиці профілю. Таким чином, для профілів, які мають паралельні внутрішні грані полиць, немає необхідності вводити корегування положення приймаючого перетворювача відносно випромінюючого.

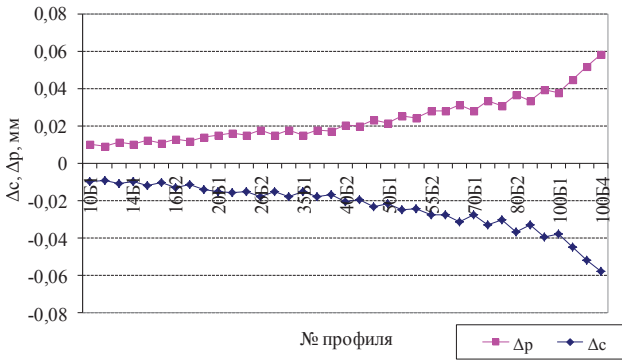


Рис. 5. Зміщення точки приходу променя при розтягненні Δ_p та при стисканні Δ_c для номенклатурного ряду двотаврового прокату з прямими гранями полиць

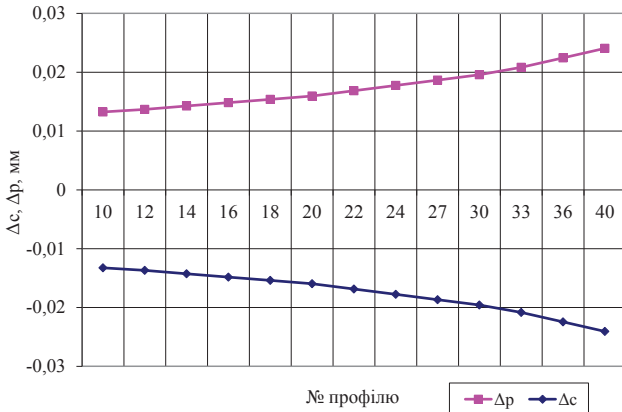


Рис. 6. Зміщення точки приходу променя при розтягненні Δ_p та при стисканні Δ_c для номенклатурного ряду двотаврового прокату з прямими гранями полиць

4. 2. Вплив геометрії об'єкту контролю на положення точки приходу ультразвукової хвилі

Розглянемо схему зміщення променя при кутовому прозвучуванні, у випадку, коли грані полиць балки мають ухил.

Профілі, що мають похилі грані полиць, нормуються наступними стандартами:

- ГОСТ 8239-89 «Двутавры стальные горячекатаные» до 60 номеру профілю з ухилом від 6 до 12 %;
- ДСТУ 3436-96 «Швеллери сталеві гарячекатані» до профілю 40У з ухилом до 8 % при $h < 300$ мм та до 5 % при $h > 300$ мм.

В полицях з паралельними гранями встановлено, що немає необхідності переміщувати перетворювачі. Однак в полицях з похилими гранями промінь переміщується в декількох площинах за рахунок непаралельності площин. Тому необхідно встановити розмір зміщення променя та необхідність введення корегування точки розміщення приймаючого перетворювача відносно випромінюючого (рис. 7–9).

Точка А (рис. 7–9) введення променя в матеріал. Промінь під кутом α проходить до протилежної поверхні полиці, що має ухил γ , до точки В (її проекція на верхню грань полиці – точка В'').

