

**Н. Гук**

Доцент, докт. фіз.-мат. наук

**А. Пацюк**

Ст. наук. співр., канд. техн. наук

**О. Полішко**

Ст. наук. співр., канд. техн. наук

**Г. Шерстюк**

Ст. наук. співр., канд. техн. наук

Дніпропетровський національний  
університет ім. О. Гончара,  
Дніпропетровськ

УДК 539.3

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПОШКОДЖЕНЬ ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНКАХ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

*Розглянуто метод і алгоритм ідентифікації пошкоджень тонкостінної оболонки за результатами спостережень. Розташування та розмір пошкодження визначено з розв'язання оберненої геометричної задачі, обґрунтовано вибір точок спостереження, який забезпечує точність та стійкість розв'язку. Наведені результати ідентифікації пошкоджень у вигляді тріщини та наскрізного отвору, порівнюються результати відновлення невідомих параметрів, отримані з використанням різних сіток вимірювань.*

**ідентифікація, циліндрична оболонка, пошкодження, обернена задача**

**Вступ.** Найбільш небезпечними дефектами з погляду механіки руйнування є тріщини і наскрізні отвори, що виникають як на стадії виготовлення конструкції, так і в процесі експлуатації. Їх наявність в умовах дії експлуатаційних навантажень (механічних, теплових, радіаційних) ініціює в конструкції значні поля напружень в околі дефекту і може призводити як до його зростання, так і до глобального руйнування всієї конструкції.

Найперспективнішим для розв'язання проблеми діагностування наявності пошкоджень є комплексний підхід, що поєднує експериментальні дослідження й ефективні методи ідентифікації математичної моделі деформації конструкції за наслідками спостережень за конструкцією в процесі експлуатації. В основу цих методів можуть бути покладені розв'язки геометричних обернених задач, що дозволяють ідентифікувати параметри математичної моделі за наслідками непрямих вимірювань, таких, наприклад, як дані про зміну частотного спектру конструкції з пошкодженням [1, 2], дані про зміну характеристик напружено-деформованого стану [3].

У цій статті розвивається метод ідентифікації розташування і розміру дефекту тонкостінної оболонки за експериментальними даними, який здійснює парамет-

ричну ідентифікацію пошкодження на основі ітераційного процесу мінімізації цільової функції параметрів, які порівнюються. Вказана функція описує відхилення значень деформацій поверхні оболонки, вимірюваних у процесі експлуатації, від відповідних значень деформацій, отриманих в обчислювальному експерименті з використанням математичної моделі деформації конструкції з пошкодженням. Розроблений метод дозволяє отримати набір параметрів, який однозначно описує розташування і розмір дефекту у вигляді тріщини або наскрізного отвору.

**Постановка задачі.** Розглядається тонкостінна циліндрова оболонка, що знаходиться під дією експлуатаційного навантаження та має пошкодження.

Для ідентифікації пошкодження тонкостінної конструкції в процесі експлуатації необхідно забезпечити можливість спостереження за вказаною системою з подальшою інтерпретацією отриманої інформації на основі математичної моделі. Передбачається, що потрібна для розв'язання поставленої задачі інформація, що описує спостережуваний стан пружної системи, може бути отримана з експерименту. На поверхні оболонки встановлюють сенсори, які реєструють характеристики напружено-деформованого стану в процесі спостереження.

Метою цього дослідження є:

а) створення вимірювального комплексу для проведення лабораторного експерименту з визначення напружено-деформованого стану тонкостінної оболонки з пошкодженням, що знаходиться під дією осьового стиску;

б) створення моделі вимірювання за допомогою обґрунтованого вибору характерних параметрів напружено-деформованого стану, що підлягають вимірюванню; вибору відповідного способу вимірювання, тобто вибору сенсорів, що забезпечують адекватній реальному процесу деформації процес вимірювань; способу розташування сенсорів на поверхні конструкції;

в) ідентифікація невідомих характерних параметрів пошкодження – координат вершин пошкодження, на основі створеної моделі розв'язування оберненої задачі.

#### Математична модель прямої і оберненої задач.

Тонкостінна циліндрова оболонка, що розглядається, займає багатозв'язну просторову область  $\Omega = \{X \mid X = (\xi_1, \xi_2, \xi_3) \in R^3\}$ , обмежену зовнішнім контуром  $\Gamma$  і внутрішніми контурами  $\Gamma_{0_r}$ , де  $r$  – номер внутрішнього контуру.

