

УДК 621.317

С.М. Лігоміна, В.В. Дегтярьов, к.т.н.

**ВПЛИВ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКА НА ТОЧНІСТЬ  
ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ НАПРУГ В УЛЬТРАЗВУКОВІЙ ТЕНЗОМЕТРІЇ**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», (psnk@kpi.ua)

*В статті проведено аналіз похибок вимірювання напружень з урахуванням впливу на результати вимірювань похибок вимірювання швидкостей та похибок розрахунку експериментально визначених коефіцієнтів акустопружного зв'язку. Отримано вирази для оцінки похибки вимірювань поверхневих напружень. Побудована залежність для оцінки ймовірності появи похибок, які перевищують певну межу та запропоновано алгоритм зменшення таких похибок.*

**Ключові слова:** ультразвукова тензометрія, похибка вимірювань напружень, похибка вимірювання швидкості.

**Постановка проблеми.** Завдання визначення залишкових поверхневих напружень на сьогодні є дуже актуальним, оскільки значення залишкових напружень та їх розподіл використовується для оцінки ресурсу матеріалів та контролю їх якості.

На даний момент існує декілька основних методів неруйнівного контролю, такі як рентгенівський метод [1], вихрострумний [2], магнітної пам'яті металу (МІМ) [3], різні ультразвукові методи [4,5] та інші.

Кожен з методів має свої переваги та недоліки, тому однією з складних проблем є вибір оптимального методу контролю.

Порівняльні характеристики найбільш розповсюджених методів представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики методів тензометрії залишкових поверхневих напружень

Назва методу	Рентгенівський	Метод магнітної пам'яті металу	Вихрострумний	Ультразвуковий
Вимірювальний параметр	Зміна кута дифракції рентгенівських променів	Напруженість магнітного поля	Провідність	Час розповсюдження ультразвуку
Переваги	Найбільш точний метод	Безконтактний, не потребує попередньої підготовки поверхні	Безконтактний, не потребує попередньої підготовки поверхні	Безпосередня залежність
Недоліки	Складність та вартість обладнання	Складна залежність між магнітними параметрами та напруженістю, значний вплив структури	Складна залежність між магнітними та електричними параметрами та напруженістю. Значний вплив структури	Складність визначення малих змін часу, вплив структури

Для визначення поверхневих та підповерхневих напружень найбільш привабливим є ультразвуковий метод, в основі якого лежить зміна швидкостей розповсюдження хвиль Релея під впливом напружень.

У порівнянні з рентгенівським, глибина вимірювань якого обмежується шаром 20-40 мкм, він має значно більшу глибину - до декількох міліметрів. Крім того недоліком рентгенівського методу є значна вартість обладнання та складність застосування методу в польових умовах.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для визначення двохосових поверхневих напружень ультразвуковим методом в роботі [4] запропоновано вирази

$$\sigma_{11}^0 - \sigma_{33}^0 = A_R \left[ \frac{C_{Rx1} - C_{R0}}{C_{R0}} - \frac{C_{Rx3} - C_{R0}}{C_{R0}} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{11}^0 + \sigma_{33}^0 = B_R \left[ \frac{C_{Rx1} - C_{R0}}{C_{R0}} + \frac{C_{Rx3} - C_{R0}}{C_{R0}} \right] \quad (2)$$

де  $\sigma_{11}^0, \sigma_{33}^0$  - головні напруження, що діють вздовж осей  $x_1$  та  $x_3$  в поверхневому шарі,  $C_{R0}, C_{Rx1}, C_{Rx3}$  - швидкості хвиль Релея в тілі без напружень, в напруженому тілі в напрямках дії двох взаємно перпендикулярних напружень  $x_1$  та  $x_3$  відповідно,  $A_R, B_R$  - коефіцієнти

акустопружного зв'язку, визначені експериментально.

Тобто значення  $\sigma_{11}^0, \sigma_{33}^0$  розраховуються за формулами (1),(2), а не визначаються у наслідку прямих вимірювань [5].

На жаль в відомих авторам літературних джерелах відсутній аналіз похибки вимірювання швидкості ультразвуку на похибку визначення двоосьових напружень з урахуванням впливу похибок вимірювання  $C_{R0}, C_{Rx1}, C_{Rx3}, A_R, B_R$ .