Очікувана точка, в яку прийде промінь при паралельних полицях – В'. Однак кут нахилу полиці γ передбачає зміщення променя відносно перпендикулярної площини, що показана точками ВВ''С. Тоді точка С,

в яку прийде промінь, знаходиться додаванням векторів направленості променя в межах площини В''С'' та В''В' і результуючого вектору В''С

$$AC' = BC' = t \operatorname{tg} 2\gamma; \quad (28)$$

$$BB' = AB = t \cos \theta; \quad (29)$$

$$B''C = \sqrt{(BB')^2 + (B'C)^2}; \quad (30)$$

$$B''C = t \sqrt{\operatorname{tg}^2 2\gamma + \operatorname{tg}^2 \theta}; \quad (31)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{B'C}{BB'} = \frac{\operatorname{tg} 2\gamma}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (32)$$

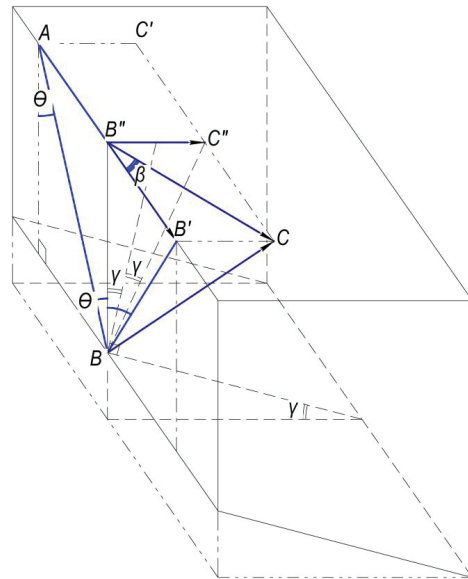


Рис. 7. Зміщення бази прозвучування в полиці з похилими гранями

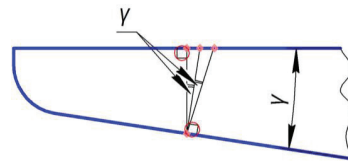


Рис. 8. Проекція бази прозвучування в полиці з похилими гранями: вид з боку

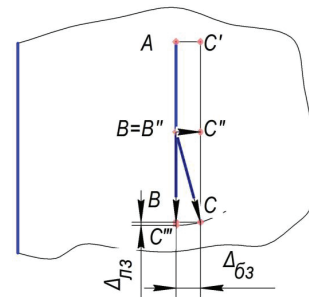


Рис. 9. Проекція бази прозвучування в полиці з похилими гранями: вид зверху

З рис. 9 визначаємо бокове зміщення $\Delta_{бз} = B'C$ та лінійне $\Delta_{лз} = B''C - B''B'$.

Підставив дійсні дані для ФП типу швелер, розглянемо графік бокового Δ_{δ_3} та лінійного Δ_{δ_3} зміщень (рис. 10). З графіку видно, що Δ_{δ_3} для даних профілів не перетинає границю половини розміру п'єзоелектричної пластини перетворювача в 2,5 мм. Тобто УЗХ прийде в межі ПЄП, а Δ_{δ_3} приймає дуже мале значення, таке що ним можна знехтувати.

Згідно стандартів [3, 4] ФП типу швелеру висотою до 300 мм виготовляється з ухилом до 8 % (на $\Delta_{\delta_3} - 8\%$, $\Delta_{\delta_3} - 8\%$), а після 300 мм з ухилом до 5 % ($\Delta_{\delta_3} - 5\%$, $\Delta_{\delta_3} - 5\%$). Зміщення точки приходу УЗХ в полицях з ухилами внутрішніх граней полиць в 8 % не перевищує 1,75 мм, а в 5 % – 1,5 мм для найбільшого номера профілю. Це дозволяє не коригувати положення приймаючого перетворювача для ФП типу швелер, що має похилі внутрішні грані полиць, бо зміщення центра променя відбувається в межах його п'єзoeлементу.