Для опису внутрішнього граничного контуру  $\Gamma_{0_r}$ , виконується його дискретизація замкнутою ламаною

лінією  $\Gamma_{0_r} \approx \bigcup_{p=1}^{K_r-1} \Gamma_{0_r}^p$  з вузлами  $x_k^r = (\xi_{1k}^r, \xi_{2k}^r)$ , де

$x_k^r \in \Gamma_{0_r}$ ,  $k=1, K_r$ ,  $K_r$  – кількість вузлів ламаної;  $p=1, K_r-1$  – кількість відрізків ламаної, при цьому вузли ламаної лінії повинні збігатися з вузлами сітки прямої задачі. Координати вершин ламаної лінії описують область  $r$ -го пошкодження і складають вектор невідомих параметрів оберненої задачі  $H = \{\xi_{1k}^r, \xi_{2k}^r\}$ ,  $k=1, K_r$ .

Геометрична обернена задача теорії оболонок полягає у визначенні вектора  $H = \{\xi_{1k}^r, \xi_{2k}^r\}$  за виміряним в експерименті значенням характерних параметрів напружено-деформованого стану в точках спостережень  $\gamma_n$ .

При виборі характерних параметрів, що підлягають вимірюванню, використовувалися результати теоретичного дослідження [4], з якого випливає, що найбільш інформативними характеристиками в задачі відновлення властивостей оболонкової конструкції за відомими параметрами напружено-деформованого стану є мембранна  $\varepsilon_{ij}$  і згинна  $\chi_{ij}$  складові деформації.

Обернена задача формулюється у варіаційній постановці і зводиться до задачі мінімізації цільового функціонала, який задає середньоквадратичне відхилення значень деформацій  $\sigma(X, H)$ , обчислених з використанням математичної моделі прямої задачі, від відповідних значень  $\sigma^*$ , виміряних у точках спостережень  $\gamma_n$ :

$$J(H) = \rho(\sigma(X, H), \sigma^*), \quad H \in \bar{H}, \quad \sigma^* \in \bar{U}.$$

Тоді розв'язок оберненої задачі можна подати у такому вигляді:

$$H = \arg \inf_{H \in \bar{H}} \rho(\sigma(X, H), \sigma^*), \quad H \in \bar{H}, \quad \sigma^* \in \bar{U}, \quad (1)$$

де  $\rho(\sigma(X, H), \sigma^*)$  – функціонал-нев'язка;  $\bar{H}$  – область зміни невідомих оберненої задачі;  $\bar{U}$  – множина можли-

вих деформівних станів оболонки;  $\sigma(X, H) = \{\varepsilon_{ij_n}, \chi_{ij_n}\}$ ;  $\sigma^* = \{\varepsilon_{ij_n}^*, \chi_{ij_n}^*\}$ ,  $n=1, N$ ;  $n$  – номер точки спостережень;  $N$  – кількість точок спостережень;  $i, j=1, 2$ .

Для визначення відповідних розрахункових значень деформацій  $\sigma(X, H)$  у точках  $\gamma_n$  поверхні оболонки використовується математична модель оболонки, що деформується, яка описується системою нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних [5]:

$$L(U(X, H), H(X)) = 0; \quad (2)$$

$$L_\Gamma(U(X, H), H(X)) = 0, \quad (3)$$

де  $L(\cdot)$ ,  $L_\Gamma(\cdot)$  – задані диференціальні оператори, що діють в області  $\Omega$ , зайнятою оболонкою, і на контурі  $\Gamma$  області  $\Omega$  відповідно;  $X = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3\}$  – вектор просторових координат;  $U(X, H) = \{u_1, u_2, w\}$  – вектор-функція переміщень у напрямках  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ .

Складові тангенціальної  $\varepsilon_{ij}$  і згинальної  $\chi_{ij}$  деформації визначаються з геометричних співвідношень, які зв'язують деформації і переміщення серединної поверхні оболонки:

$$\chi_{ij} = -\frac{\partial^2 w}{\partial \xi_i \partial \xi_j}, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} [u_{i, \xi_j} + u_{j, \xi_i}] - B_{ij} w, \quad i, j=1, 2 \quad (4)$$

де  $B_{ij}$  – кривина серединної поверхні оболонки.

