

АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТНИХ ДІЛЯНОК БАГАТОШАРОВОЇ ТОНКОСТІННОЇ КОНСТРУКЦІЇ З ПЕРІОДИЧНОЮ СТРУКТУРОЮ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Л.М. Лобанов, І.Л. Шкурат, О.П. Шуткевич, І.В. Киянець, В.В. Савицький

ІЕЗ ім. Патона Є.О. НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: innashkurat2909@gmail.com

У роботі застосовано методи моделювання та аналізу даних для виявлення та оцінювання деформацій у тонкостінних конструкціях, зокрема у зварних багатошарових панелях. Використання методу скінченних елементів дозволило встановити характерні просторові профілі деформації та їхній зв'язок із локалізацією дефектів. Методи Фур'є-аналізу та диференціального числення використано для розроблення алгоритму автоматизованого пошуку дефектних ділянок у тонкостінних конструкціях. Показано, що використання похідної переміщень $\partial w / \partial u$ забезпечує чіткішу локалізацію дефектів порівняно з аналізом лише переміщень. Це обґрунтовує доцільність застосування методу ширографії як одного з найінформативніших підходів неруйнівного контролю таких конструкцій. Отримані результати підтверджуються як чисельними, так і експериментальними даними, що свідчить про придатність методики для діагностики широкого класу тонкостінних конструкцій. Бібліогр. 19, рис. 14.

Ключові слова: тонкостінні конструкції, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, Фур'є-аналіз, неруйнівний контроль якості, лазерна інтерферометрія, ширографія, автоматизований пошук дефектів

Вступ. Металеві багатошарові тонкостінні конструкції панельного типу (зварні панелі) широко застосовуються в авіабудуванні, автомобілебудуванні, суднобудуванні та інших галузях машинобудування. Такі конструкції вирізняються високою питомою міцністю та жорсткістю за відносно невеликої маси, що досягається завдяки раціональному розподілу матеріалу між шарами та елементами панелі. Крім того, панельна конструкція забезпечує технологічність виготовлення великогабаритних елементів складної форми та дає змогу локально підсилювати найбільш навантажені ділянки без суттєвого збільшення загальної маси виробу [1, 2].

Одним із найпоширеніших способів з'єднання елементів таких конструкцій є точкове зварювання, яке вирізняється високою продуктивністю та легкістю автоматизації. Застосування точкового зварювання дозволяє отримати металоконструкції з високою міцністю та мінімальними залишковими деформаціями порівняно з конструкціями, виконаними суцільними зварними швами [3].

Враховуючи специфіку формування зварної точки, а саме: короткочасність процесу, локальний нагрів і швидке охолодження, цей тип з'єднань вирізняється високою ймовірністю виникнення прихованих дефектів. Зокрема можливе утворення непроварів, руйнування ядра зварної точки, відшпа-

рування та інших дефектів, які істотно знижують експлуатаційну надійність конструкції.

Оскільки такі дефекти не можуть бути виявлені під час візуального контролю, а їхня наявність безпосередньо впливає на експлуатаційну надійність конструкції, особливої актуальності набуває застосування різних методів неруйнівного контролю якості для своєчасної ідентифікації дефектів [4–7].

Серед традиційних підходів до контролю зварних точкових з'єднань застосовують ультразвуковий, вихрострумний, рентгенографічний та інші методи неруйнівного контролю [8–10]. Проте їхнє застосування під час контролю великогабаритних панельних конструкцій із великою кількістю зварних точок має обмежену продуктивність, що пов'язано з необхідністю послідовного обстеження окремих зварних з'єднань.

Серед існуючих методів неруйнівного контролю одними з найефективніших є методи лазерної інтерферометрії, зокрема голографічна інтерферометрія, спекл-інтерферометрія та ширографія [11–14]. Ці методи ґрунтуються на реєстрації та подальшому аналізі даних про деформацію точок поверхні досліджуваного об'єкта, що виникають під дією зовнішнього навантаження. Завдяки високій чутливості до локальних змін напружено-деформованого стану ці методи дозволяють виявляти приховані дефекти, які складно ідентифікувати за допомогою традиційних (контактних) методів контролю. Безконтактність і висока просторова роздільна здатність цих методів дозволяють отри-

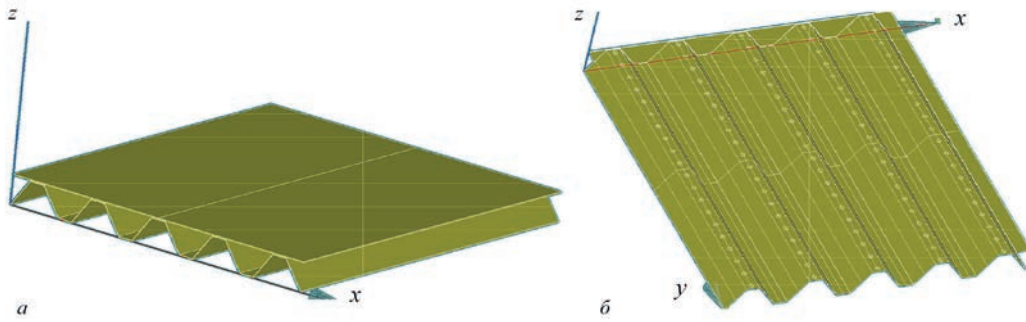


Рис. 1. Геометрична модель зварної конструкції: *а* – вигляд із лицьової сторони, *б* – вигляд зі сторони гофрованого заповнювача

мувати повноформатні карти деформацій поверхні та забезпечують можливість автоматизованого контролю тонкостінних конструкцій.

Незважаючи на високу інформативність і чутливість методів лазерної інтерферометрії, аналіз отриманих результатів у більшості випадків виконується оператором вручну. Це знижує продуктивність контролю та підвищує залежність результатів діагностики від кваліфікації й суб'єктивного досвіду спеціаліста [11–14]. Особливо це стосується контролю конструкцій складної форми або конструкцій з періодичною структурою, де локальні зміни поля деформацій можуть бути малопомітними на фоні загального розподілу переміщень, що ускладнює достовірне визначення місцезнаходження дефектної ділянки за результатами візуального аналізу поля деформацій поверхні об'єкта.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення методу автоматичного пошуку та локалізації дефектів у тонкостінних конструкціях під час неруйнівного контролю якості оптичними методами. Реалізація такого підходу дозволить знизити суб'єктивний вплив оператора та підвищити точність локалізації дефектів. Відомі підходи до автоматизованого пошуку дефектів у регулярних тривимірних структурах базуються на математичному моделюванні та розв'язанні задач оптимізації параметрів конструкції [15]. На відміну від них, у даній роботі запропоновано алгоритм автоматизованого визначення дефектних ділянок конструкцій з періодичною структурою за результатами ширографічного контролю, який ґрунтується на Фур'є-аналізі профілю деформування поверхні, формуванні еталонної бездефектної ділянки та обчисленні кількісної оцінки відхилення профілю деформації.