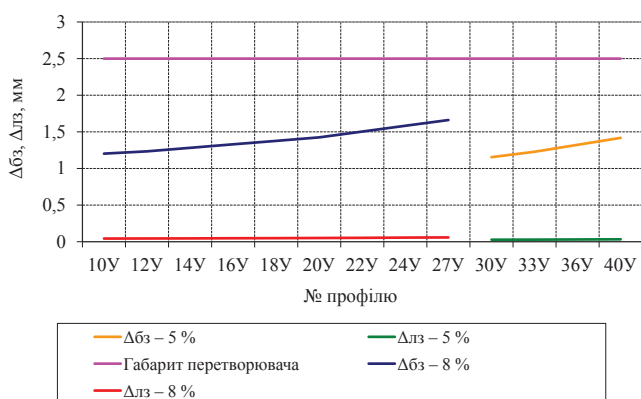


Рис. 10. Бокове Δ_{δ_3} та лінійне Δ_{δ_3} зміщення променя для ФП типу швелера з похилими внутрішніми гранями полиць в 6 % та 12 %

Для ФП типу двотавр згідно стандарту визначено діапазон кутів внутрішньої грані полиці 6–12 %. Бокове зміщення променя Δ_{δ_3} буде знаходитись в межах двох граничних кривих $\Delta_{\delta_3} - 6\%$ та $\Delta_{\delta_3} - 12\%$.

При 12 % ухилі грані полиці корегування положення приймаючого перетворювача знадобляться починаючи з профілю № 27 (рис. 11). Однак, якщо полиця виготовлена з ухилом в 6 %, то корегування не потрібне навіть для найбільшого номера профілю.

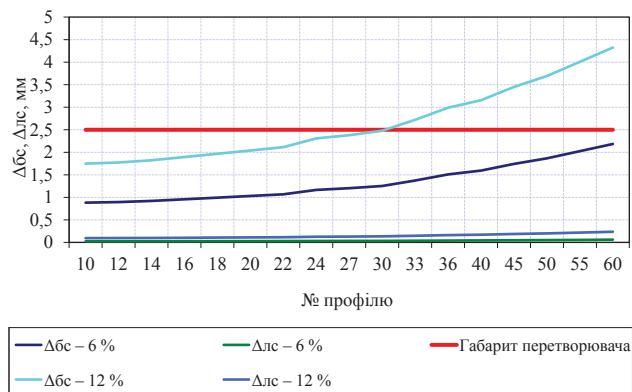


Рис. 11. Бокове Δ_{δ_3} та лінійне Δ_{δ_3} зміщення променя для ФП типу двотавр з похилими внутрішніми гранями полиць в 6 % та 12 %

Наведені на рис. 11 залежності зміщення точки приходу променя при максимальному значенні напруження свідчать про необхідність обов'язкової перевірки кута ухилу внутрішньої грані полиці ФП. Якщо бокове зміщення Δ_{δ_3} точки приходу променя перевищує половину габариту п'єзoeлементу перетворювача, то необхідно водити корегування положення приймаючого перетворювача. Це необхідно враховувати при розробці блоку п'єзoeлектричних перетворювачів для діагностики НДС ФП.

6. Обговорення результатів дослідження впливу напружено-деформованого стану та геометрії фасонних профілів на зміну бази вимірювання

Товщина полиці при максимально допустимому напруженні в металі відбувається на незначну величину, що не впливає на зміщення точки, в яку приходить промінь від випромінюючого перетворювача. Це дозволяє не враховувати зміну товщини ОК при визначенні напружень в ФП МК кутовим прозвучуванням та підтверджує можливість реалізації дзеркально-тіньового методу прозвучування ФП.

З метою усунення похибки, викликані наявністю непаралельності поверхонь полиць ФП, рекомендується вимірювати кут ухилу внутрішньої грані полиці γ та розраховувати кут зміщення променя β для кожного окремого ФП типу двотавр, який має похилі внутрішні грані полиць.