**Метод розв'язування.** Для розв'язання прямої задачі (2), (3) здійснюється перехід до дискретної моделі оболонки з використанням методу скінченних елементів. Для опису невідомих функцій прямої і оберненої задач на області, зайнятій оболонкою, вводяться сітки:

– сітка з вузлами  $X_s$  для описання розв'язку прямої задачі (2), (3), де  $X_s = \{\xi_{1s}, \xi_{2s}\}$ ,  $s=1, S$ , а компоненти вектор-функції  $U(X, H) = u_i(H)$ ,  $w(H)$  зображуються у вигляді векторів  $u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iS}\}$ ,  $i=1, 2$ ;  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_S\}$ ;

– сітка з вузлами  $X_k$  для опису вектора невідомих оберненої задачі, де  $X_k = \{\xi_{1k}, \xi_{2k}\}$ ,  $k=1, K$ , а вектор невідомих координат вершин пошкодження зображається у вигляді  $H = \{\xi_{11}, \xi_{21}, \xi_{12}, \xi_{22}, \dots, \xi_{1K}, \xi_{2K}\}$ ;

– сітка з вузлами  $X_n$  для опису виміряних в експерименті значень деформацій оболонки в точках  $\gamma_n$ , де  $n=1, N$  (усі вузли  $X_n$  обираються з числа  $X_s$ ), а результат вимірювань зображується у вигляді вектора  $\sigma^* = \{\varepsilon_{ij_1}^*, \chi_{ij_1}^*, \varepsilon_{ij_2}^*, \chi_{ij_2}^*, \dots, \varepsilon_{ij_N}^*, \chi_{ij_N}^*\}$ .

Ця система подається у вигляді ансамблю скінченних елементів. Невідомі функції прямої і оберненої задач на елементі зображаються для локальної системи координат за допомогою апроксимацій через вузлові значення. Після виконання процедури методу Рітца для задачі (2), (3) при відповідній апроксимації невідомих функцій і підсумовуванні матриць елементів отримуємо систему алгебраїчних рівнянь:

$$KU = R, \quad (5)$$

де  $U = \left( u_1, u_2, w, \left( \frac{\partial w}{\partial \xi_1} \right), \left( \frac{\partial w}{\partial \xi_2} \right) \right)^T$  – вектор вузлових переміщень;  $K = [B]^T [D] [B]$  – матриця жорсткості;  $B$  –

матриця функцій форми;  $D$  – матриця пружності;  $R$  – вектор прямих частин.

У результаті розв'язання системи рівнянь (5) отримуємо вектор переміщень, а компоненти вектора деформацій можуть бути отримані з геометричних співвідношень теорії оболонок (4) шляхом підстановки в них компонент вектора переміщень. Спільно із заданим вектором результатів вимірювань  $\sigma^*$  це дозволяє сформувати вектор нев'язок  $\varepsilon(H) = \{\varepsilon_n\} = \{\sigma(X_n, H) - \sigma^*\}$ ,  $n = \overline{1, N}$ , потрібний для обчислення функціонала-нев'язки в (1):

$$J(H) = (\sigma(X_n, H) - \sigma^*)^T (\sigma(X_n, H) - \sigma^*). \quad (6)$$

Для виконання числової мінімізації функціонала (6) використовуватимемо метод Ньютона-Рафсона, тоді ітераційний процес пошуку вектора параметрів  $H$  матиме вигляд:

$$H^{p+1} = H^p - h_p (J''(H^p))^{-1} J'(H^p), \quad (7)$$

де  $J''(H^p)$  – гесіан функціоналу  $J$  у точці  $H^p$ ;  $J'(H^p)$  – градієнт функціоналу  $J$  у точці  $H^p$ ;  $h_p$  – величина кроку, яку можна регулювати;  $p$  – номер кроку ітераційного процесу.