Чисельне моделювання напружено-деформованого стану зварної панелі методом скінченних елементів. Для моделювання напружено-деформованого стану (НДС), який виникає в процесі неруйнівного контролю якості при різних видах навантаження, було використано метод скінченних елементів. У якості об'єкта дослі-

дження обрано двохшарову зварну конструкцію, що складається з обшивки та гофрованого заповнювача трапецієподібного профілю, з'єднаних методом точкового зварювання. Заповнювач має періодичну форму: прямолінійні ділянки по чергово контактують із верхньою обшивкою та з умовною площиною нижньої обшивки. Панель розміром $800 \times 600 \times 50$ мм виготовлена зі сталі Ст3 завтовшки 2 мм, діаметр зварних точок становить ~ 6 мм. Побудовано тривимірну модель, яка використовується при чисельному моделюванні НДС методом скінченних елементів (рис. 1).

Задача розв'язувалася у тривимірній постановці в рамках слабко зв'язаної лінійної термопружності без урахування пластичних деформацій та без залежності властивостей матеріалу від температури. На першому етапі визначався розподіл температур $T(x, y, z, t)$ із рівняння теплопровідності $\rho c \partial T / \partial t = \text{div}(\lambda \text{grad } T)$ при накладеному тепловому потоці на одній стороні панелі (гранична умова другого роду, закон Фур'є) та початковій температурі, що відповідає кімнатній ($T_0 \approx 293$ К). Отримане поле температур використовувалося як теплове навантаження в задачі пружної рівноваги $\text{div}(\sigma) = 0$, де σ – тензор напружень. Напруження визначалися із закону Гука для лінійно-пружного ізотропного матеріалу з урахуванням теплової деформації: $\sigma = E(\epsilon - \alpha \Delta T)$, де ϵ – відносна деформація, α – коефіцієнт лінійного теплового розширення, $\Delta T = T - T_0$ – зміна температури відносно початкового стану.

Матеріал панелі (сталь Ст3) моделювався як лінійно-пружний ізотропний з наступними властивостями: модуль пружності $E = 200$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 50$ Вт/(м·К), питома теплоємність $c = 470$ Дж/(кг·К), густина $\rho = 7850$ кг/м³. Коефіцієнти E і ν визначають пружні властивості матеріалу в тривимірній постановці задачі.

Граничні умови задавалися окремо для механічної й теплової частин задачі. На ділянках за-

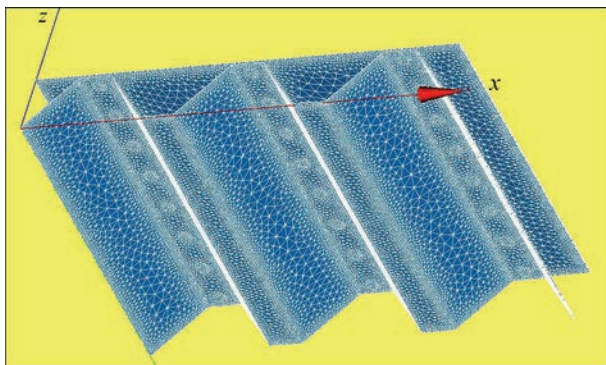


Рис. 2. Скінченно-елементна сітка спрощеної моделі зварної панелі

повнювача, що в повній конструкції контактують із нижньою обшивкою (яку для спрощення моделі виключено з розрахункової області), накладалися: механічна умова повного закріплення ($u = v = w = 0$), що імітує опору конструкції на нижню обшивку; тепла умова першого роду – стала температура $T = T_0$ (кімнатна), що моделює нижню обшивку як тепловий стік. Додатково задавалася фіксація бічних граней у напрямку осі OY . Теплове навантаження у вигляді теплового потоку прикладалося до зовнішньої поверхні верхньої обшивки; решта поверхонь конструкції вважалися теплоізованими.

Для генерації скінченно-елементної сітки використовувалося середовище SALOME [16], а розрахунок теплового та напружено-деформованого станів проводився за допомогою комплексу

Code_Aster [17]. Розбиття конструкції на елементи виконано з формуванням тривимірної тетраедральної сітки (рис. 2). Розмір елементів сітки варіювався по об'єму конструкції: базовий крок дискретизації становив 0,5 мм, при цьому в зоні зварних точок, де спостерігається зміна кривизни поверхні та геометрії з'єднання, алгоритм автоматично формував щільнішу сітку з дрібнішими елементами порівняно з рештою конструкції.

Термічне навантаження моделювали шляхом нагрівання верхньої поверхні зварної конструкції тепловим потоком потужністю $Q_0 = 8000 \text{ Вт/м}^2$ протягом часу $t_0 = 10 \text{ с}$. Розподіл зміни температури, що формується в конструкції у результаті такого термічного навантаження, зображено на рис. 3, де спостерігається локальний мінімум значень зміни температури в околі зварних точок. Це пояснюється наявністю ядер зварних точок, які мають підвищену теплопровідність порівняно з прилеглими ділянками конструкції та забезпечують інтенсивніший тепловідвід. Така нерівномірність температурного поля призводить до нерівномірної деформації поверхні зварної панелі.

Проведено моделювання розподілу значень w (нормальної компоненти переміщення точок аналізу на поверхні конструкції) у точках конструкції. Уздовж перерізу I не спостерігається суттєвих локальних максимумів, за допомогою яких можна оцінити наявність і діаметр ядер зварних точок (рис. 4).

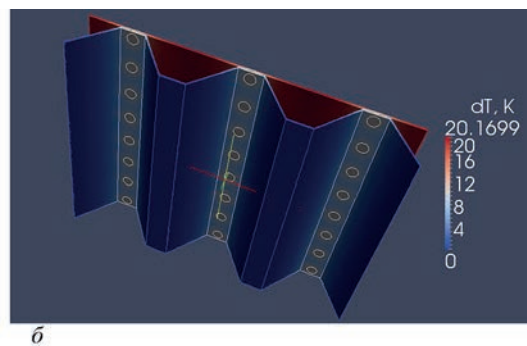
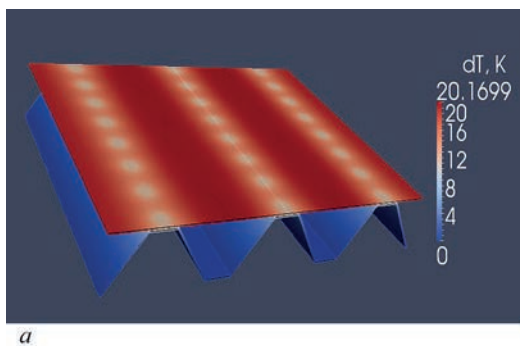