Для кожного ФП типу двотавр з похилими гранями полиць необхідно розраховувати положення приймаючого та випромінюючого перетворювачів відносно один одного:

1. Розрахувати відстань АВ'' від опорної точки до випромінюючого перетворювача:

$$AB'' = t \cdot \text{tg}\theta. \tag{33}$$

2. Розрахувати відстань В''С від опорної точки до приймаючого перетворювача та кут повороту β :

$$B''C = t \sqrt{\text{tg}^2 2\gamma + \text{tg}^2 \theta}, \tag{34}$$

$$\beta = \arctg \left(\frac{\text{tg} 2\gamma}{\text{tg} \alpha} \right). \tag{35}$$

Використання поправок для розрахунку положення приймаючого перетворювача відносно випромінюючого, а саме кута зміщення променя β та відстані між опорною точкою і приймаючим перетворювачем В''С, дозволить у випадках значної неплоскопаралельності ОК в точці приходу променя прийти в габарити п'єзoeлементу приймаючого перетворювача. У випадку, коли бокове зміщення Δ_{δ_3} буде менше за половину габариту п'єзoeлементу приймаючого перетворювача, проводити корегування його положення можна уникнути, що не вплине на якість сигналу.

Проведені теоретичні дослідження дозволили розробити рекомендації до розробки конструкції блоку п'єзoeлектричних перетворювачів. Це дозволить зменшити похибку викликану невідповідністю бази вимірювання геометричним розмірам випромінюючо-

го та приймаючого перетворювачів при застосування дзеркально-тіньового методу.

Дане дослідження дозволило врахувати вплив геометрії полиці ФП та зміни її геометрії під дією максимально допустимого напруження на зміну акустичної хвилі прозвучування. Однак природа ультразвукової хвилі передбачає розповсюдження акустичного поля від випромінюючого перетворювача. Таким чином, необхідним буде також врахувати величину ослаблення акустичного поля, що приходить на приймаючий перетворювач, та викликану нею похибку при діагностиці НДС ФП. Дана робота є продовження та обґрунтування використання дзеркально-тіньового методу для діагностики НДС ФП МК [20].

7. Висновки

1. Проведені теоретичні дослідження щодо оцінки можливості реалізації дзеркально-тіньового методу прозвучування полиці фасонних профілів для діагностики

напружено-деформованого стану металевих конструкцій дозволило проаналізувати фактори, що виникають прозвучуванні та оцінити їх внесок.

2. Встановлено, що зміна геометричних розмірів полиць фасонних профілів під дією максимально допустимого навантаження не призводить до зміщення точки приходу променя ультразвукової хвилі за межі п'єзoeлектричної пластини приймаючого перетворювача при прозвучуванні об'єкту контролю.

3. Результати теоретичного дослідження показали необхідність корегування положення приймаючого перетворювача для ФП, в яких неплоскопаралельність поверхонь ОК призводить до зміщення точки приходу променя за габарит п'єзoeлемента ПЕП. Розроблені рекомендації по зменшенню впливу ухилу внутрішньої грані полиці на результат акустичної діагностики НДС ФП МК за такими параметрами, як кут та відстань відносно опорної точки.

Таким чином, розв'язання поставленої задачі дозволило довести можливість реалізації дзеркально-тіньового методу для діагностики НДС ФП МК.