Компоненти градієнта і гесіана функціоналу можна zobraziti так:

$$J'(H^p) = \frac{\partial J(H^p)}{\partial H_j} = 2 \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{\partial \varepsilon_n(H^p)}{\partial H_j} \right\} \varepsilon_n(H^p);$$

$$J''(H^p) = 2 \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{\partial \varepsilon_n(H^p)}{\partial H_j} \right\}^T \left\{ \frac{\partial \varepsilon_n(H^p)}{\partial H_i} \right\} - 2 \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{\partial^2 \varepsilon_n(H^p)}{\partial H_j \partial H_i} \right\} \varepsilon_n(H^p),$$

де  $H_j, H_i$  – компоненти вектору параметрів.

Матриця  $\left\{ \frac{\partial \varepsilon_n(H^p)}{\partial H_j} \right\}$  будується чисельно. Оскільки

наявність дефекту ініціює в системі напружено-деформований стан, розподіл якого є істотно неоднорідним по поверхні оболонки і характеризується швидкою зміною рівня деформацій за обома координатами, то розглянута задача належить до класу погано обумовлених, а алгоритм формування її розв'язку (7) може виявитися нестійким. Істотний вплив на обумовленість оберненої задачі, а також на точність і регулярність її розв'язку здійснює вибір розташування і кількості точок спостереження.

Передбачається, що серед результатів вимірювань компонент вектора деформацій у вузлах сітки  $X_n$ , тобто повного вектора вимірювань, існують інформативні і неінформативні данні.

У цій статті вибір інформативних точок вимірювань пропонується здійснювати з умови мінімуму норми різниці векторів невідомих оберненої задачі, побудованих з використанням інформативного вектора спостережень, і повного вектора спостережень:

$$J = \sum_n (H - H(\gamma_n))^T (H - H(\gamma_n)) \rightarrow \min, \quad (8)$$

де  $H(\gamma_n)$  – вектор невідомих оберненої задачі, визначений з ітераційної процедури (7) з використанням при побудові функціонала-нев'язки (1) інформативного вектора спостережень;  $H$  – вектор, який обчислюється з використанням повного вектора спостережень.

При цьому сітка можливих вимірювань задана і збігається із сіткою прямої задачі  $X_s = \{\xi_{1s}, \xi_{2s}\}$ ,  $s = \overline{1, S}$ . Для визначення інформативних компонент вектора спостережень пропонується подати вектор нев'язок  $\varepsilon = \{\varepsilon_n\} = (\sigma(X_n, H) - \sigma^*)$  у вигляді двох незалежних векторів  $\varepsilon^1, \varepsilon^2$  розмірності  $N_1 \times 1, N_2 \times 1$  відповідно,  $N_1 + N_2 = N$  (для визначеності будемо вважати, що компоненти вектора  $\varepsilon^1$  обчислені в інформативних точках спостереження).

Для формування векторів  $\varepsilon^1, \varepsilon^2$  вводяться функції належності  $u_n^j$  ( $n = \overline{1, N}, j = 1, 2$ ) компонент вектора  $\varepsilon$  векторам  $\varepsilon^1$  і  $\varepsilon^2$  у вигляді:

$$u_{n_1}^1(X) = \delta(X - X_{n_1}); n_1 \in I^1, I^1 = \{n_{1_1}, \mathbf{K}, n_{1_{N_1}}\};$$

$$u_{n_2}^2(X) = \delta(X - X_{n_2}); n_2 \in I^2, I^2 = \{n_{2_{N_1+1}}, \mathbf{K}, n_{2_N}\};$$

$$I^1 \cap I^2 = \emptyset,$$

де  $\delta(X - X_{n_p})$  – функція Дірака;  $N_1$  – кількість ненульових компонент вектора  $\varepsilon^1$ .

У результаті формується вектор нев'язок, номери компонент якого і визначають інформативні компоненти з компонент повного вектора спостережень. Інформативні компоненти вектора спостережень використовуються при визначенні вектора невідомих оберненої задачі в ітераційній процедурі (7).

**Опис лабораторного експерименту.** Для проведення експерименту були використані точені циліндричні оболонки з пошкодженнями у вигляді тріщини і наскрізного отвору. Вимірювання характерних спостережуваних параметрів – тангенціальної  $\varepsilon_{ij}^*$  і згинної  $\chi_{ij}^*$  складових деформації – проводилися з використанням тензорезисторів КФ5П1-3-200-Б-12, які були наклеєні на зовнішній і внутрішній поверхнях оболонки. Сенсори встановлювалися у двох взаємноперпендикулярних напрямках, що збігаються з вибраними осями координат моделі оболонки. Таке розташування сенсорів дає змогу вимірювати значення деформацій  $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \chi_{11}, \chi_{22}$ .