Рис. 3. Розподіл зміни температури у конструкції у результаті термічного навантаження: а – вигляд з лицьової сторони, б – вигляд зі сторони середнього шару конструкції

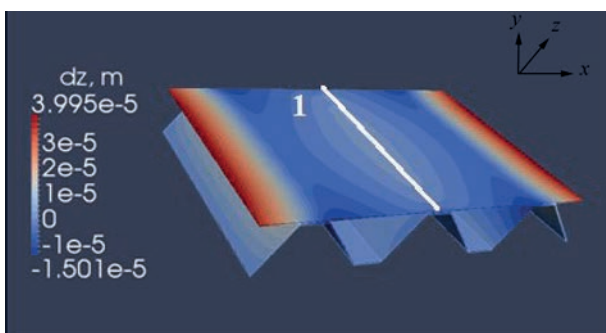


Рис. 4. Розподіл переміщень у панелі без дефектів зварювання

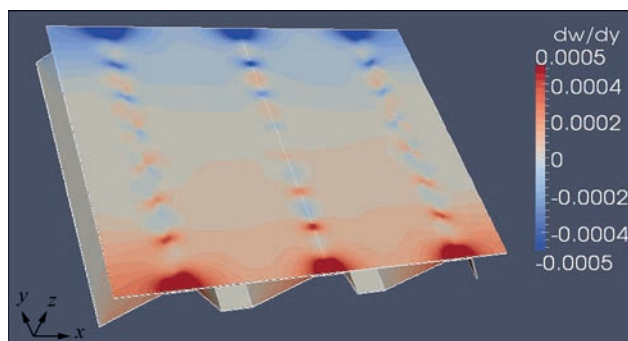


Рис. 5. Розподіл похідної переміщень точок поверхні зварної панелі при її термічному навантаженні

Профіль зміни компоненти $w(y)$, побудований за даними про переміщення вздовж перерізу I , дозволяє визначити місцезнаходження зварних точок, але амплітуда збурень деформації навколо них є різною, що не дозволяє оцінити діаметр ядра окремої зварної точки.

На рис. 5 наведено розподіл $\partial w/\partial y$ (похідної переміщення w за координатою y вздовж досліджуваного перерізу конструкції), на якому координати зварних точок проявляються чіткіше порівняно з рис. 4. Таким чином, для такого типу конструкцій використання методу широкоріччя, який реалізує оптичне диференціювання поля переміщень, є доцільнішим у порівнянні з методами спекл-кореляції, спекл- та голографічної інтерферометрії. Аналіз цього розподілу дає змогу оцінити вплив кожної зварної точки на загальне поле деформацій зовнішньої поверхні конструкції. Однак ця картина дозволяє лише якісно оцінювати дефектність тієї чи іншої зварної точки.

Більш інформативною є крива зміни похідної $\partial w/\partial y$, побудована вздовж перерізу I , що проходить через центри зварних точок. Аналіз цієї залежності дає змогу визначити їхнє місцезнаходження. Однак амплітуда локальних збурень деформації в околі окремих точок є різною, що ускладнює оцінювання діаметра ядра окремої зварної точки. На рис. 6 наведено розподіл компоненти переміщення w та її похідної $\partial w/\partial y$ уздовж цього перерізу. Аналіз отриманих залежностей показує, що ядра зварних точок проявляються у вигляді локальних мінімумів. Графік складається з частин, які повторюються та відповідають геометричним частинам конструкції. На відміну від компоненти переміщення w , для якої спостерігається суттєвий вплив крайового ефекту, розподіл похідної $\partial w/\partial y$ є рівномірнішим. Крайовий ефект змінює картину деформування на ділянках, які знаходяться біля початку та кінця конструкції.

Проведено моделювання впливу діаметра ядра зварної точки на переміщення w та похідну переміщення в зварній панелі уздовж обраного на-

прямку y при термічному навантаженні. Для цього було додано дефектні зварні точки, в яких було відсутнє якісне з'єднання, та проведено дослідження їхнього впливу на деформування поверхні об'єкта (рис. 7).

Моделювання показало, що в результаті термічного навантаження конструкції, яке виконано аналогічно експериментам при широкоріччю контролі якості, проявляється складна картина деформування. Причому амплітуда w та $\partial w/\partial y$ у дефектних точках не перевищує амплітуду в сусідніх точках. Даний факт ускладнює процес виявлення дефектів, а також призводить до обов'язкової участі висококваліфікованого оператора при неруйнівному контролі якості.

Методика автоматизованого визначення місця розташування дефектів за даними деформації поверхні при навантаженні конструкції. Основною метою розробленого алгоритму є автоматизоване визначення місцезнаходження ділянок конструкції, деформація в яких суттєво відрізняється від середньої деформації ділянок у профілі. Оскільки профіль деформування поверхні конструкції P об'єкта дослідження має періодичну структуру, для визначення його періоду доцільно використовувати дискретне перетворення Фур'є (Discrete Fourier Transform, DFT), яке є одним із базових методів, що широко застосовується в алгоритмах цифрової обробки сигналів [18], а також в інших областях, пов'язаних із аналізом частот у дискретному сигналі.

У результаті Фур'є-перетворення можна отримати дані про кількість повторюваних ділянок N (кількість періодичних ділянок, що увійшли у профіль). Знаючи загальну довжину досліджуваного профілю конструкції l і загальну кількість дискретних точок N_0 , що припадає на довжину профілю, можна отримати значення періоду структурних неоднорідностей конструкції T і кількість точок N_1 , які припадають на один період T .

Після розбиття конструкції на ділянки завдовжки T визначається еталонна бездефектна ділянка

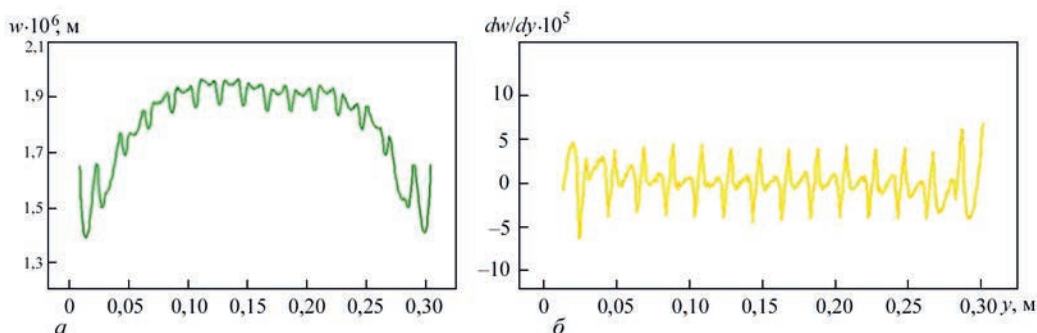


Рис. 6. Розподіл переміщень w (а) та похідної $\partial w/\partial y$ (б) уздовж перерізу I при термічному навантаженні тришарової панелі