Література

- ДБН В.2.6-198-2014 Сталеві конструкції. Введ. 2015-01-01 [Текст]. – К.: Мінрегіон України, 2015. – 205 с.
- ГОСТ 26020-83 Двутавры стальные горячекатанные с параллельными гранями полок. Сортамент. Введ. 1986-01-01 [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1998. – 10 с.
- ГОСТ 8239-89 Двутавры стальные горячекатанные. Сортамент. Введ. 1990-07-01 [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 6 с.
- ДСТУ 3436-96 Швеллери сталеві горячекатані. Сортамент. Введ. 2002-01-01 [Текст]. – К.: Госстандарт України, 1997. – 10 с.
- ДБН 362-92 Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації. Введ. 1992-07-01 [Текст]. – К.: Держбуд України, 1995. – 98 с.
- НПАОП 45.2 1.01 98. Правила обстежень, оцінки технічного стану та паспортизації виробничих будівель і споруд. Введ. 2015-01-01 [Текст]. – К.: Мінрегіон України, 1999. – 98 с.
- Li, Z. Internal Stress Monitoring of In-Service Structural Steel Members with Ultrasonic Method [Text] / Z. Li, J. He, J. Teng, Y. Wang // Material. – 2016. – Vol. 9, Issue 4. – P. 223. doi: 10.3390/ma9040223
- Guz, A. N Ultrasonic nondestructive methods of stress analysis in materials and structural members (review) [Text] / A. N. Guz // International Applied Mechanics. – 2011. – Vol. 46, Issue 11. – P. 3–11. doi: 10.1007/s10778-011-0413-x
- Никитина, Н. Е. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин [Текст] / Н. Е. Никитина, С. В. Казачек // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 4 (32). – С. 18–28.
- Мишакин, В. В. Диагностика материалов конструкций на ранних стадиях усталостного разрушения и оценка НДС материала конструкций методами неразрушающего контроля [Текст] / В. В. Мишакин, Н. В. Данилова, К. В. Курашкин, В. А. Ключников, А. В. Гончар // Вестник СГАУ. – 2011. – № 3 (27), Ч. 1. – С. 299–307.
- Мишакин, В. В. Исследование разрушения при статическом нагружении сварных соединений акустическим методом [Текст] / В. В. Мишакин, А. В. Гончар, К. В. Курашкин, Н. В. Данилова // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 7. – С. 27–30.
- Мишакин, В. В. Использование ультразвука для оценки состояния металлических сплавов при пластическом, упруго-пластическом деформировании и термической обработке [Текст] / В. В. Мишакин, В. Н. Перевезенцев, В. А. Ключников, Н. В. Данилова // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2010. – № 5 (2). – С. 102–108.
- Lu, H. Ultrasonic stress evaluation on welded plates with Lcr wave [Text] / H. Lu, X. S. Liu, J. G. Yang, S. P. Zhang, H. Y. Fang // Science and Technology of Welding and Joining. – 2008. – Vol. 13, Issue 1. – P. 70–74. doi: 10.1179/174329307x249405
- Karabutov, A.. Laser ultrasonic diagnostics of residual stress [Text] / A. Karabutov, A. Devichensky, A. Ivochkin, M. Lyamshev, I. Pelivanov, U. Rohadgi et. al. // Ultrasonics. – 2008. – Vol. 48, Issue 6-7. – P. 631–635. doi: 10.1016/j.ultras.2008.07.006
- Kim, N. Measurement of axial stress using mode-converted ultrasound [Text] / N. Kim, M. Hong // NDT & E International. – 2009. – Vol. 42, Issue 3. – P. 164–169. doi: 10.1016/j.ndteint.2008.09.005

16. Jhang, K. Y. Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement [Text] / K. Y. Jhang, H. H. Quan, J. Ha, N. Y Kim // *Ultrasonics*. – 2006. – Vol. 44. – P. e1339–e1342. doi: 10.1016/j.ultras.2006.05.190
17. EN 14127:2004 (E) [Text]. – Non-Destructive Testing – Ultrasonic Thickness Measurement.
18. Javadi, Y. Using LCR Ultrasonic Method to Evaluate Residual Stress in Dissimilar Welded Pipes [Text] / Y. Javadi, V. Plevris, M. A. Najafabadi // *International Journal of Innovation, Management and Technology*. – 2013. – Vol. 4, Issue 1. – P. 170–174.
19. Manchem, L. D. Analytical Modeling of Residual Stress in Railroad Rails Using Critically Refracted Longitudinal Ultrasonic Waves With COMSOL Multiphysics Module [Text] / L. D. Manchem, M. N. Srinivasan, J. Zhou // *Volume 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids*. – 2014. – 58–63. doi: 10.1115/imece2014-38619
20. Филиппова, М. В. Определение напряженного состояния элементов металлоконструкций методом акустической тензометрии [Текст] / М. В. Филиппова, Г. А. Богдан, М. А. Демченко // *Вісник Національного Технічного Університету України «КПІ». Серія приладобудування*. – 2016. – № 51(1). – С. 53–60.