**Формулювання мети статті.** Оскільки значення напружень розраховуються по відомих виразах (1),(2) по вимірним значенням  $C_{R0}, C_{Rx1}, C_{Rx3}, A_R, B_R$ , то похибка вимірювань поверхневих напружень буде залежати від похибок визначення  $C_{R0}, C_{Rx1}, C_{Rx3}, A_R, B_R$  та співвідношень даних величин [5].

Проаналізувавши вирази (1),(2), можна побачити, що у розрахунках використовується різниця двох близьких величин  $C_{Rx1} - C_{R0}, C_{Rx3} - C_{R0}$ . У цьому випадку навіть незначні похибки у визначенні швидкостей можуть привести до суттєвих похибок у визначенні напружень.

Потрібно проаналізувати вирази (1), (2) з урахуванням впливу на результати вимірювань похибок вимірювання швидкостей та похибок розрахунку експериментально визначених коефіцієнтів акустопружного зв'язку. Для оцінки ймовірності появи похибок обумовлених різницею  $C_{Rx1} - C_{R0}, C_{Rx3} - C_{R0}$ , буде проведено комп'ютерне моделювання методом Монте-Карло.

**Результати досліджень.** Розглянемо більш детально процес вимірювання, який можна умовно розділити на два етапи.

Перший етап – визначення  $C_{R0}$ . Оскільки у подальшому ця величина використовується як константа, її вимірювання потрібно провести дуже ретельно, застосовуючи всі можливі методи зменшення похибки, наприклад багаторазові вимірювання з наступним усередненням результату.

Наступним кроком є визначення коефіцієнтів акустопружного зв'язку. Використовуючи навантажувальне устаткування задають потрібну величину  $\sigma_{11}^0$ , вважаючи  $\sigma_{33}^0 = 0$  вимірюють  $C_{Rx1}, C_{Rx3}$ . Аналогічні дії виконують для вимірювання  $\sigma_{33}^0$ . Далі за формулами (1),(2) розраховують  $A_R, B_R$ .

Після проведення підготовчого етапу переходимо до безпосереднього вимірювання розподілу напружень, при цьому  $C_{R0}, A_R, B_R$  вважаємо константами, а  $C_{Rx1}, C_{Rx3}$  - випадкові некорельовані величини, що вимірюються.

Для оцінки значення сумарної середньоквадратичної похибки використовуємо метод часткових похідних [5]

$$\sigma(\sigma_{11}) = \sqrt{\left(\frac{A_R + B_R}{2 \cdot C_{R0}}\right)^2 \cdot \sigma_{CRX1}^2 + \left(\frac{A_R - B_R}{2 \cdot C_{R0}}\right)^2 \cdot \sigma_{CRX3}^2} \quad (3),$$

$$\sigma(\sigma_{33}) = \sqrt{\left(\frac{A_R - B_R}{2 \cdot C_{R0}}\right)^2 \cdot \sigma_{CRX1}^2 + \left(\frac{A_R + B_R}{2 \cdot C_{R0}}\right)^2 \cdot \sigma_{CRX3}^2} \quad (4)$$

Оскільки для вимірювань швидкості застосовується один вимірювач, можна вважати що  $\sigma_{CRX1} = \sigma_{CRX3} = \sigma_{CR}$  та спростити вирази (3),(4)

$$\sigma(\sigma_{11}) = \sigma(\sigma_{33}) = \frac{\sigma_{CR}}{C_{R0}} \sqrt{\frac{(A_R^2 + B_R^2)}{2}} \quad (5)$$

Але вираз (5) не дає можливості визначити ймовірність появи похибок, які виникають якщо значення  $C_{Rx1}, C_{Rx3}$  незначно відрізняються від  $C_{R0}$ . Для оцінки ймовірності було запропоновано використати комп'ютерне моделювання методом Монте-Карло.

Модель створено в середовищі Matlab. Для отримання достовірних даних використовувалось 2000000 розподілених за рівномірним законом значень напружень

$\sigma_{11}^0, \sigma_{33}^0$  в діапазоні від -500 до 500 МПа. Значення  $C_{R0}, A_R, B_R$  було обрано з роботи [6]  $C_{R0} = 3020$  м/с,  $A_R = 17,1$  Тпа/(м/с),  $B_R = 24,1$  Тпа/(м/с).