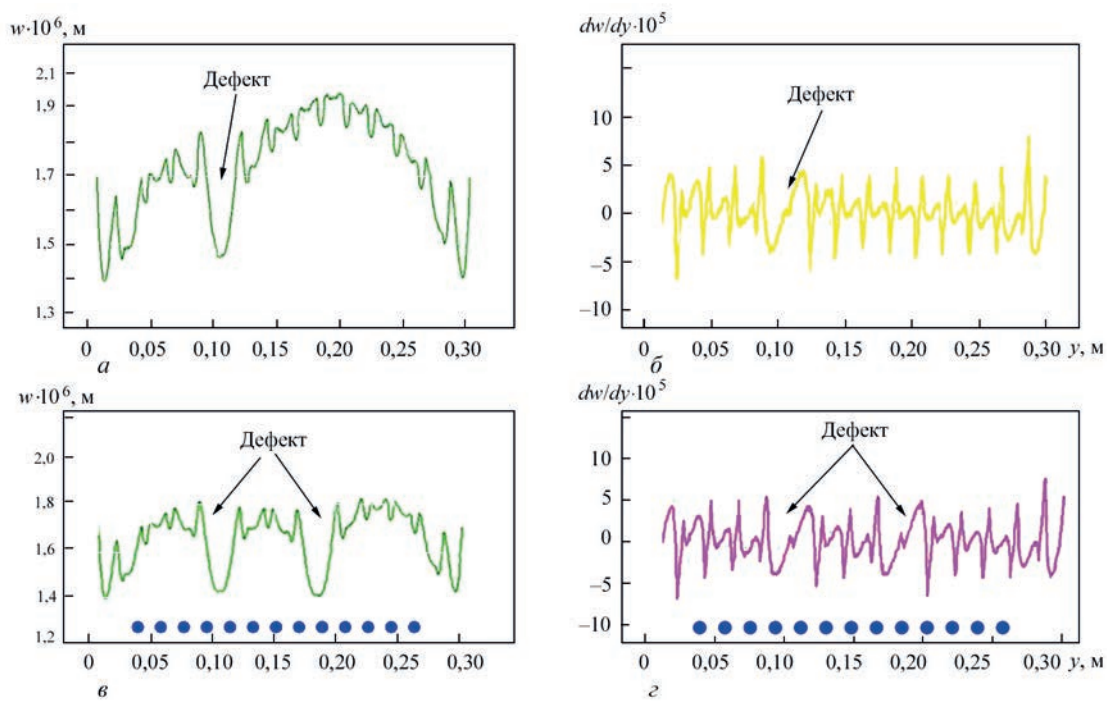


Рис. 7. Залежності переміщень w та її похідної $\partial w/\partial y$ у зварній панелі з однією (а, б) та двома дефектними зварними точками (в, з). Синім позначено положення зварних точок

профілю P_e за допомогою усереднення або за алгоритмом медіанної фільтрації. Обчислення значень компонент вектору переміщень вздовж P_e здійснюється на основі припущення, що кількість дефектних зварних точок у конструкції мала порівняно з їхньою загальною кількістю.

При усередненні враховуються всі точки $i = 1 \dots N_1$ на кожній ділянці конструкції (рис. 8) і обчислюється середнє значення функції в цих точках. Це значення відповідає значенню функції на еталонній бездефектній ділянці в i -й точці.

Другий метод, який можна застосувати для визначення еталонної бездефектної ділянки – це медіанна фільтрація. Медіанні фільтри часто використовуються на практиці як засіб попередньої обробки цифрових даних [19]. Специфічною особливістю фільтру є явно виражена вибірковість щодо елементів масиву, які різко виділяються на тлі сусідніх відліків. У той же час на монотонну складову послідовності медіанний фільтр не діє, залишаючи її без змін. Завдяки цій особливості,

медіанні фільтри при оптимально обраній апертурі можуть, наприклад, зберігати без спотворень різкі межі об'єктів, ефективно пригнічуючи некорельовані або слабо корельовані шуми та дрібні деталі. Ця властивість дозволяє застосовувати медіанну фільтрацію для усунення аномальних значень у масивах даних і зменшення імпульсних шумів.

Медіаною числової послідовності $x_1, x_2, \dots, x_n$ при непарному n є середнє за значенням число ряду, отримане при упорядкуванні цієї послідовності за зростанням (або спаданням). Для парних n медіану зазвичай визначають як середнє арифметичне двох середніх відліків упорядкованої послідовності.

Медіанний фільтр являє собою віконний фільтр, який послідовно ковзає по масиву даних і повертає на кожному кроці один із елементів як центральний елемент цього вікна. Вихідний сигнал y_k медіанного фільтра з апертурою $2n + 1$ для поточного відліку k формується з вхідного часового ряду відповідно до формули:

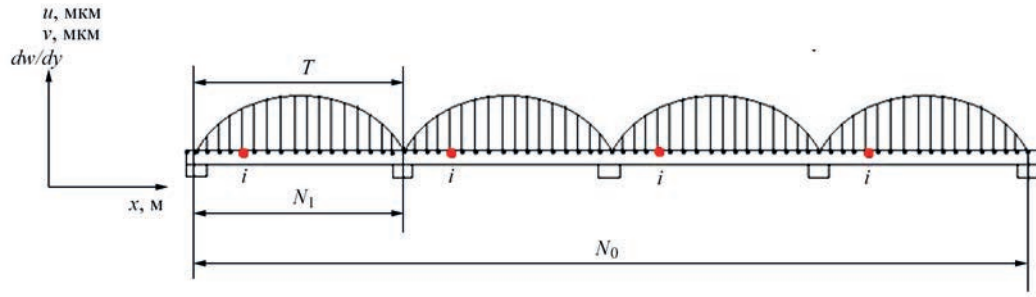


Рис. 8. Періодична структура профілю деформування з прикладом вибору точок для проведення усереднення

$y_k = \text{med}(x_{k-n}, x_{k-n+1}, \dots, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+n-1}, x_{k+n}), \quad (1)$
 де $\text{med}(x_1, \dots, x_m, \dots, x_{2n+1}) = x_n, x_m$ – елементи варіаційного ряду, тобто ранжовані у порядку зростання значень $x_m: x_{(1)} = \min(x_1, x_2, \dots, x_{2n+1}) \leq x_{(2)} \leq x_{(3)} \leq \dots \leq x_{(2n+1)} = \max(x_1, x_2, \dots, x_{2n+1})$.