Вимірювання тензорезисторів фіксувалися за допомогою багатоканальної тензометричної станції.

Оболонка знаходилась під дією рівномірно розподіленого осьового стиску. Навантажувальний пристрій складався з двох сталевих плит, які мають товщину 50 мм. Одна з плит кріпилася до основи фундаменту і була нерухомою, друга переміщалася паралельно підставі по напрямних стійках. Дослідна циліндрична оболонка і динамометр розташовувалися між плитами, навантаження здійснювалося за допомогою гайок, встановлених на напрямних стійках, і реєструвалося динамометром.

Були реалізовані граничні умови, які відповідають нерухомому шарнірному спіранню торців оболонки.

**Результати обчислювального експерименту.** Запропонований підхід був застосований для ідентифікації пошкоджень у вигляді тріщини і наскрізного отвору оболонки, що знаходиться під дією рівномірного осевого стиску. Як об'єкт дослідження розглядалася точена тонкостінна циліндрична оболонка, виготовлена з матеріалу АМГ-6 та має такі геометричні параметри:  $L = 200 \text{ мм}$ ;  $R = 70 \text{ мм}$ ;  $h = 1.02 \text{ мм}$ , де  $L$ ,  $R$ ,  $h$  – довжина, радіус і товщина оболонки.

Було розглянуто випадки ідентифікації тріщини, яка розташована паралельно криволінійній кромці оболонки, і наскрізного отвору довільної форми.

**Модель вимірювання.** Для формування вектора значень деформацій  $\sigma^*$  використовувалися результати експериментального дослідження. Сенсори розташовувалися рівномірно по поверхні оболонки з кроком  $\Delta\xi_1 = 40 \text{ мм}$ ,  $\Delta\xi_2 = 42 \text{ мм}$ . Оскільки база тензорезистора має геометричні розміри  $4 \times 2 \text{ мм}$ , то за значення деформацій, обчислених з використанням математичної моделі, вибирались середні значення за елементами дискретної моделі оболонки, що займають площу під сенсором.

Оцінювання точності застосованого методу визначення деформацій поверхні оболонки здійснювалося шляхом розв'язування контрольних теоретичної і експериментальної задач з відомими даними про параметри оболонки, розташування і розміри тріщини, параметри навантаження.

Теоретичне розв'язування контрольної задачі здійснювалося за допомогою методу скінченних елементів. На основі розв'язку прямої задачі було обчислено значення деформацій для елементів сітки, що збігаються з точками встановлення сенсорів.

У табл. 1 наведено результати порівняння експериментальних і розрахункових значень деформацій, відхилення виміряних в експерименті значень деформацій від отриманих при розв'язанні задачі (2), (3) з використанням методу скінченних елементів не перевищує 6 %.

**Вибір точок спостереження.** Далі для отримання регулярних розв'язків оберненої задачі здійснювався вибір місця розташування точок спостережень, що забезпечують виконання умови (8). Схема розташування сенсорів для задачі відновлення місця розташування тріщини наведено на рис. 1. Слід зазначити, що серед шести вибраних сенсорів два розташовано в околі тріщини, а інші – на різній віддалі від неї.

**Ідентифікація пошкоджень.** Ідентифікація вектора невідомих оберненої задачі виконувалась в ітераційному процесі (7) за результатами показів сенсорів, вибраних на попередньому етапі.