Блок-схему моделювання показано на рис.1.

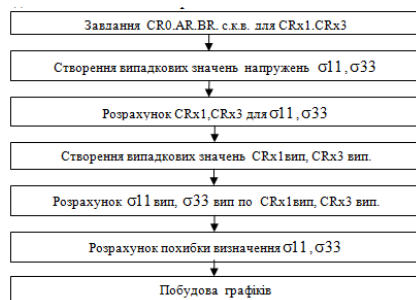


Рис. 1 Блок-схема моделювання

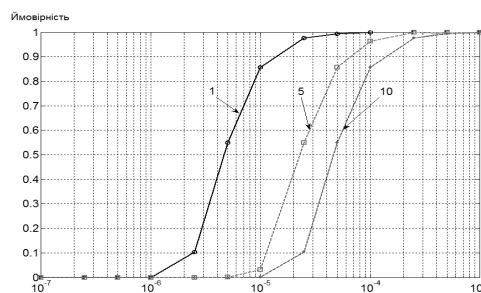


Рис. 2. Ймовірність появи абсолютної похибки вимірювань напружень, яка перевищує 1, 5 та 10 Мпа відповідно, в залежності від відносної похибки вимірювання швидкості

У наслідку нами було отримано оцінку ймовірності появи абсолютної похибки вимірювань напружень більшої ніж певне наперед задане значення. У нашому випадку це було 1, 5 та 10 Мпа. Далі будувалась ймовірності появи такої похибки в залежності від відносної похибки вимірювання швидкості. Результати моделювання приведено на рисунку 2.

Розглянувши залежність для 1 МПа на рисунку 2, зрозуміло, що із зростанням похибки вимірювання швидкості значно зростає ймовірність того, що замість похибки в 1 Мпа, отримаємо значно більшу похибку. Наприклад, для відносної похибки визначення швидкості  $10^{-5}$  ймовірність появи похибки більше 1 МПа буде 85%.

**Висновки.** В вираз (5) коефіцієнти  $A_R, B_R$  входять як константи, тому похибка вимірювань напружень при фіксованій похибці вимірювання швидкості буде зростати із ростом  $A_R, B_R$  та зменшуватися з зростанням  $C_{R0}$ .

З графіка на рис.2 зрозуміло, що навіть при дуже малій відносній похибці вимірювання швидкостей завжди існує ймовірність появи значних похибок вимірювання напружень, особливо при малих значеннях напружень.

Для зменшення ймовірності похибки доцільно проводити вимірювання за наступним алгоритмом: спочатку оцінюють величину визначених напружень. Якщо вона менше певного попередньо завданого рівня, потрібно оцінити різниці  $C_{Rx1} - C_{R0}, C_{Rx3} - C_{R0}$ . Якщо вони менше  $3\sigma_{CR}$  потрібно провести додаткові вимірювання.

Запропонований підхід дозволяє оптимізувати час вимірювання при заданій похибці вимірювання напружень.

### Список літературних джерел

1. Munsif A.S., Waddell A.J., Walker C.A. A method for determining x-ray constants for the measurement of residual stress // Strain. 2003. V. 39. P. 3–10.
2. Clark, W. G. Jr. And Junker, W. R., " Eddy Current Measurement of Residual Stresses in Heavy Section Steel Weldment ", Symposium on Nondestructive Methods for Material Property Determination, , Hershey, USA, April 6 -8, 1983.P. 89 - 101
3. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. М: ЗАО "ТИССО", 2004,— 424 с.
4. Чернооченко А.А., Махорт Ф.Г., Гуца О.М. Применение теории акустопругости поверхностных волн Рэлея для определения напряжений в твердых телах // Прикл. механика 1991.—27, № 1.—С. 44 - 49.
5. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. - 2-е изд. , перераб. и доп., 1991 г.-304 с.
6. А.Н. Гузь, Ф.Г. Махорт Физические основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах // Прикладна механіка. — 2000. — 36, № 9. — С. 3-34.