Медіанний фільтр використовувався наступним чином: на кожній ділянці конструкції обирались $i = 1 \dots N_1$ точок із даними про деформування; значення функцій у цих точках упорядковувались за зростанням; з N_1 значень обиралось значення, яке знаходилось на $N_1/2+1$ позиції для непарного N_1 або середнє з $N_1/2$ та $N_1/2+1$ – для парного. Таким чином, відсіювались аномально малі та великі значення функцій.

Визначення еталонної бездефектної ділянки на основі реальних даних може викликати деякі труднощі. При моделюванні для отримання цієї ділянки достатньо побудувати бездефектну конструкцію та усереднити всі профілі потрібного виду. При обробці реальних даних заздалегідь неможливо гарантувати бездефектність конструкції або вибрати напрямок, профіль якого буде бездефектним. Тому для отримання еталонної бездефектної ділянки слід усереднити дані по всіх підходящих профілях.

Після отримання еталонного бездефектного профілю деформування P_e необхідно провести його порівняння з усіма ділянками обраного перерізу та знайти максимальні відхилення вимірних значень деформацій від даних еталонного профілю. Для того, щоб визначити, наскільки профіль деформації P відрізняється від значень переміщень еталонної ділянки, було введено функцію відхилення деформування ділянки P_n від еталонної ділянки P_e :

$$D(n) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} |P_e^i - P_n^i|}{N_1} \quad (2)$$

де n – номер ділянки, N_1 – загальна кількість точок вибраної ділянки з даними про переміщення, P_e^i – значення переміщень у точці з індексом i еталонного профілю, P_n^i – значення переміщень у точці з індексом i вибраної ділянки профілю P .

Для визначення ділянок конструкції, які містять дефекти, було розроблено наступний алгоритм:

1. Визначається період T структурних неоднорідностей досліджуваного об'єкта на основі даних профілю деформування його поверхні P завдовжки l , а також кількість точок N_1 дискретної функції, що описує переміщення або похідну переміщень, які припадають на один період.

2. Профіль деформування P розбивається на ділянки P_n завдовжки T .

3. Обчислюється профіль еталонної бездефектної ділянки P_e на основі даних про деформацію окремих ділянок P_n (обчислюються середні або медіанні значення).

4. Будується графік $D(n)$ відхилення деформування на ділянці P_n від профілю еталонної ділянки P_e , який є результатом порівняння еталонної бездефектної ділянки P_e з даними профілю деформування P .

5. На основі аналізу визначається місцезнаходження дефектних ділянок за максимальними значеннями функції $D(n)$.

Проведено апробацію запропонованого алгоритму на характерних профілях деформування поверхні тришарової зварної панелі.

На відміну від традиційного підходу, за якого висновок про наявність дефекту робить оператор на основі візуального аналізу картини деформування, функція $D(n)$ дозволяє встановити кількісний критерій наявності дефекту. Ділянка P_n вважається дефектною, якщо виконується умова $D(n) > D_{\text{пор}}$, де порогове значення $D_{\text{пор}}$ визначається за статистичними характеристиками розподілу $D(n)$, наприклад $D_{\text{пор}} = D_{\text{сер}} + k\sigma_D$, де $D_{\text{сер}}$ та σ_D – середнє значення та середньоквадратичне відхилення функції $D(n)$ по всіх ділянках профілю, k – коефіцієнт, що визначає чутливість контролю. Застосування такого критерію знижує суб'єктивний вплив оператора на результати неруйнівного контролю.

Аналіз профілю деформування поверхні зварної панелі з дефектами. Для визначення місцезнаходження дефектів у зварній панелі проведено обробку даних розподілів переміщення w та похідної $\partial w / \partial y$, отриманих уздовж перерізу l при термічному навантаженні тришарової панелі. Досліджувані профілі деформування вирізняються значною кількістю локальних максимумів і

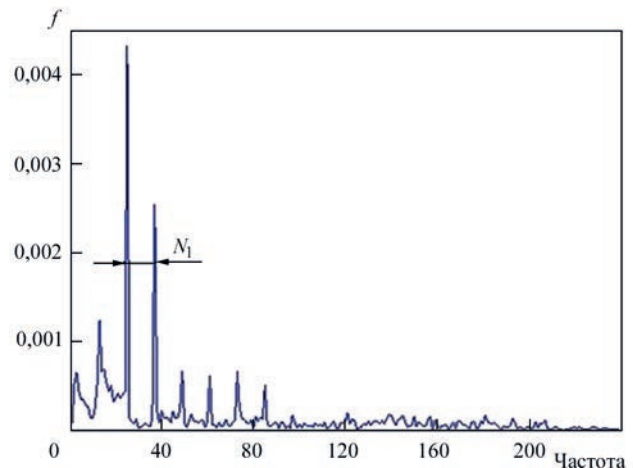


Рис. 9. Фур'є-спектр профілю u уздовж обраного перерізу: N_1 – крок між піками, що визначає кількість точок на один період профілю

мінімумів, при цьому амплітуда деформації в околі дефектних ділянок не перевищує амплітуду деформації в бездефектних ділянках. Це ускладнює безпосереднє виявлення дефектів на основі аналізу профілів деформування.

Для визначення основного періоду було реалізовано перетворення Фур'є профілю $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу (рис. 9). Отриманий просторовий спектр вирізняється наявністю різких максимумів, де по осі абсцис відкладено номери просторових гармонік (частоту), а по осі ординат f – їхні амплітуди.

На отриманому графіку наявні різкі максимуми, відстань між якими відповідає кількості ділянок N у конструкції. У даній зварній панелі $N = 12$. Оскільки загальна кількість точок $N_0 = 480$, то на одну ділянку конструкції припадає 40 точок. Слід зазначити, що якщо неможливо визначити період за першою гармонікою через її розмиття низькочастотним шумом, то використовується друга або наступні гармоніки та визначається відстань між ними. Еталонний профіль $\partial w/\partial y$ бездефектної ділянки був сформований трьома різними методами (рис. 10), проте вони не мають суттєвих відмінностей.