На рис. 2, рис. 3 зображено результати ітераційного процесу відновлення координат вершин пошкоджень у вигляді тріщини (відповідає рис. 2) і наскрізного отвору (відповідає рис. 3). За початкове наближення було вибрано область (на рис. 2 і рис. 3 межа області зображена штрихпунктирною лінією), в якій спостерігалися найбільші відхилення значень деформацій від відповідних значень, отриманих для непошкодженої оболонки. Координати вершин ламаної лінії, що обмежує цю область, було прийнято за початкове наближення до компонент вектора невідомих оберненої задачі. Реальні пошкодження позначені

**Результати порівняння експериментальних і розрахункових значень деформацій**

Сенсор	Експериментальне значення деформації	Номер елементів сітки, для визначення розрахункового значення деформації	Розрахункове значення деформації	Помилка, %
1	$2.56 \cdot 10^{-5}$	4969, 5028, 5087, 5146, 5206, 5267, 5329, 5391	$2.452 \cdot 10^{-5}$	4.3
7	$-2.21 \cdot 10^{-5}$	3100, 3158, 3217, 3276, 3336, 3396, 3457, 3518	$-2.09 \cdot 10^{-5}$	5.5
11	$2.89 \cdot 10^{-5}$	7396, 7486, 7577, 7669, 7762, 7855, 7949, 8044	$2.761 \cdot 10^{-5}$	4.5
17	$-1.4 \cdot 10^{-5}$	6094, 6168, 6243, 6319, 6396, 6474, 6553, 6633	$-1.349 \cdot 10^{-5}$	3.6
19	$-2.15 \cdot 10^{-5}$	14120, 14212, 14303, 14394, 14485, 14576, 14667, 14758	$-2.037 \cdot 10^{-5}$	5.3
25	$-2.56 \cdot 10^{-5}$	24224, 24295, 24365, 24433, 24501, 24576, 24684, 24689	$-2.482 \cdot 10^{-5}$	3.05

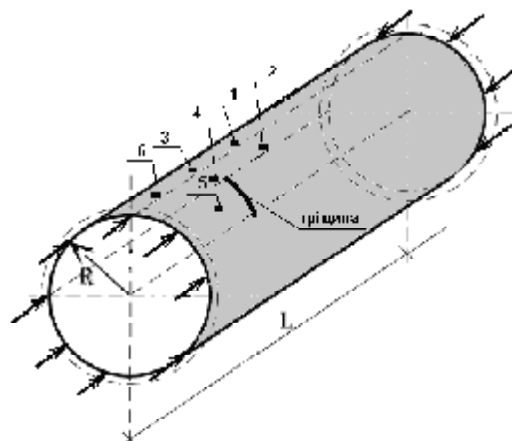


Рис. 1

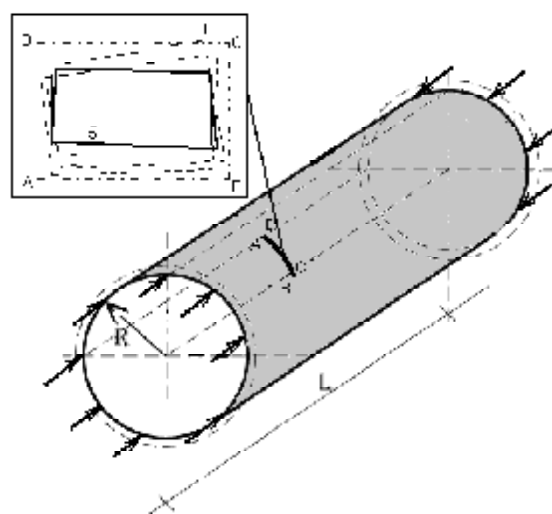


Рис. 2

тонкою суцільною лінією; пунктирними лініями позначені контури наближень, отримані на ітераціях методу Нью-