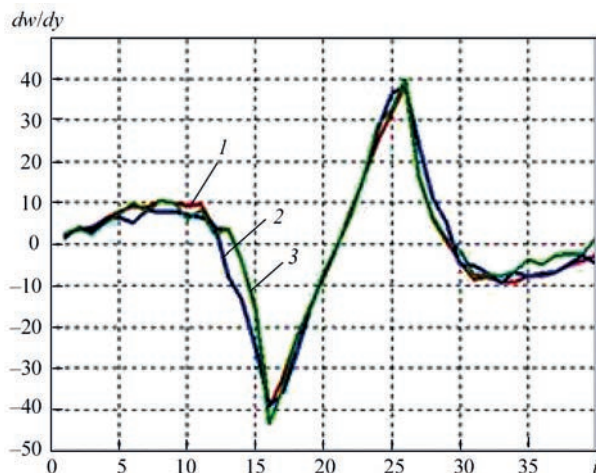


Рис. 10. Еталонний профіль $\partial w/\partial y$ бездефектної ділянки, отриманий усередненням за бездефектним профілем (1), усередненням за дефектним профілем (2) та медіанною фільтрацією (3), де i – порядковий номер дискретної точки в межах одного періоду профілю конструкції

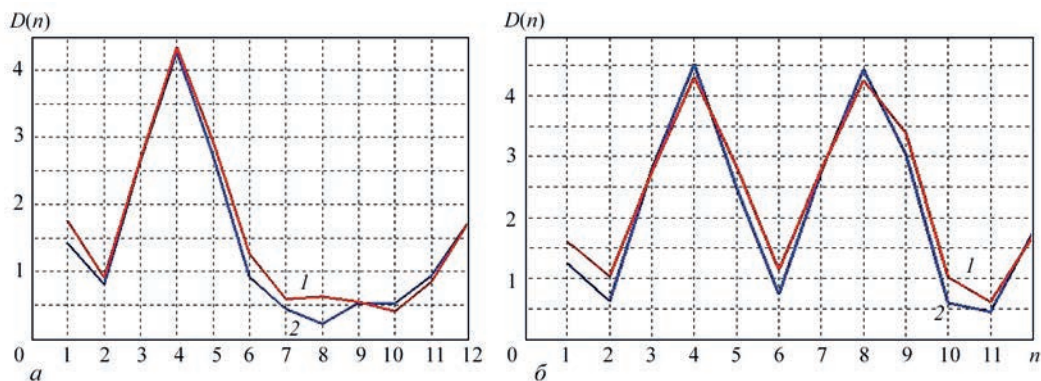


Рис. 11. Залежність $D(n)$ від номера профілю: 1 – за даними усереднення, 2 – за даними медіанної фільтрації

На рис. 11 наведено розподіл відхилень $D(n)$, де по осі абсцис відкладено номер ділянки конструкції n . Аналіз розподілу показує, що у першому випадку дефект локалізується на 4-й ділянці (рис. 11, а), а у другому — на 4-й та 8-й ділянках (рис. 11, б).

Зазначимо, що дані, отримані за допомогою звичайного усереднення та медіанної фільтрації, не мають істотних відмінностей. Проте функції $D(n)$ при розрахунках із використанням медіанної фільтрації мають менші значення в бездефектних ділянках. Отже, медіанна фільтрація надає точніші результати. Таким чином, розроблений алгоритм показав високу ефективність при визначенні місця дефекту в зварній панелі.

Визначення дефектів у тришаровій зварній панелі при її неруйнівному контролі методом ширографії. Апробацію розроблених алгоритмів було проведено на тришаровій зварній панелі. На відміну від розглянутої вище модельної задачі, експериментальний зразок відрізняється геометрією, матеріалами та видом навантаження, що дає змогу оцінити універсальність запропонованого підходу для конструкцій з періодичною структурою. Для роботи були використані дані неруйнівного контролю якості методом ширографії панелі розміром $190 \times 110 \times 5$ мм, несучі шари виготовлені зі сталі 03X11H10M2T завтовшки 0,6 мм, а зв'язуючий матеріал виготовлений зі сталі 12X18H10T завтовшки 0,3 мм.

У якості механічного навантаження в середину панелі через бічний отвір вводилось повітря об'ємом $V = 5 \text{ см}^3$. У результаті ширографічного контролю якості було отримано зображення розподілу похідної переміщень $\partial w/\partial y$ (рис. 12) у градієнтах сірого: найменшим значенням відповідають найтемніші ділянки, максимальним – найсвітліші.

Для подальшого дослідження в конструкції було обрано наступні профілі: 1, 2 – бездефектні, 3 – проходить через область впливу дефекту. У якості дефекту в конструкції є зруйноване точкове з'єднання між обшивкою та заповнювачем. Для

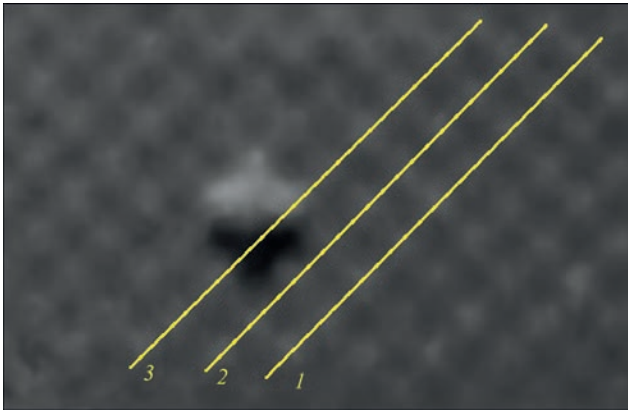


Рис. 12. Графічне зображення деформування поверхні панелі з внутрішнім дефектом при застосуванні внутрішнього тиску для її навантаження

зниження рівня спекл-шуму зображення деформування було оброблено за допомогою Гаусової фільтрації. Даний фільтр не змінює період характерних особливостей деформування, і, отже, не впливає на результати автоматичного визначення періоду T .

Для визначення місця розташування дефекту зварної точки (відсутність з'єднання) експериментальні дані про похідну компоненти переміщення $\partial w / \partial u$ були оброблені за тим самим алгоритмом, що й модельні дані. Під час обробки даних був побудований графік розподілу похідної (рис. 13, а) уздовж профілю I , вплив дефекту на нього не про-

являється. По осі ординат відкладається безрозмірна величина I , що визначається методом ширографії та є характеристикою деформації об'єкта. На графіку спектру Фур'є (рис. 13, б) наявний чіткий максимум, який відповідає кількості періодичних ділянок конструкції, що увійшли в профіль ($N = 9$), на одну характерну ділянку панелі припадає $N_1 = 51$ точок. Еталонна бездефектна ділянка була отримана шляхом обчислення середніх значень (рис. 13, в). Було проведено порівняння еталонної бездефектної ділянки з даними уздовж профілів I і 3 , а також обчислено значення функції $D(n)$ (рис. 13, г), де n – номер ділянки конструкції. Слід зазначити, що для бездефектного профілю (крива I) амплітуда значень функції значно менша, ніж для дефектного (крива 2).

Порівняння експериментально отриманої картини деформування панелі (рис. 14) з результатами роботи алгоритму показало, що функція $D(n)$, яка є показником відхилення деформації досліджуваних ділянок від еталонної бездефектної ділянки, забезпечує надійну локалізацію дефекту.

Отримані результати підтверджують коректність запропонованого алгоритму оброблення ширографічних даних і його ефективність для автоматизованої локалізації дефектів у тришарових зварних панелях.

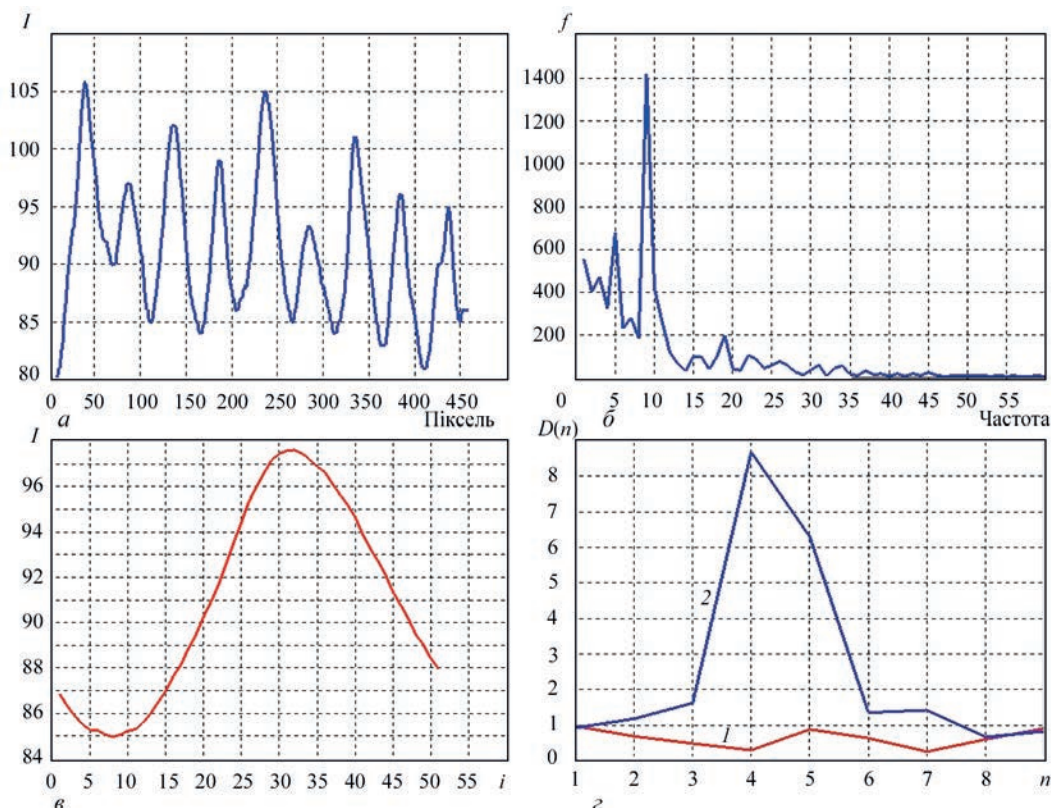


Рис. 13. Визначення місцеположення дефектної ділянки на основі ширографічних даних: а – профіль поверхні у перерізі I ; б – спектр Фур'є-даних уздовж профілю; в – графік безрозмірної величини I для еталонної ділянки; г – графіки функції $D(n)$

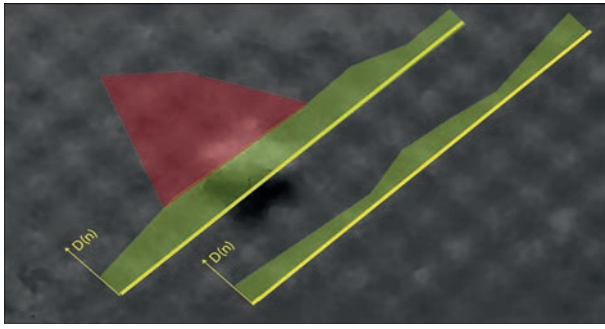


Рис. 14. Графічне представлення результатів застосування алгоритму автоматичного визначення місцеположення дефекту

Висновки

Проведено математичне моделювання напружено-деформованого стану тришарової зварної панелі при термічному навантаженні методом скінченних елементів. Це дало змогу дослідити вплив дефектів на деформування поверхні конструкцій. Показано, що використання похідної переміщень dw/dy дає можливість чіткіше виявляти наявність дефектів порівняно з аналізом лише переміщень. Це обґрунтовує доцільність застосування методу широкографії для неруйнівного контролю таких конструкцій.

На основі статистичної обробки даних, застосування методів Фур'є-аналізу та диференціального числення вперше розроблено алгоритм автоматизованого пошуку дефектних ділянок при їх неруйнівному контролі якости методами лазерної інтерферометрії.

Дослідження показали, що ефективність методики визначення місцезнаходження дефектів ґрунтується на визначенні періоду характерних особливостей, еталонної ділянки та обчисленні функції $D(n)$, яка відображає ступінь відхилення деформації досліджуваної ділянки від еталонної бездефектної. Встановлено, що медіанна фільтрація при формуванні еталонного профілю дає точніші результати порівняно з простим усередненням, забезпечуючи менші значення функції $D(n)$ у бездефектних ділянках.

Запропонована методика визначення місцезнаходження дефектів виявила високу ефективність при опрацюванні даних, отриманих у модельних та експериментальних дослідженнях тришарових зварних панелей. Ефективність алгоритму автоматизованого пошуку дефектних ділянок у металевих багатошарових тонкостінних конструкціях підтверджено як на модельних даних, отриманих при термічному навантаженні, так і на експериментальних даних широкографічного контролю панелі іншої конструкції при механічному навантаженні, що свідчить про універсальність підходу для широкого класу тонкостінних конструкцій з періодичною структурою.

Подяка. Дослідження було проведено в рамках проєкту 2025.07/0312 «Інноваційний комплекс безконтактних оптичних методів діагностики елементів конструкцій сучасної техніки з використанням штучного інтелекту», що фінансується Національним фондом досліджень України в рамках конкурсу «Передова наука в Україні 2026–2028».