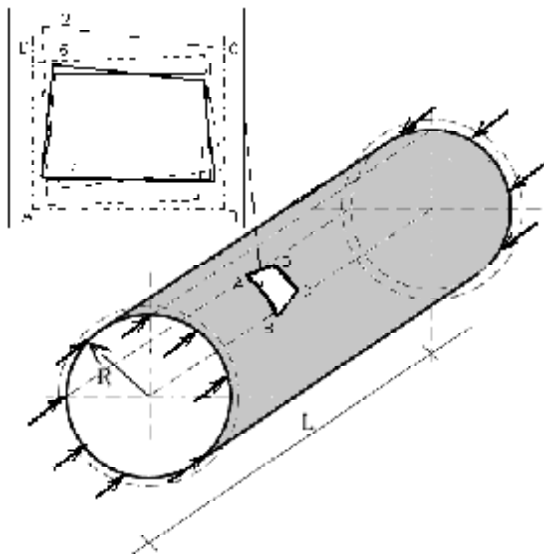


Рис. 3

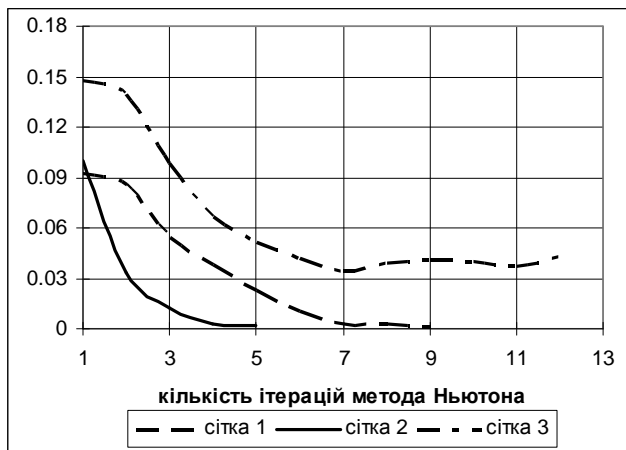


Рис. 4

тона (номер біля наближення до межі дефекту відповідає номеру ітерації), суцільна жирна лінія зображає результат відновлення форми і розташування отвору й тріщини.

Слід зазначити, що в результаті виконання перших ітерацій методу Ньютона область початкового наближення збігається до реальних розмірів пошкодження, на подальших ітераціях відбувається уточнення координат вершин.

**Вплив вибору точок спостережень на результати ідентифікації.** Було досліджено вплив вибору точок спостереження на результати відновлення координат вершин межі області пошкодження. Порівнювались результати відновлення межі області пошкодження для трьох типів сіток вимірювань. У першому випадку (сітка 1) точки вимірювань рівномірно розподілені по поверхні оболонки (вибрано 25 точок спостереження), в другому випадку (сітка 2) точки вимірювань вибиралися так, щоб забезпечувалося виконання умови (8) (вибрано 6 точок спостереження), в третьому (сітка 3) – точки вимірювань вибиралися в околі пошкодження, за результати вимірювань використано покази сенсорів № 3, 4, 5 (номери і розташування сенсорів подано на рис. 1).

Результати відновлення координат вершин тріщини

Дійсні координати вершин тріщини	Результат ідентифікації з використанням сітки вимірювань		Похибка відновлення координати, %	
	Сітка 2	Сітка 3	Сітка 2	Сітка 3
A: 74, -0.1819	74.34, -0.18	70.4, -0.196	3.2; 0.3	9.3; 2.4
B: 74, 0.1819	73.08, 0.1908	69.34, 0.2213	5.0; 4.9	24.3; 21.7
C: 75, 0.1819	74.8, 0.1728	76.8, 0.2261	0.3; 5.0	2.4; 24.3
D: 75, -0.1819	75.24, -0.176	71.54, -0.165	0.32; 3.2	4.6; 9.3

На рис. 4 для розглянутих типів сіток вимірювань зображено характер поведінки норми функціонала-нев'язки (6) на ітераціях методу Ньютона. З аналізу рис. 4 можна зробити висновок, що спеціальний вибір точок спостережень (сітка 2), відповідний виконанню умови (8), забезпечує більш швидке зменшення значень норми функціонала-нев'язки, потрібна точність відновлення координат вершин пошкодження досягається на 5-й ітерації. При використанні рівномірної сітки (сітка 1) збільшується розмірність матриці оберненої задачі, що призводить до погіршення її обумовленості і швидшого накопичення обчислювальної похибки, зменшення значень норми функціонала-нев'язки відбувається повільніше, а для отримання результату ідентифікації треба виконати 9 ітерацій.

При використанні показів сенсорів, розташованих тільки в околі тріщини (сітка 3), не вдається отримати задовільний результат ідентифікації, значення норми функціонала-нев'язки зі збільшення номера ітерації не зменшуються.

У табл. 2 наведено результати відновлення координат вершин тріщини, які отримано з використанням різних сіток вимірювань. Аналізуючи результати можна бачити, що у разі використання сітки 2, що відповідає виконанню умови (8), відносна похибка відновлення координат вершин пошкодження менша, крім того, для досягнення заданої точності ідентифікації координат вершин потрібно виконати меншу кількість ітерацій (наведені результати отримані на 5-й ітерації методу Ньютона).