Список літератури/References

1. Falchenko, Yu. V., Petrushynets, L. V. (2018) Modern methods of manufacturing three-layer panels of aluminium alloys (Review). *The Paton Welding J.*, **6**, 32–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.06.05>
2. Altenbach, H., Eremeyev, V. (2017) Thin-walled structural elements: Classification, classical and advanced theories, New Applications. In book: *Shell-like Structures*, 1–62. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-42277-0_1
3. Ghaffari, B., Mozurkewich, G. (2010) Non-destructive evaluation of spot-weld quality. In: *Failure Mechanisms of Advanced Welding Processes, Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies*, 101–136. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845699765.101>
4. Le, M., Kim, J., Kim, S., Lee, J. (2016) Nondestructive testing of pitting corrosion cracks in rivet of multilayer structures. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, **17**, 1433–1442. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0169-7>
5. Le, M., Kim, J., Kim, S., Lee, J. (2018) B-scan ultrasonic testing of rivets in multilayer structures based on short-time Fourier transform analysis. *Measurement*, **128**, 495–503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.049>
6. Soyuturk, F., Günöz, A., Kara, M. (2023) Detection of welding defects by non-destructive testing methods. *Intern. Conf. on Applied Engineering and Natural Sciences*, **1**(1), 424–427. DOI: <https://doi.org/10.59287/icaens.1033>
7. Thornton, M., Han, L., Shergold, M. (2012) Progress in NDT of resistance spot welding of aluminium using ultrasonic C-scan. *NDT & E International*, **48**, 30–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.02.005>
8. Yang, L., Chuai, R., Cai, G. et al. (2024) Ultrasonic non-destructive testing and evaluation of stainless-steel resistance spot welding based on spiral C-scan technique. *Sensors*, **24**, 4771. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24154771>
9. Ulbrich, D., Psuj, G., Wypych, A. et al. (2023) Inspection of spot welded joints with the use of the ultrasonic surface wave. *Materials*, **16**(21), 7029. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16217029>
10. Mathisizik, C., Koal, J., Schmale, H.C., Füssel, U. (2026) Non-destructive testing of resistance spot welds by magnetic evaluation. In: *Proc. of the 14th European Conf. on Non-Destructive Testing 2026 (ECNDT 2026), June 15–19, 2026, Verona, Italy*. DOI: <https://doi.org/10.58286/33348>
11. Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: An optical measurement technique and applications. *Mater. Sci. Eng.*, **49**(3), 61–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.001>
12. Xu, N., Xie, X., Harmon, G., Gu, R., Yang, L. (2012) Quality inspection of spot welds using digital shearography. *SAE Intern. J. of Materials and Manufacturing*, **5**(1), 96–101. DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0182>
13. Hung, Y.Y., Yang, L.X., Huang, Y.H. (2013) Non-destructive evaluation (NDE) of composites: Digital shearography. In: *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 84–115. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857093554.1.84>
14. Lobanov, L.M., Savitsky, V.V., Kyianets, I.V. et al. (2021) Non-destructive testing of elements of titanium honeycomb panels by shearography method using vacuum load. *The Paton Welding J.*, **12**, 49–54. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.12.08>
15. Stetsyuk, P.I., Savitsky, V.V. (2018) On defects search in regular 3D-structures. *J. of Automation and Information Sciences*, **50**(3), 21–37. DOI: <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfSci.v50.i3.20>
16. Ribes, A., Caremoli, C. (2007) SALOME platform component model for numerical simulation. In: *31st Annual Intern. Computer Software and Applications Conf. (COMPSAC 2007)*, 553–564. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2007.185>

17. Code_Aster: Finite element analysis of structures and thermomechanics for studies and research. Electricité de France (EDF), 1989–2026. <https://www.code-aster.org>
18. Oppenheim, A.V., Schaffer, R.W. (2009) *Discrete-time signal processing*. 3rd ed. Upper Saddle River, Pearson.
19. Huang, T., Yang, G., Tang, G. (1979) A fast two-dimensional median filtering algorithm. *IEEE Transact. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 27(1), 13–18. DOI: <https://doi.org/10.1109/tassp.1979.1163188>

AUTOMATED DETECTION OF DEFECTIVE AREAS IN A MULTILAYER THIN-WALLED STRUCTURE WITH PERIODIC CONFIGURATION BY LASER INTERFEROMETRY METHODS

L.M. Lobanov, I.L. Shkurat, O.P. Shutkevych, I.V. Kyianets, V.V. Savitsky

Paton E.O. Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: innashkurat2909@gmail.com

Modeling and data analysis methods were applied to detect and evaluate deformations in thin-walled structures, in particular in welded multilayer panels. The use of finite element method enabled the characteristic spatial deformation profiles and their relationship with defect localization to be established. Fourier analysis and differentiation techniques were used to develop an algorithm for the automated detection of defective areas in thin-walled structures. It is shown that using the displacement derivative $\partial w / \partial y$ provides clearer defect localization compared to analysis of displacements alone. This substantiates the feasibility of applying the shearography method as one of the most informative approaches to the non-destructive testing of such structures. The obtained results are confirmed by both numerical and experimental data, indicating the suitability of the methodology for diagnosing a wide class of thin-walled structures. 19 Ref., 14 Fig.

Keywords: thin-walled structures, stress-strain state, finite element method, Fourier analysis, non-destructive testing, laser interferometry, shearography, automated defect detection

ORCID

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Шкурят І.Л. – <https://orcid.org/0009-0003-1888-4203>,
Шуткевич О.П. – <https://orcid.org/0000-0001-5758-2396>, Киянець І.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2559-8200>,
Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

І.Л. Шкурят

ІЕЗ ім. Патона Є.О. НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: innashkurat2909@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

Л.М. Лобанов, І.Л. Шкурят, О.П. Шуткевич, І.В. Киянець, В.В. Савицький (2026) Автоматизоване визначення дефектних ділянок багатопарової тонкостінної конструкції з періодичною структурою методами лазерної інтерферометрії. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **03**, 28–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.03.02>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>

Отримано 12.07.2026

Отримано у переглянутому вигляді 20.08.2026

Підписано до друку 06.09.2026

Оприлюднено 22.09.2026

НОВА КНИГА



Максимов С.Ю., Звірко О.І., Міленін О.С., Ниркова Л.І., Чудик І.І., Запхляк В.Б., Рудко В.В. Стійкість і відновлення об'єктів зберігання та транспортування природного газу. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, АТ «Укртрансгаз», 2026. — 218 с.

Монографію присвячено розвитку наукових засад забезпечення стійкості, безпечної експлуатації та відновлення об'єктів транспортування та зберігання природного газу в умовах сучасних технологічних, енергетичних і безпекових викликів. На основі узагальнення фундаментальних і прикладних досліджень, виконаних представниками декількох наукових шкіл України, сформовано цілісну наукову концепцію, яка інтегрує закономірності деградації конструкційних матеріалів, фізико-механічні механізми руйнування, математичного моделювання, прогнозування залишкового ресурсу та науково обґрунтованого вибору технологій відновлення газотранспортної інфраструктури. Особливу увагу приділено проблемам функціонування об'єктів газотранспортної системи в умовах тривалої експлуатації, воєнних загроз, післявоєнного відновлення, енергетичного переходу та перспектив транспортування водневмісних енергоносіїв. Монографія призначена для науковців, інженерів, фахівців газотранспортної галузі, викладачів, аспірантів і студентів технічних спеціальностей. Бібліогр. 272, табл. 24, рис. 104. ISBN 978-617-7785-97-1.

Книга у вільному доступі за посиланням — <https://patonpublishinghouse.com/ukr/books>