При використанні значень характеристик напружено-деформованого стану, виміряних тільки в околі пошкодження (сітка 3), найбільша відносна похибка відновлення координати вершини перевищує 20 % і не зменшується зі збільшенням номера ітерації (наведені результати, які отримані на 8-й ітерації методу Ньютона).

**Висновки.** Розроблений експериментально-розрахунковий метод і алгоритм ідентифікації дозволяють визначати геометричні параметри пошкодження з використанням результатів спостережень за характеристиками напружено-деформованого стану оболонки в процесі експлуатації; запропонований підхід дозволяє визначити розташування і кількість точок спостереження, використання значень деформацій, в яких при побудові функціонала оберненої задачі дає змогу отримати стійкий розв'язок геометричної оберненої задачі.

Автори роботи виражають щире подяку професорові Ободан Наталії Іллівні за цінні поради і пропозиції, висловлені при обговоренні результатів проведених досліджень.

### Література

1. Ватульян А.О. О различных способах реконструкции полости в ортотропном слое / А.О. Ватульян, О.А. Беляк // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 3. – С. 181-189.

2. Постнов В.А. Использование метода регуляризации Тихонова для решения задач идентификации упругих систем / В.А. Постнов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2010. – № 1. – С. 64-71.

3. Янютін Є.Г. Розв'язання нестационарних прямих та обернених задач для балок з пружним додатковим спіранням / Є.Г. Янютін, Г.О. Гнатенко, В.Т. Гришакін // Машинознавство. – 2007. – № 8. – С. 18-23.

4. Гук Н.А. Выбор критерия идентификации в обратных задачах теории оболочек / Н.А. Гук, Н.А. Ободан, Г.М. Гавеля // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2010. – Вип. 14. – С. 123-133.

5. Ворovich И.И. Математические проблемы нелинейной теории пологих оболочек / И.И. Ворovich. – М.: Наука, 1989. – 373 с.

Отримана 18.10.12

*N. Guk, A. Patsuk, A. Polishko, G. Sherstuk*  
**Identification of damages in thin-walled shells, which is observed**

*Dnepropetrovsk National University named by O. Gonchar*

*The method and algorithm of identification damages of thin-walled shell with use of supervision results is considered. Location and the size of damage using the solution of a geometrical inverse problem are defined, the location of supervision points which provides accuracy and stability of solution, is choose. Results of identification of damages to a type of a crack and a hole are given. Results of identification of unknown parameters, which are received with use of different grids of measurements, are compared.*

### Інформація

## The IUTAM 2013 Symposium on MULTISCALE MODELING AND UNCERTAINTY QUANTIFICATION OF MATERIALS AND STRUCTURES

The purpose of the Symposium is to promote achievements in uncertainty quantification combined with multiscale modeling and to encourage research and development in this growing field with the aim of improving the safety and reliability of engineered materials and structures.

### Objectives

Over the last few years, the development of multiscale modeling in a stochastic setting for uncertainty quantification and reliability analysis of materials and structures, as well as the integration of stochastic methods into a multiscale framework is becoming an emerging research frontier.

The purpose of this Symposium is to promote achievements in uncertainty quantification combined with multiscale modeling and to encourage research and development in this growing field with the purpose of improving the safety and reliability of engineered materials and structures. The Symposium is expected to act as a forum for researchers in the field where recent advances will be discussed and future research directions will be identified.

### Symposium Topics

The Symposium topics include (the list is indicative):  
Random field modeling of multiscale systems  
Multiscale methods involving uncertainties  
Microstructure/morphology characterization  
Concept of Representative Volume Element in elasticity, plasticity, and fracture/damage  
Strength upscaling of statistical defects at micro- and nano-scale  
Homogenization of random heterogeneous materials  
Stochastic fracture and damage  
Wave propagation in random media involving multiple length and time scales  
Validation of stochastic multiscale modeling techniques

### Secretariat

Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research  
National Technical University of Athens  
Zografou Campus, Athens 15780, Greece  
Tel.: +30 210 7723450; Fax: +30 210 7721693  
E-mail: [info@iutam2013-ntua.org](mailto:info@iutam2013-ntua.org); URL: [www.iutam2013-ntua.org](http://www.iutam2013-ntua.org)